



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**



**DISSERTAÇÃO DE DEFESA DE MESTRADO**

**ANÁLISE DO COEFICIENTE DE RENDIMENTO DE ROTORES EÓLICOS  
RESIDENCIAIS FABRICADOS COM USO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS**

**Alex Resende Alves Rodrigues**

**Belo Horizonte**

**Março de 2021**

Alex Resende Alves Rodrigues

**ANÁLISE DO COEFICIENTE DE RENDIMENTO DE ROTORES EÓLICOS  
RESIDENCIAIS FABRICADOS COM USO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa Biomateriais, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Prof. Dr. Claudinei Resende Calado

Belo Horizonte

Março de 2021

Rodrigues, Alex Resende Alves.  
R696a Análise do coeficiente de rendimento de rotores eólicos residenciais fabricados com o uso de materiais poliméricos / Alex Resende Alves Rodrigues. – 2021.  
98 f. : il.  
Orientador: Claudinei Resende Calado.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2021.  
Bibliografia.

1. Rotores. 2. Polímeros (Materiais). 3. Análise dinâmica. 4. Turbinas. I. Calado, Claudinei Resende. II. Título.

CDD: 620.192

# **ANÁLISE DO COEFICIENTE DE RENDIMENTO DE ROTORES EÓLICOS RESIDENCIAIS FABRICADOS COM USO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa Biomateriais, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Alex Resende Alves Rodrigues

Orientador: Claudinei Resende Calado

Aprovado em: 24 /06 /2021

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Dr. Claudinei Resende Calado - CEFET-MG

---

Dr. Sidney Nicodemos da Silva

---

Dr. Cleverson Fernando Garcia

Belo Horizonte

Março de 2021

Dedico este trabalho aos meus pais, Sebastião e Elenicia, por proporcionarem tudo durante o caminho para que eu chegasse à este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, que me permitiu a concretização deste sonho.

Agradeço aos meus pais Sebastião e Elenicia e meus irmãos Israel e Raquel por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos fornecendo apoio, carinho e força para seguir em frente.

Aos meus professores, em especial ao meu orientador Claudinei, pela paciência e disponibilidade em transmitir seus conhecimentos e fornecer seu auxílio da melhor maneira possível.

Ao CEFET-MG pelos meios e o apoio para realizar este trabalho.

À coordenação de materiais pelo auxílio e apoio, em especial à Caroline Fernandes e ao Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz.

Aos amigos Enzo Rafaello, Felipe Andrade e Júlia Schmidt e Leandro Seles Dorneles pela contribuição neste trabalho

A todos vocês muito obrigado por fazerem parte de minha história.

## RESUMO

Devido a grande demanda de métodos alternativos de produção de energia elétrica, meios para diminuir o custo de produtos que geram energia se faz necessário. Este trabalho tem o objetivo de estudar a viabilidade do uso de materiais poliméricos, de baixo custo produtivo, em rotores eólicos de pequeno porte, para utilização residencial. Para melhor entender as tipologias de rotores eólicos e aplicação de polímeros foi realizada inicialmente uma extensa revisão bibliográfica sobre o assunto. Identificando assim as turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) de melhor eficiência, sendo 3 modelos testados por simulação dinâmica, evidenciando o modelo híbrido darrieus-savonius modificado como de maior eficiência, capacidade de entrar em movimento com baixa velocidade de ventos e geração de torque no eixo maximizado. Também foi considerado que o projeto fosse de fácil montagem e instalação. O estudo realizado em testes de simulação computacional pelo método de elementos finitos (MEF) para análise de esforços nos componentes, considerando inicialmente o PETG como material base para levantamento de esforços, bem como para a validação matemática dos materiais poliméricos escolhidos. Após a definição dos materiais, PETG, uma análise dinâmica verificou-se necessária para a validação do rotor eólico em movimento pelo mesmo método de elementos finitos no SolidWorks®. De acordo com os resultados obtidos foi possível entender o melhor *design* para garantir a maior eficiência em baixas velocidades de ventos, quais propriedades influenciam a viabilidade do uso de materiais poliméricos em rotores eólicos, e de que forma, o comportamento é modificado no teste dinâmico. Conclui-se que a turbina 3 é a de melhor desempenho aerodinâmico (27%), visto que sua eficiência é maior que a turbina 1, 21%, e da turbina 2 com 23%.

**Palavras-chave:** Rotor eólico, materiais poliméricos, viabilidade técnica, análise dinâmica.

## ABSTRACT

Due to the great demand for alternative methods of producing electricity, the means reducing the cost of products capable of generating energy may become necessary. This work aims to study the feasibility of using polymeric materials, of low production cost, in small wind turbines, for residential use. In order to better understand the typologies of wind rotors and the application of polymers, an extensive bibliographic review on the subject was carried out. Thus identifying the vertical efficiency wind turbines (TEEV) of better efficiency, with 3 models tested by dynamic simulation, showing the hybrid model darrieus-savonius modified as having greater efficiency, the ability to move with low wind speed and torque maximized generated in axis. The project was also considered to be easy to assemble and install. The study carried out in computer simulation tests by the finite element method (FEM) for stress analysis in the components, initially considering PETG as a base material for lifting efforts, as well as for the mathematical validation of the chosen polymeric materials. After defining the materials, PETG, a dynamic analysis was found necessary for the validation of the wind turbine in motion by the same finite element method in SolidWorks®. According to the results obtained, it was possible to understand the best design to ensure the highest efficiency at low wind speeds, which properties influence the viability of using polymeric materials in wind turbines, and how the behavior is modified in the dynamic test. It is concluded that turbine 3 is the best aerodynamic performance (27%), since its efficiency is higher than turbine 1, 21%, and turbine 2 with 23%.

**Keywords:** Wind rotor, polymeric materials, technical feasibility, dynamic analysis.

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de comercialização de Energia Elétrica
CEFETMG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CFD	Fluido Dinâmica Computacional
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COP 21	21ª conferência das partes
C <sub>p</sub>	Coeficiente de rendimento
CVT	Transmissão continuamente variável
GWEC	Global Wind Energy Council
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
MEF	Método de elementos finitos
NdFeB	Neodímio Ferro Boro
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PETG	Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol
TA	Tipo automático
TEEH	Turbinas eólicas de eixo horizontal
TEEV	Turbinas eólicas de eixo vertical
TIE	Tamanho inicial do elemento
TME	Tamanho mínimo de espaçamento

## LISTA DE TERMOS ESTRANGEIROS

Back to back

Design

Lift

Tip speed ratio

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Moinho holandês.....	21
Figura 2: Moinho misto de madeira e metal de 1880 na cidade de Dakota do Sul....	22
Figura 3: Vista frontal (a) e vista interna (a) da turbina eólica de Brush. Primeira planta de geração eólica operada entre 1888 a 1908 na cidade de Cleveland – Ohio. ....	23
Figura 4: Turbina eólica Smith-Putnam (1941): Primeira planta eólica de classe MW. ....	24
Figura 5: Turbina eólica de eixo vertical de 34m de diâmetro projetada e instalada pelo SANDIA para testes na cidade Bushland, Texas. ....	25
Figura 6: Fluxo de ar através de uma área transversal A.....	28
Figura 7: Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás. ....	29
Figura 8: Forças atuantes em hélice com formato de asa.....	32
Figura 9: Turbina eólica de eixo horizontal.....	34
Figura 10: Turbina eólica de eixo vertical.....	35
Figura 11: Turbina Darrieus e suas configurações.....	37
Figura 12: Perda na porta da asa.....	39
Figura 13: Efeito do ângulo de ataque no efeito estol. ....	40
Figura 14: Análise estática em chapa fixa sob força externa. ....	42
Figura 15: Análise dinâmica de rotor eólico sob efeito da força do ar. ....	43
Figura 16: Mapa de ventos do Brasil.....	45
Figura 17: Mapa de ventos no sudeste. ....	46
Figura 18: Cadeias moleculares dos polímeros. ....	48
Figura 19: Comportamento tensão-deformação de materiais poliméricos frágeis (curva A), plásticos (curva B), elásticos (curva C).....	49
Figura 20: Parâmetros mecânicos de alguns polímeros comerciais. ....	50
Figura 21: Aplicações de alguns polímeros.....	51
Figura 22: Sistema CVT por polias e correia.....	54
Figura 23: Propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos duros.....	56
Figura 24: Diagramas elétricos dos componentes dos conversores. ....	57
Figura 25: Torre 1 de modelo Darrieus. ....	62
Figura 26: Torre 2 com pás no centro do eixo e asas com maior comprimento.....	63
Figura 27: Torre 3, modelo similar ao Darrieus-Savonius. ....	64
Figura 28: (a) Ângulo de 60° em relação ao eixo de sustentação da pá.(b) Ângulo de 0° em relação ao eixo de sustentação da pá. (c) Ângulo de 30° em relação ao eixo de sustentação da pá. ....	65

Figura 29 - Cortes na turbina 1.....	68
Figura 30: Cortes na Turbina 2.....	69
Figura 31: Cortes na Turbina 3.....	69
Figura 32: Análise de deformação no pico do eixo.....	71
Figura 33: Comportamento da base sobre a solitação máxima.....	72
Figura 34: Deformação em milímetros .....	73
Figura 35: Efeito da pressão para o ângulo de 0° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização. ....	74
Figura 36: Efeito da velocidade(m/s) para o ângulo de 0° em relação ao eixo de sustentação da pá.(a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	75
Figura 37: Efeito da pressão para o ângulo de 30° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	76
Figura 38: Efeito da velocidade para o ângulo de 30° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	77
Figura 39: Efeito da pressão para o ângulo de 60° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	78
Figura 40: Efeito da velocidade para o ângulo de 60° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	79
Figura 41: Efeito da pressão para o ângulo de 0° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização. ....	80
Figura 42: Efeito da velocidade para o ângulo de 0° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	81
Figura 43: Efeito da pressão para o ângulo de 30° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	82
Figura 44: Efeito da velocidade para o ângulo de 30° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	83
Figura 45: Efeito da pressão para o ângulo de 60° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	84
Figura 46: Efeito da velocidade para o ângulo de 60° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	85
Figura 47: Efeito da pressão para o ângulo de 0° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização. ....	86

Figura 48: Efeito da velocidade para o angulo de 0° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	87
Figura 49: Efeito da pressão para o angulo de 30° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	88
Figura 50: Efeito da velocidade para o angulo de 30° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	89
Figura 51: Efeito da pressão para o angulo de 60° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	90
Figura 52: Efeito da velocidade para o angulo de 60° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.....	91

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação de fenômenos tropicais. ....	47
Quadro 2: Rendimento dos diferentes tipos de transmissão. ....	55
Quadro 3: Coeficientes de rendimentos do sistema. ....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Emissão de CO <sub>2</sub> em diferentes tecnologias de geração de energia elétrica. .....	27
Tabela 2: Tabela comparativa de eficiência e potência por velocidade dos ventos. .	92
Tabela 3: Potência útil das torres por velocidade do vento. ....	93

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	17
2. JUSTIFICATIVA .....	18
3. OBJETIVO .....	19
3.1. Objetivo geral .....	19
3.2. Objetivos específicos .....	19
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
4.1. Histórico da energia eólica .....	20
4.2. O meio ambiente e a energia eólica .....	25
4.3. Potência extraída do vento .....	27
4.4. Formato das pás .....	31
4.5. Turbinas eólicas .....	33
4.5.1. Turbinas eólicas de eixo horizontal .....	33
4.5.2. Turbinas eólicas de eixo vertical .....	35
4.6. Turbina Darrieus .....	36
4.7. Perdas .....	38
4.7.1. Perdas nas pontas das pás .....	38
4.7.2. Perdas por estol .....	40
4.7.3. Perdas por turbulência .....	40
4.7.4. Perdas mecânicas .....	41
4.8. Modelos matemáticos e método de elementos finitos .....	41
4.8.1. Análise estática .....	42
4.8.2. Análise Dinâmica .....	43
4.9. Mapa dos ventos .....	44
4.10. Polímeros .....	47
4.10.1. Propriedades mecânicas dos Polímeros .....	49
4.11. Transmissões .....	52
4.11.1. Transmissões mecânica .....	52
4.11.2. Transmissão CVT .....	54
4.12. Gerador de energia elétrica .....	55
4.13. Conversor .....	56
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	58
5.1. Modelo Matemático .....	58
5.1.1. Conservação de massa .....	58
5.1.2. Conservação de quantidade de movimento linear .....	59
5.2. Modelo de turbulência de Reynolds-RSM (Reynolds Strees model) .....	60
5.3. Modelo físico .....	60
5.3.1. Análise estática .....	60
5.3.2. Dimensionamento físico .....	62
5.4. Condições ambiente .....	65
5.5. Condições de contorno .....	66
5.6. Malha computacional .....	66

<b>5.7. Apresentação de resultados</b> .....	68
<b>5.8. Cálculo de potência médio fornecida</b> .....	69
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	71
<b>6.1. Análises estáticas</b> .....	71
<b>6.2. Análises dinâmicas</b> .....	73
<b>6.2.1. Turbina 1</b> .....	73
<b>6.2.2. Turbina 2</b> .....	80
<b>6.2.3. Turbina 3</b> .....	86
<b>6.3. Potência gerada</b> .....	92
<b>6.4. Potência útil</b> .....	92
<b>7. Conclusão</b> .....	94

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria de energia busca a diversificação de fontes energéticas, bem como tarifas mais baratas e energia limpa e de melhor qualidade para a sociedade. Com base nesta perspectiva para o setor elétrico, o Brasil vem buscando o crescimento na capacidade de geração eólica no país.

De acordo com a Global Wind Energy Council (GWEC), organização especializada em energia eólica, em 2018, o país tinha 2 GW de capacidade eólica à sua matriz energética, posicionando o Brasil na 8ª posição no ranking mundial e líder na América Latina.

Em 2015, assinou um termo de compromisso internacional na COP 21 de aumentar para 33% o uso de fontes renováveis até o ano de 2030 na matriz total. E com pelo menos 23% de aumento do fornecimento energético de fontes renováveis até o mesmo ano, segundo o ministério do Meio Ambiente.

A liderança brasileira na produção deste tipo de energia renovável é confirmada também pelos órgãos brasileiros. Como Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), que em 2016, constatou uma expansão de 2.491MW. E a Câmara de comercialização de Energia Elétrica (CCEE), de janeiro a agosto de 2019, a geração de energia pela força dos ventos foi de 5.501,52MW médios ante 4.794,91MW médios no mesmo período de 2018, o que representam um crescimento de 14,7%. Com isso, apenas em 2018, foram evitadas emissões de 20,58 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

O estado de Minas Gerais, hoje com 1,56MW de produção de energia eólica, em 14º entre os estados brasileiros, tem grande potencial de crescimento, segundo a Cemig, Companhia Energética de Minas Gerais, no âmbito Estadual, o potencial eólico tem mesma ordem de grandeza que a capacidade atualmente instalada de recursos hidráulicos.

O país mostra que pode ter uma grande geração de energia eólica, porém o desafio é que essa produção possa ser residencial, levando energia a locais não atendidos pela rede elétrica pública, bem como grandes centros urbanos, que procuram diminuir o gasto familiar com energia. Para esse fim residencial é imprescindível que a forma de instalação seja fácil para montagem do próprio dono

e o gerador seja de baixo custo. O presente trabalho investiga a possibilidade de viabilizar um produto com essas características, gerando um retorno financeiro e promovendo acessibilidade à energia.

Para a realização e comparação dos projetos, foi realizado um vasto estudo sobre as torres eólicas já utilizadas em meios urbanos, partindo assim do modelo Darrieus, bem comum neste tipo de aplicação. Bem como, foi avaliado o melhor material e componentes que pudessem resultar em uma maior eficiência do Sistema quanto a quantidade de energia produzida.

A validação técnica do material foi concebido através de cálculos de esforços, além de simulações estáticas do conjunto. De forma análoga, foram realizados testes dinâmicos para identificar o projeto mais eficiente e de melhor comportamento durante sua operação.

## **2. JUSTIFICATIVA**

A busca de produção de energia elétrica de fontes renováveis é cada vez mais evidente em políticas públicas ao redor do mundo. Isso se deve ao grande desequilíbrio entre desenvolvimento econômico e meio ambiente em que vários países se encontram atualmente. Apesar dos esforços para promover a adoção de mais fontes de energias renováveis muitos, países esbarram em limitações de custo e a eficiência deste tipo de energia.

A utilização de materiais poliméricos comerciais pode baratear um gerador eólico, devido a sua produção em larga escala, bem como seu baixo custo de produção se comparados a materiais metálicos comumente utilizados. Além do menor custo, o uso destes materiais em rotores pode aumentar a sua eficiência, devido ao baixo peso específico dos polímeros, que proporciona uma menor força necessária para o movimento das pás.

Polímeros com grande capacidade de conformação colaboram para a variação de projeto nas pás, uma vez que permitem que peças com alto grau de complexibilidade seja de fácil produção em comparação aos tradicionais rotores fabricados em materiais metálicos.

### **3. OBJETIVO**

#### **3.1. Objetivo geral**

Investigar o uso de materiais poliméricos em rotores eólicos residenciais e analisar a viabilidade técnica e econômica de aerogeradores para instalações domésticas.

#### **3.2. Objetivos específicos**

Aprimorar o melhor *design* do rotor, a fim de otimizar a geração de energia com segurança funcional, definindo também as propriedades específicas que o material deve possuir considerando as solicitações mecânicas que o projeto será submetido;

Selecionar quais materiais poliméricos podem ser utilizados em cada parte do gerador, de forma a maximizar a geração de energia e reduzir os custos de fabricação, estabelecendo a tipologia de gerador de energia elétrica a ser instalado com o rotor eólico;

Validar a eficiência e confiabilidade do rotor fabricado, em base polimérica, por meio de simulações dinâmicas.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A energia eólica vem sendo analisada como uma alternativa para o fornecimento de energia elétrica, se mostrando como uma importante fonte no mercado energético mundial. Além de ser uma alternativa cada vez mais competitiva economicamente, um dos grandes incentivos para o uso de turbinas eólicas está nos baixos impactos ambientais causados por ela.

Turbinas eólicas de pequeno porte são aquelas que produzem até 20kW. Para o uso residencial, é considerada uma produção de até 3kW. Esse tipo de equipamento deve ser barato para apresentar um retorno econômico em curto ou médio prazo, e também de simples instalação.

Este capítulo demonstra os fundamentos básicos relacionados com a energia eólica. Iniciando com um breve histórico sobre a utilização destes mecanismos, seguido das tipologias de projetos, perdas presentes no processo, formas de simulação e aproximação de funcionamento e propriedades. Por fim, apresenta os materiais que podem ser utilizados em rotores de pequeno porte.

### **4.1. Histórico da energia eólica**

É considerado por volta do século II a.C. o primeiro registro histórico sobre a utilização da energia eólica para bombeamento de água e processamento de grãos através de cata-ventos no reino Persa. Tratava-se de um cata-vento de eixo vertical. Apesar da baixa eficiência devido a suas características, estes equipamentos primitivos apresentavam grandes utilidades ao suprir as necessidades básicas daquela sociedade, como o de bombeamento d'água ou moagem de grãos, substituindo a força motriz humana e animal (SHEPHERD, 1994).

As máquinas primitivas persistiram até o século XII quando começaram a ser utilizados moinhos de eixo horizontal em alguns países da Europa. Os moinhos de vento de eixo horizontal do tipo holandês como demonstrado na figura 1, foram rapidamente disseminados em vários países da Europa. Com o avanço tecnológico das pás, eixos, e etc., o uso dos moinhos de vento proporcionou a otimização de várias atividades utilizando-se a força motriz do vento (DUTRA, 2001).

**Figura 1:** Moinho holandês.



**Fonte 1:** Moinho de vento Holandês. (disponível em:  
[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=201](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=201))

O cata-vento evoluiu para os dias de hoje para o moinho de múltiplas pás, como mostra a figura 2, que se adaptou muito bem às condições rurais devido as suas características de fácil operação e manutenção. Toda a estrutura era feita de metal e o sistema de bombeamento era feito por meio de bombas e pistões favorecidos pelo alto torque fornecido pela grande número de pás. Até hoje esse sistema e suas variações são largamente utilizadas em várias partes do mundo para bombeamento d'água (DUTRA, 2001).

**Figura 2:** Moinho misto de madeira e metal de 1880 na cidade de Dakota do Sul.



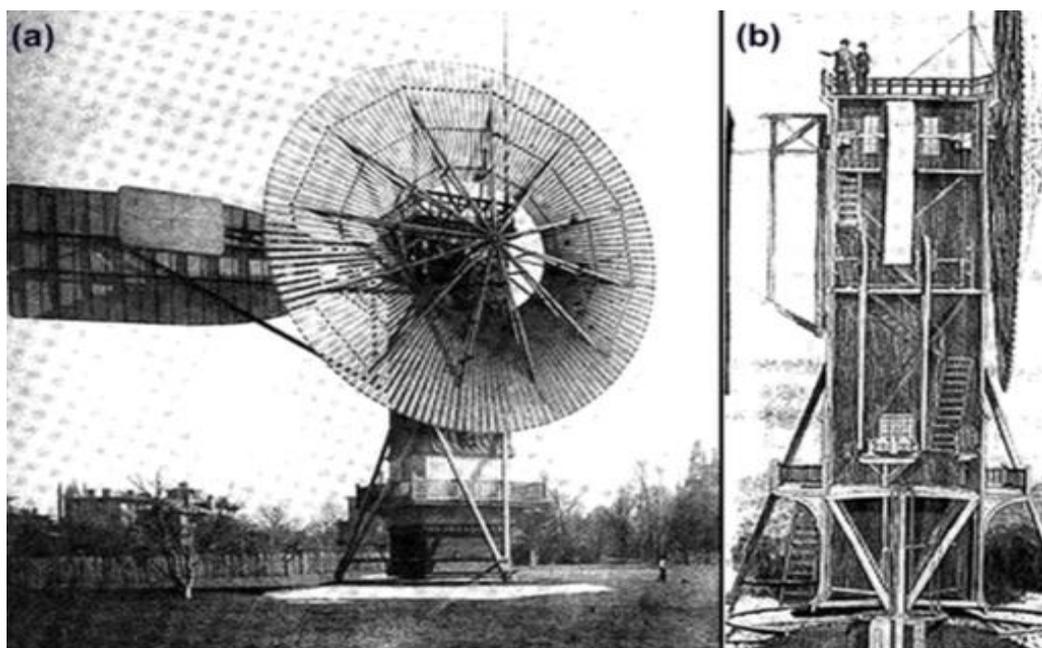
**Fonte 2:** Moinho de bombeamento. Disponível em:

<https://meioseculodeaprendizagens.blogspot.com/2013/03/historia-dos-moinhos-de-vento-americanos.html>

A adaptação dos cata-ventos para a geração de energia elétrica teve início no final do século XIX. Em 1888, Charles F. Brunch, um industrial voltado para eletrificação rural, ergueu na cidade de Cleveland, Ohio, o primeiro cata-vento, destinado a geração de energia elétrica. O sistema era composto por um cata-vento que fornecia 12kW em corrente contínua para o carregamento de baterias que eram destinadas, sobretudo, ao fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes (SHEPHERD, 1994).

O invento de Brush trazia três inovações importantes para o desenvolvimento do uso da energia eólica para geração de energia elétrica. A primeira inovação era a altura utilizada pelo invento estar dentro das categorias dos moinhos de ventos utilizados para a moagem de grãos e o bombeamento d'água. Em segundo lugar, foi introduzido um mecanismo de grande fator de multiplicação da rotação das pás (50:1) que funcionava em dois estágios possibilitando um máximo aproveitamento do dínamo cujo funcionamento estava em 500rpm. Por último, esse invento, demonstrado na figura 3, foi a primeira e mais ambiciosa tentativa de se combinar a aerodinâmica e a estrutura dos moinhos de vento com as recentes inovações tecnológicas na produção de energia elétrica (DUTRA, 2001).

**Figura 3:** Vista frontal (a) e vista interna (a) da turbina eólica de Brush. Primeira planta de geração eólica operada entre 1888 a 1908 na cidade de Cleveland – Ohio.



**Fonte 3:** SPERA, 1994.

Os projetos de desenvolvimento de aerogeradores foram aperfeiçoados a partir da turbina eólica de Brush, durante a Segunda Guerra Mundial esse desenvolvimento de geradores de médio e grande porte obteve grande propulsão com o empenho de vários países em economizar combustíveis fósseis. Os Estados Unidos desenvolveram um projeto de construção do maior até então projetado. O modelo de aerogerador Smith-Putnam apresentava 53,3m de diâmetro, uma torre de 33,5m de

altura e duas pás de aço com 16 toneladas. A geração elétrica era feita com um gerador síncrono de 1250kW com rotação constante de 28rpm, que trabalhava com corrente alternada, conectado diretamente à rede elétrica local. Esse aerogerador, figura 4, operou continuamente de outubro de 1941 até março de 1945, em uma colina em Vermont chamada Grandpa's Knob, quando uma de suas pás metálicas quebrou por fadiga (SHEPHERD, 1994).

**Figura 4:** Turbina eólica Smith-Putnam (1941): Primeira planta eólica de classe MW.



**Fonte 4:** SHEPHERD, 1994.

A crise do petróleo na década de setenta foi o fator culminante para uma nova injeção de investimentos em energia eólica. Quase todos os projetos anteriores haviam sido desativados devido aos baixos preços do petróleo e à expansão da rede de energia elétrica gerada em usinas hidrelétricas e termelétricas. Nesse cenário, os projetos de aerogeradores ficavam restrito somente a estudos acadêmicos sem nenhum grande interesse comercial (DUTRA, 2001).

Durante este período, os Estados Unidos iniciaram suas pesquisas com modelos de eixo horizontal e vertical. Com o mercado de aerogeradores de pequeno porte já crescente, o governo americano, através de seus órgãos de pesquisa, iniciou projetos com modelos de grande porte testando e aprimorando várias configurações. O modelo de pás-curvas para aerogeradores de eixo vertical foi patenteado por G.J.M. Darrieus, na França, em 1925 e, nos Estados Unidos, em 1931 e foi aperfeiçoado na década de sessenta por Peter South e Raj Rangi, membros do *National Research*<sub>[FMDA1]</sub> *Council* do Canadá (SPERA, 1994).

Entre 1984 e 1987, um modelo (figura 5) de 34m de 625kW foi projetado e instalado pela SANDIA, centro de pesquisas e desenvolvimento de turbinas eólicas de eixo vertical nos Estados Unidos, no campo de testes do Departamento de Agricultura Americano em Bushland, Texas.

**Figura 5:** Turbina eólica de eixo vertical de 34m de diâmetro projetada e instalada pelo SANDIA para testes na cidade Bushland, Texas.



**Fonte 5:** SANDIA, 2000.

Essa turbina de eixo vertical, a última construída, trouxe consigo um grande número de avanços tecnológicos para operação em grandes potências. Entretanto, foi no modelo de 17m de 100kW que o uso comercial das turbinas de eixo vertical mostrou-se mais convidativo ao mercado gerador. No início dos anos 80 foram instalados, no Estado da Califórnia, aproximadamente 600 modelos Darrieus com potência total instalada superior a 90MW (DIVONE 1994).

#### **4.2. O meio ambiente e a energia eólica**

O uso da energia nuclear tem sido uma questão polêmica desde os acidentes nos reatores de Three Mile Island em 1979, nos Estados Unidos e, mais tarde, em 1986 na cidade de Chernobyl, na ex-União Soviética. As fortes pressões ambientais

sobre o futuro do uso dessa energia forçaram a comunidade internacional a procurar fontes mais seguras e confiáveis para o fornecimento de energia elétrica. Nas décadas de 80 e 90, os novos paradigmas por fontes limpas criaram um cenário favorável e altamente promissor para desenvolvimento de fontes renováveis de energia, em particular a energia eólica (DUTRA, 2001).

Além da matriz energética não renovável baseada em combustíveis fósseis apresentar perspectivas futuras bem desfavoráveis com recursos cada vez mais escassos no mundo, há um cenário ambiental crítico. O aquecimento global é uma realidade incontestável e tem como principal causador concentração de gases de efeito estufa como óxidos de enxofre e de nitrogênio, e principalmente o dióxido de carbono na atmosfera. A queima de combustíveis fósseis responde por 95% das emissões desses gases geradas pelo homem (LORA; TEIXEIRA, 2006).

O benefício mais importante que a energia eólica oferece ao meio ambiente está no fato de que ela não polui durante sua operação. Dessa forma, podemos fazer um comparativo entre cada unidade (kWh) de energia elétrica gerada por turbinas eólicas e a mesma energia que seria gerada por uma planta convencional de geração de energia elétrica. Ao fazer essa análise chegamos à conclusão de que a energia eólica apresenta grandes vantagens na redução de emissão de gases de efeito estufa e na redução da concentração de CO<sub>2</sub> durante a sua operação. Com o avanço de programas de eficiência energética, com o propósito de tornar mais eficiente o parque gerador de energia, as emissões de CO<sub>2</sub> e de gases de efeito estufa têm-se reduzido ao longo dos anos, mas ainda permanecem em uma faixa muito alta (DUTRA, 2001).

A Tabela 1 a seguir mostra o nível de emissões de CO<sub>2</sub> das tecnologias de geração elétrica.

**Tabela 1:** Emissão de CO<sub>2</sub> em diferentes tecnologias de geração de energia elétrica.

Tecnologias	Emissões de CO <sub>2</sub> nos estágios de produção de energia (ton/GWh)			
	Extração	Construção	Operação	Total
Queima de carvão	1	1	962	964
Queima de óleo Combustível	-	-	726	726
Queima de gás	-	-	484	484
Energia térmica dos oceanos	Na	4	300	304
Pequenas hidroelétricas	Na	10	Na	10
Reatores Nucleares	~2	1	5	8
Energia eólico	Na	7	Na	7
Fotovoltaico	Na	5	Na	5

**Fonte 6:** Fontes de energia renovável: Conselho de Energia Mundial - editado.

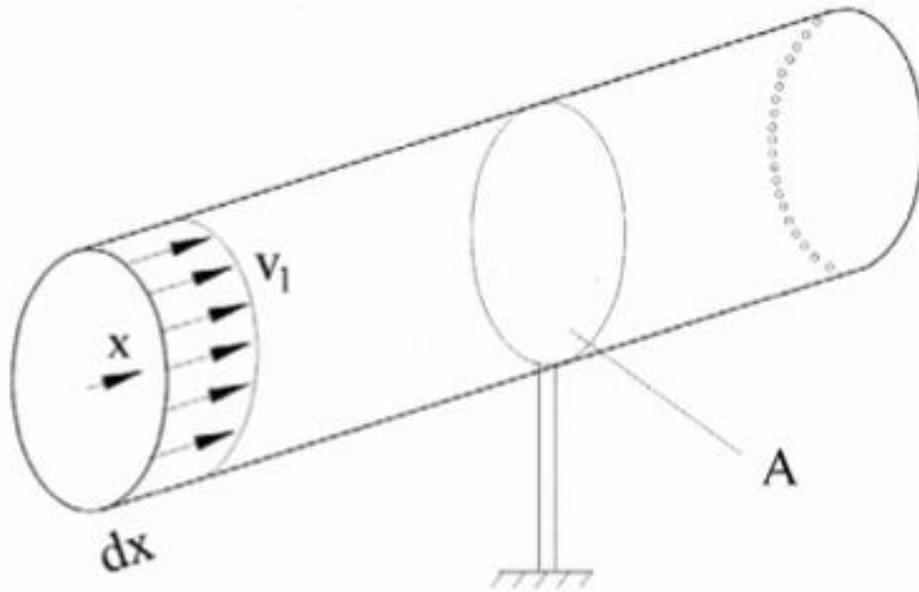
### 4.3. Potência extraída do vento

A energia cinética de uma massa de ar ( $m$ ) em movimento a uma velocidade  $v$  é dada por:

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

Considerando a mesma massa de ar  $m$  em movimento a uma velocidade  $v$ , perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário, conforme figura 6:

**Figura 6:** Fluxo de ar através de uma área transversal A.



**Fonte 7:** GASCH; TWELE, 2002.

Pode-se demonstrar que a potência disponível do vento que passa pela seção A, transversal ao fluxo de ar, é dada por:

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

Onde:

$P$  = potência do vento (W)

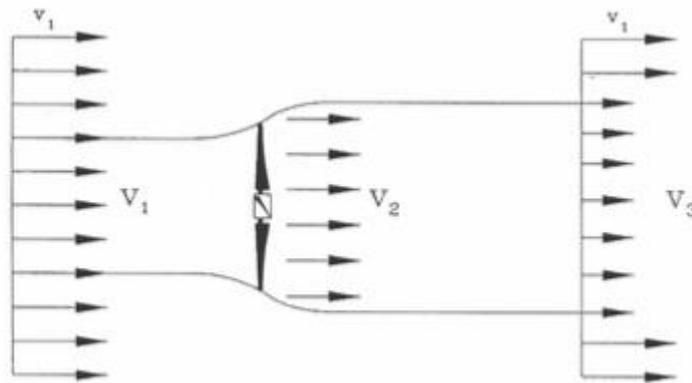
$\rho$  = massa específica do ar (kg/m)

$A$  = área da seção transversal (m<sup>2</sup>)

$v$  = velocidade do vento (m/s)

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. A potência disponível pelo vento não pode ser totalmente aproveitada pela turbina eólica na conversão de energia elétrica. Para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência  $C_p$ , que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor (PAVINATTO, 2005). Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento ( $C_p$  máximo), o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo onde  $v_1$  representa a velocidade do vento na região anterior às pás,  $v_2$  a velocidade do vento no nível das pás e  $v_3$  a velocidade no vento após deixar as pás, conforme apresentado na figura 7 (GASCH; TWELLE, 2002):

**Figura 7:** Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.



**Fonte 8:** (Eex) GASCH; TWELE, 2002.

Assim, a equação de potência máxima extraída pode ser dada por:

$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[ 1 - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

Onde a potência do vento é dada por:

$$\frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

(4)

E o  $C_p$  dada pela equação:

$$\left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[ 1 - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$$

(5)

Como a potência mecânica extraída do vento pela turbina eólica depende de vários fatores em se tratando de estudos Elétricos, o modelo geralmente apresentado nas literaturas é simplificado pelas equações abaixo (PAVINATTO, 2005):

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 c_p(\lambda, \beta) \quad (6)$$

Sendo:

$$\lambda = \left( \frac{R \omega_{wt}}{v_w} \right) \quad (7)$$

Onde:

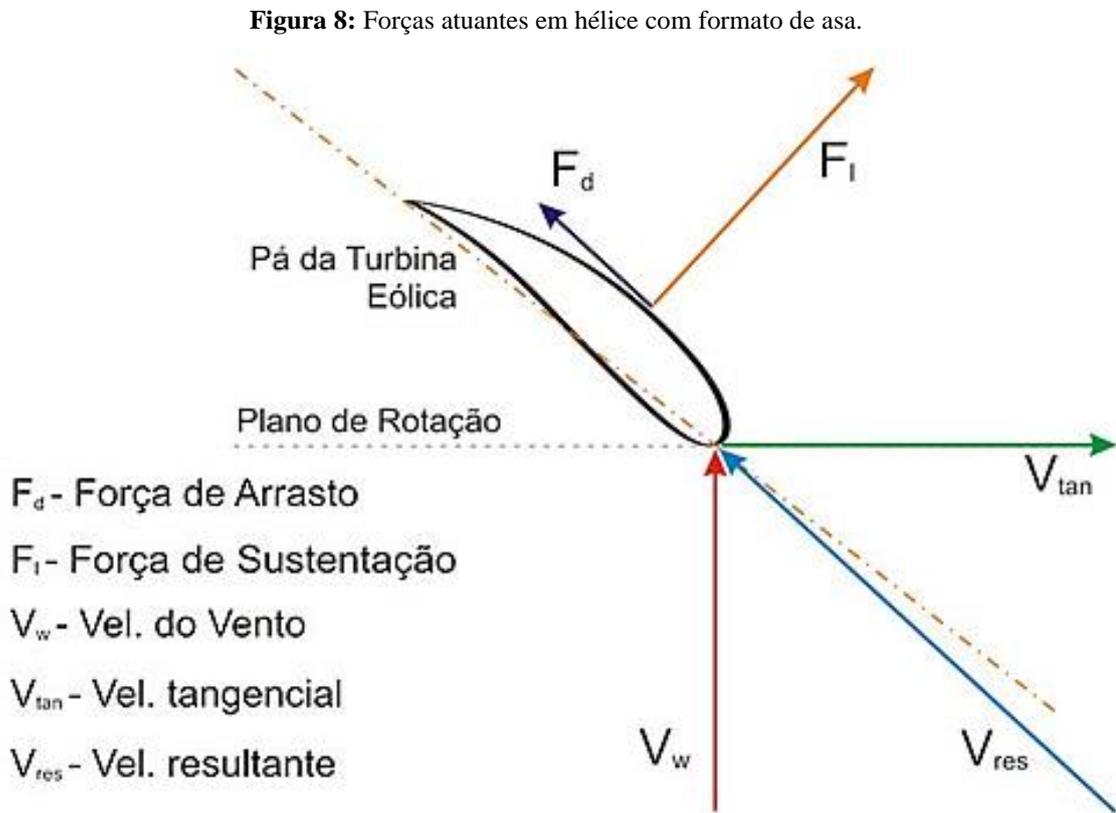
- $c_p$  – coeficiente de potência da turbina eólica;
- $\lambda$  – razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (*tip speed ratio*);
- $\omega_{wt}$  – velocidade angular da turbina eólica (rad/s);
- $R$  – raio da turbina eólica (m);
- $\rho$  – densidade do ar (Kg/m<sup>3</sup>);
- $A$  – área varrida pelo rotor da turbina eólica (m<sup>2</sup>);
- $v_w$  – velocidade do vento incidente na turbina eólica (m/s);

Na equação 6, o coeficiente de potência  $c_p(\lambda, \beta)$  depende das características da turbina eólica, sendo função de razão de velocidades  $\lambda$  e do ângulo de passo das pás da turbina eólica, conhecida como *pitch*, ( $\beta$ ). O  $c_p(\lambda, \beta)$  é expresso como uma característica bidimensional (PAVINATTO, 2005).

#### **4.4. Formato das pás**

As pás das máquinas atuais são dispositivos aerodinâmicos com perfis especialmente desenvolvidos para aumentar o torque no rotor e gerar mais potência elétrica.

Para isso, são utilizados formatos equivalentes às asas dos aviões, e que funcionam pelo princípio físico da sustentação (CRESESB, 2017), Como evidenciado na figura 8:



Fonte 9: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=201](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=201)

A força de sustentação,  $F_1$ , é perpendicular ao fluxo do vento resultante na pá, evidenciando como  $V_{res}$ , que é resultado da subtração vetorial da velocidade do vento incidente,  $V_w$ , com a velocidade tangencial da pá do rotor eólico,  $V_{tan}$ , de acordo com a equação 8:

$$V_{res} = V_w - V_{tan} \quad (8)$$

Onde  $V_{tan}$  é produto da velocidade angular do rotor,  $W_{rotor}$ , pelo raio do rotor, como mostrado na equação 9:

$$V_{tan} = W_{rotor} \times Raio \quad (9)$$

A força de arrasto, que surge, é gerada na mesma direção de  $V_{res}$ . Assim a força de arrasto e a resultante das componentes da força de sustentação e na direção  $V_{tan}$ , produz o torque,  $T_{mec}$ , na turbina eólica, que [FMDA2] pode fazê-la girar mais rápido do que se fosse no formato simétrico (CRESESB, 2017).

#### **4.5. Turbinas eólicas**

Turbinas eólicas extraem potência proveniente da energia cinética dos ventos pela obstrução do movimento do vento, por estarem sujeitas a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento, chamadas forças de sustentação e de forças que atuam na direção do escoamento, denominadas forças de arrasto. Ou seja, são movidas por forças aerodinâmicas de sustentação e forças de arrasto. Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Adicionalmente as forças de sustentação dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque (GASCH; TWELE, 2002).

Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram sob efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento (DUTRA, 2001; GASCH; TWELE, 2002).

##### **4.5.1. Turbinas eólicas de eixo horizontal**

As turbinas eólicas de eixo horizontais de sigla (TEEH), são as mais difundidas no mercado, e sua principal característica é a necessidade de um sistema de controle para posicionar o rotor na direção predominante de vento. São equipamentos apropriados para geração de energia elétrica e, no caso de microturbinas, para carregamento de baterias (SILVA, 2011).

São equipamentos normalmente de grande porte e grande produção energética, como mostra a figura 9 a seguir:

**Figura 9:** Turbina eólica de eixo horizontal.



**Fonte 10:** [ecoficientes.com.br/tag/turbina-eolica/](http://ecoficientes.com.br/tag/turbina-eolica/)

Os rotores de eixo horizontal ao longo do vento são predominantemente movidos por forças de sustentação e necessitam de mecanismos capazes de permitir que área varrida pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Construtivamente, as pás podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada (DUTRA, 2001).

Pode-se destacar também que turbinas de alta potência têm, de modo geral, três pás. Isso se dá porque turbinas com duas pás de grande porte, apesar de mais baratas, produzem rotações tão altas que prejudicam sua estabilidade

dinâmica e têm eficiência mais baixa que turbinas de três pás. Sendo assim, para grande geração de energia a configuração horizontal de três pás a mais difundida (SILVA, 2011).

#### 4.5.2. Turbinas eólicas de eixo vertical

Turbinas eólicas de eixo vertical, a TEEV, é um tipo de gerador de energia em que o eixo do rotor principal é fixado verticalmente ao solo. Os seus componentes são essencialmente os mesmos que os da turbina eólica de eixo horizontal, porém sua configuração interna é mais complexa. Um exemplo de turbina vertical é demonstrada na figura 10:

**Figura 10:** Turbina eólica de eixo vertical.



**Fonte 11:** [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=201](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=201)

O rotor Darrieus H é utilizado domesticamente devido ao seu baixo ruído e também por ter um melhor comportamento em ventos turbulentos e multidirecionais, este comportamento dos ventos é típico de grandes centros urbanos, em relação as de eixo vertical.

Ao se comparar as TEEVs e as turbinas de eixo horizontal temos que elas possuem menor desempenho por possuírem as torres de sustentação baixas, o que diminui o aproveitamento de maiores velocidades do vento. A presença de cargas aerodinâmicas cíclicas aumenta fadiga e reduz a vida útil dos equipamento. Com isso, são mais utilizadas para aplicações de baixa potência, principalmente em locais sem acesso à rede energética. A grande vantagem, em geral, dos rotores de eixo vertical é não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, reduzindo a complexidade do projeto (GASCH; TWELE, 2002).

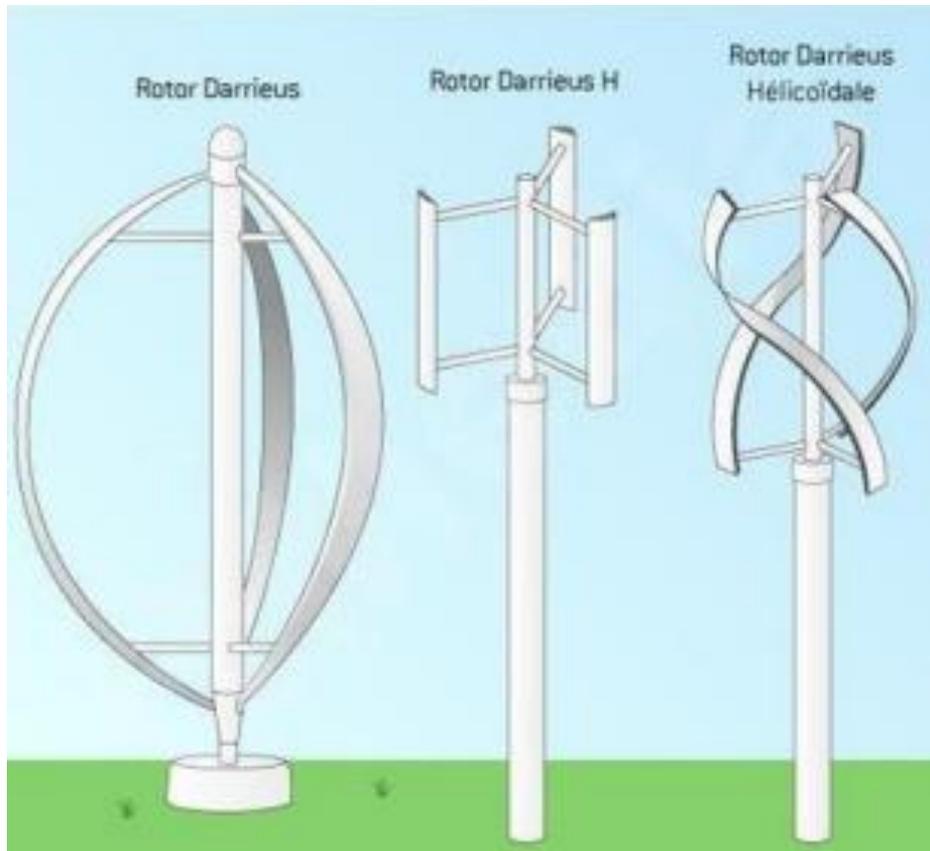
As turbinas eólicas de eixo vertical podem entrar em movimento devido as forças de sustentação e/ou de arrasto. As forças de sustentação são aquelas as quais um corpo está submetido sobre um fluxo de ar, na direção perpendicular. Já as forças de arrasto, atuam em linhas paralelas à direção do fluxo de ar (SILVA, 2011).

#### **4.6. Turbina eólica Darrieus**

A turbina Darrieus é movida principalmente pela força de sustentação, conhecida também como lift. Sua configuração de eixo vertical é a que mais se aproxima da eficiência das turbinas horizontais de três pás, e a mais utilizada para grande geração de energia. Normalmente, constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico, atadas pelas pontas ao eixo vertical (GASCH; TWELE, 2002). Esta ainda pode ser constituída de pás retas (tipo H), helicoidais ou curvas, podendo ter duas ou mais pás dependendo da aplicação e da velocidade de ventos na região.

Algumas de suas configurações podem ser evidenciadas pela figura 11:

**Figura 11:** Turbina Darrieus e suas configurações.



**Fonte 12:** <https://energes.com.br/energia-eolica/historia-da-energia-eolica/>

O perfil aerodinâmico da Darrieus de pás curvas é desenhado de forma semelhante às asas dos aviões, criando sustentação para se movimentarem e gerar energia. A variação da distância dos perfis ao eixo ocasiona um escoamento do tipo não uniforme ao longo das pás, necessitando assim pás com seções variáveis para obter maior eficiência (SILVA, 2011).

A configuração Darrieus de pás retas apresenta alto rendimento energético, devido a área de passagem de escoamento ser maior. Porém, os esforços estruturais são maiores. Seu perfil reto e constante permite uma facilidade na produção e transporte dos equipamentos, tornando assim, mais viável economicamente (SILVA, 2011).

## **4.7. Perdas**

O aerogerador apresenta perdas de eficiência, principalmente pelo deslocamento da camada de ar nas pontas das pás, pelo estol dinâmico e turbulência do ar. Há também perdas no conjunto mecânico que devem ser consideradas e minimizadas no projeto (HOMICZ, 1991).

### **4.7.1. Perdas nas pontas das pás**

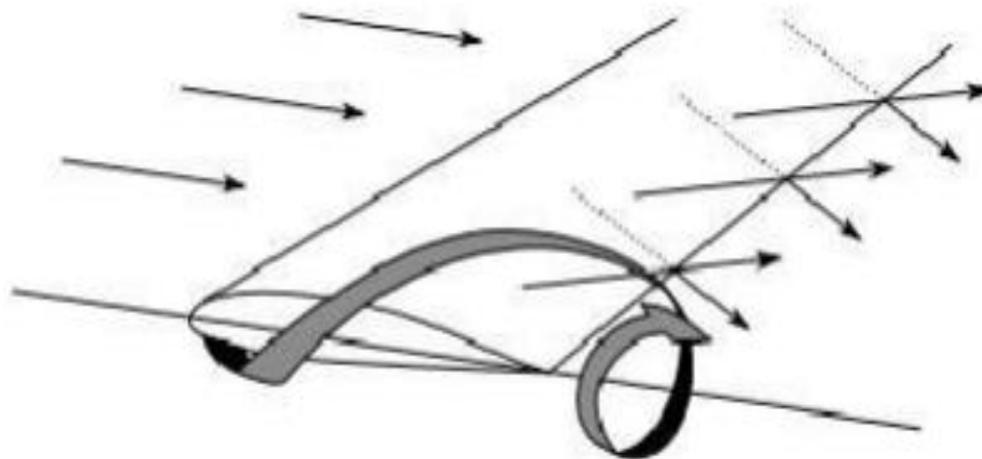
A medida que se afasta do centro da pá do rotor, cresce o valor da velocidade tangencial do ar aumentando na velocidade aparente do vento que incide sobre o rotor, resultando no aumento de vórtices atrás da hélice e no deslocamento do ar nas pontas das pás, fator que diminui a eficiência do giro (HOMICZ, 1991).

Devido ao aparecimento de um diferencial de pressão entre os dois lados do aerofólio surgem, na asa, forças aerodinâmicas. A baixa pressão na superfície superior é chamada de área de sucção e na parte inferior é chamado de área pressurizada. Esta diferença de pressão precisa ser equilibrada na ponta da asa (BRANLARD, 2011).

Este vórtice de ponta é diretamente proporcional ao gradiente de pressão e ao carregamento na asa. Devido a este gradiente, ocorre um movimento radial com o fluxo de ar do lado inferior, com uma componente radial na direção da ponta. Já o lado superior terá um fluxo de ar em outras direções. Gerando perda de eficiência e ruído no movimento (BRANLARD, 2011).

Em virtude desta equalização surge um gradiente de pressão que percorre o comprimento da asa partindo da superfície inferior até a ponta da parte superior, o que produz um vórtice de ventos conhecido como vórtice de ponta (BRANLARD, 2011). Conforme figura 12 abaixo:

**Figura 12:** Perda na porta da asa.

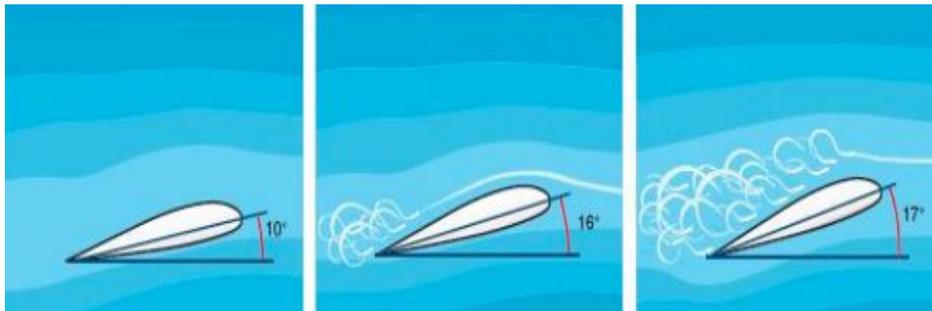


**Fonte 13:** BRANLARD, 2011

#### 4.7.2. Perdas por estol

O fenômeno conhecido como estol surge devido a redução do coeficiente de sustentação gerado pelo deslocamento da camada limite com o aumento do ângulo de ataque da pá, como mostrado na figura 13.

**Figura 13:** Efeito do ângulo de ataque no efeito estol.



**Fonte 14:** BIASI, 2010.

O estol dinâmico, oposto do usual estol estático observado nos túneis de vento apresenta um comportamento histerésico. Ou seja, se a pá muda de posição o fluxo não reage instantaneamente ao movimento, porém vai se adaptando gradualmente com o tempo (GENDRICH, 1997).

O fenômeno de estol ocorre, apenas, a baixas velocidades periféricas, ou seja, quanto o rotor opera em baixas rotações. Já para alta velocidade periférica, este efeito não irá ocorrer (HOMICZ, 1991).

#### 4.7.3. Perdas por turbulência

A turbulência dos ventos é uma agitação da atmosfera que acontece perto do solo e de espessura variável. Ela pode ser caracterizada por trocas repentina na direção e velocidade dos ventos (PORTÉ-AGEL; WU, 2012).

A escassez de velocidade do ar está diretamente associado com a perda de potência nos parques eólicos e a turbulência na turbina é uma das grandes responsáveis por isso, visto que a turbulência afeta o carregamento dinâmico induzido pelo fluxo de ar na pá (PORTÉ-AGEL; WU, 2012).

#### **4.7.4. Perdas mecânicas**

Em um aerogerador, o eixo que gira com o movimento das pás e esse giro deve ser transmitido para o gerador de energia. Para tal, caixas de transmissão são utilizadas, porém há perdas nestes dispositivos.

Em qualquer tipo de transmissão há a perda de potência, causada principalmente pelos atritos entre as superfícies que estão em contato e também, em ocorrência de lubrificação contínua, pela agitação do óleo (MELCONIAN, 2008).

Caixas de redução ou de ampliação da rotação de máquinas não aumentam a potência mecânica que a máquina entrega ao gerador. Porém, reduzem ou amplificam frequências de rotação. Se reduzirem a frequência amplificam o torque e se amplificarem a frequência de rotação, reduzem o torque (MELCONIAN, 2008)

#### **4.8. Modelos matemáticos e método de elementos finitos**

A modelagem aerodinâmica de um gerador eólico Darrieus é uma tarefa complexa, principalmente em ambientes urbanos devido ao fluxo de ventos turbulentos e multidirecionais (BATISTA, 2013).

Apesar da complexidade, vários modelos matemáticos foram desenvolvidos, cada um formulado para sua aplicação e apresentando suas vantagens e desvantagens em relação a outra, que dependem de suas configurações e das condições de escoamento do vento que estão sujeitas.

Existem técnicas de dinâmicas de fluidos computacionais, conhecida como CFD, computação fluido dinâmica, entretanto elas requerem bastante recursos técnicos. De acordo com Islam (2008), os modelos mais estudados e melhor validados podem ser classificados em três categorias, modelo de Vórtice, modelo de Cascada; e modelo de momento do elemento de pá.

O modelo de momento do elemento de pá é o que apresenta melhor correlação entre resultados calculados e experimentais, quando se utiliza baixas velocidades periféricas. Este modelo é baseado no cálculo através da velocidade do fluxo que passa pela turbina e pela equalização da força aerodinâmica na pá no sentido do fluxo com a taxa de mudança do momento do ar. (BATISTA, 2013)

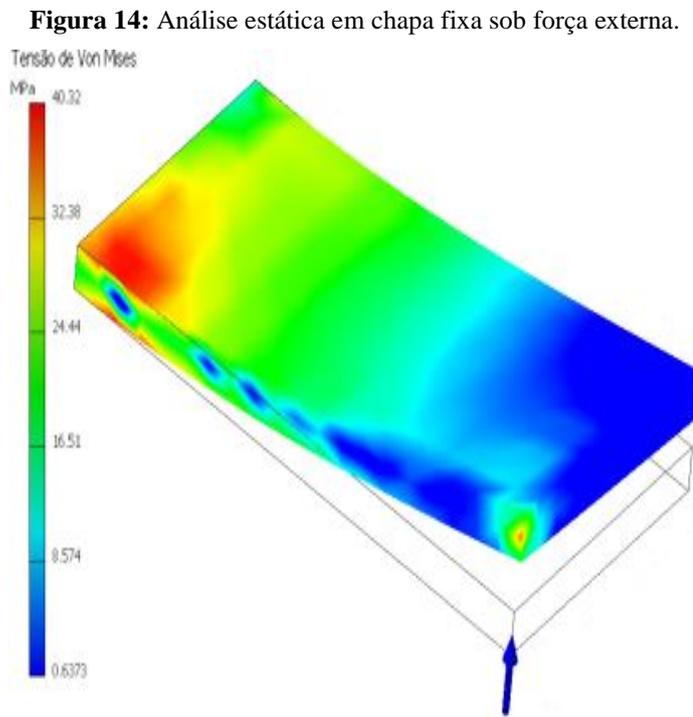
#### 4.8.1. Análise estática

Esta análise verifica as tensões aplicadas ao rotor decorrentes de carregamentos internos constantes, como o próprio peso das estruturas no conjunto. Ainda podem ser analisados, esforços externos aplicados constantemente, como a força do ar incidente nas pás (PEREIRA, 2016).

Nesta análise, verifica-se a magnitude dos esforços internos e externos e dos seus correspondentes deslocamentos internos, sendo assim, é possível que se determine, a partir de critérios de falha, como o Von Mises, a possibilidade de que o rotor venha a torcer ou trincar devido à ação dos carregamentos esperados (LOTTERMANN, 2015).

Assim, se a estrutura, de acordo com os critérios pré-estabelecidos, não apresentar grandes tensões e grandes deslocamentos, significa que o rotor passou por uma análise preliminar da sua integridade e de sua rigidez (PEREIRA, 2016).

A figura 14 demonstra uma análise uma chapa engastada e com uma força externa aplicada. Considerando os dois lados menores do retângulo nesta chapa, um lado é considerado fixo e engastado e uma força aplicada ao lado contrário.

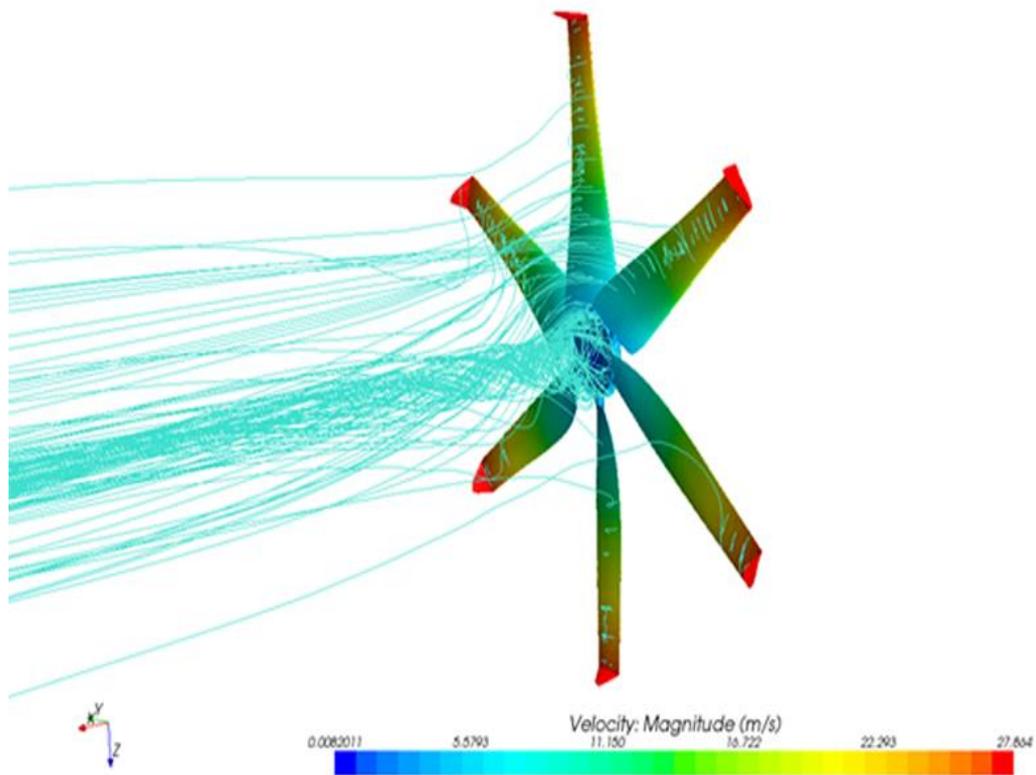


Fonte 15: ANSYS, 2018.

#### 4.8.2. Análise Dinâmica

A análise dinâmica é diferenciada da análise da estática pela constância dos carregamentos. Neste tipo de análise os carregamentos podem variar de magnitude, direção e posição de acordo com o tempo, diferentemente das análises estáticas. Também são considerados, neste tipo de simulação, as forças de amortecimento e inerciais (FURTADO, 2014) como mostrado na figura 15.

**Figura 15:** Análise dinâmica de rotor eólico sob efeito da força do ar.



**Fonte 16:** [eaiconvergiu.wordpress.com](http://eaiconvergiu.wordpress.com)

A simulação demonstra o comportamento de uma turbina em movimento devido à força do vento. Evidenciando as turbulências, perdas e esforços durante este processo.

#### 4.9. Mapa dos ventos

O vento pode ser caracterizado como o movimento de massas de ar proveniente do aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Pode-se inferir então que a energia eólica é proveniente da radiação solar. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos no planeta pode ser realizada a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra podem ser convertida em energia cinética dos ventos. Esse percentual representa centena de vezes à potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo (DUTRA, 2001).

O mapa de ventos de uma região permite a pré-identificação das melhores áreas para projetos de aproveitamento eólico, mas não descarta uma análise mais precisa das condições locais para obtenção de dados com o rigor exigido pelos projetos de aproveitamento eólicos (CEPEL, 2001).

Os métodos de avaliação do local para instalação de aerogeradores devem considerar todos os parâmetros regionais que influenciam as condições do vento. Entre os principais fatores de influência no regime dos ventos destacam-se (DUTRA, 2001):

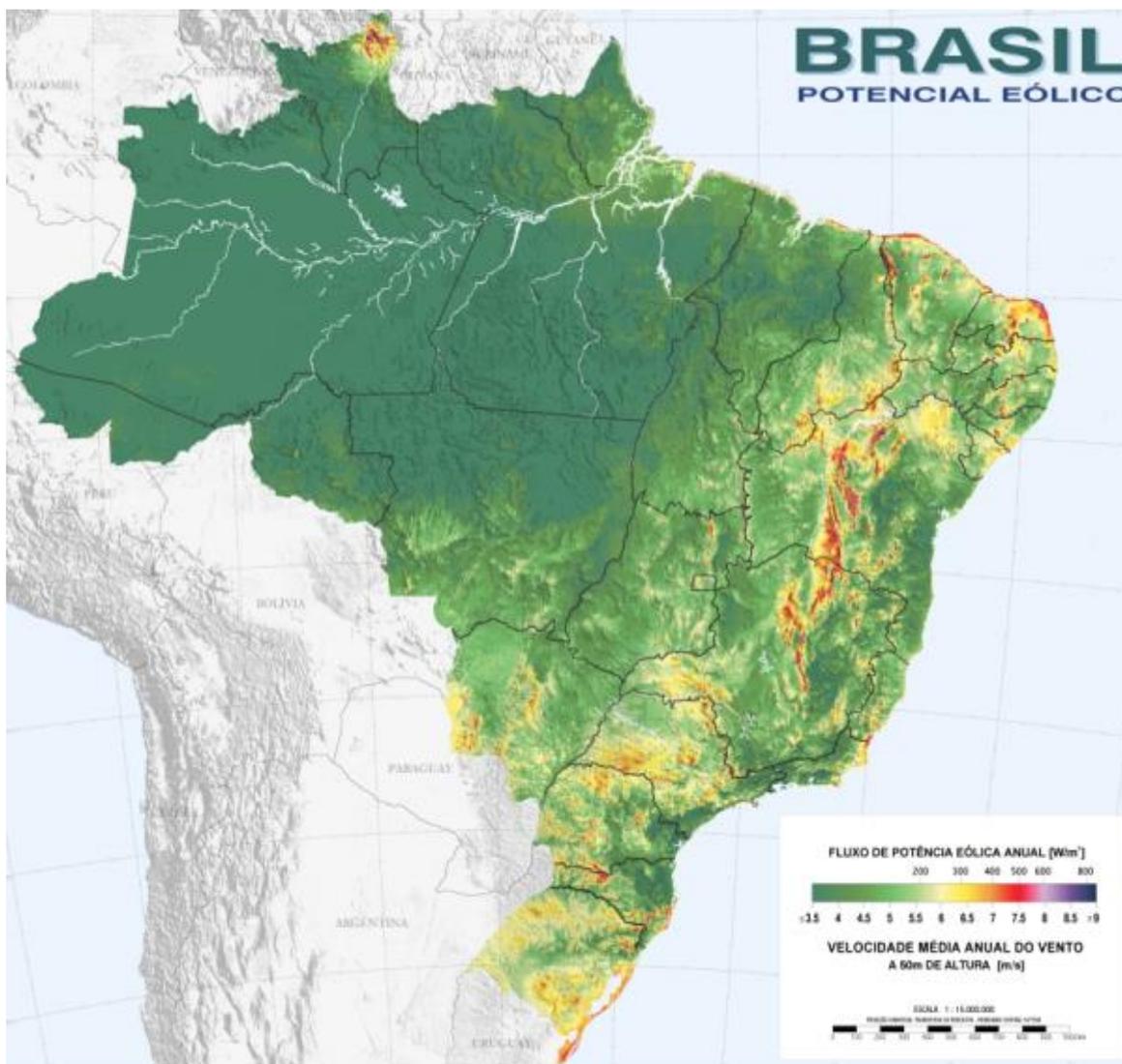
- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno, caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos na área;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.

A partir de mapas topográficos e mapas de ventos pode-se obter informações relevantes para o levantamento do potencial eólico de uma região (DUTRA, 2001).

Para essas considerações de projeto e dados das forças estáticas e dinâmicas que atuam na pá, é necessário um estudo das condições e velocidades dos ventos na região de instalação.

A figura 16, mostra a distribuição dos ventos, por velocidade media(m/s) em todo o território nacional. Para efeito de análise de eficiência das turbinas de acordo com sua localização.

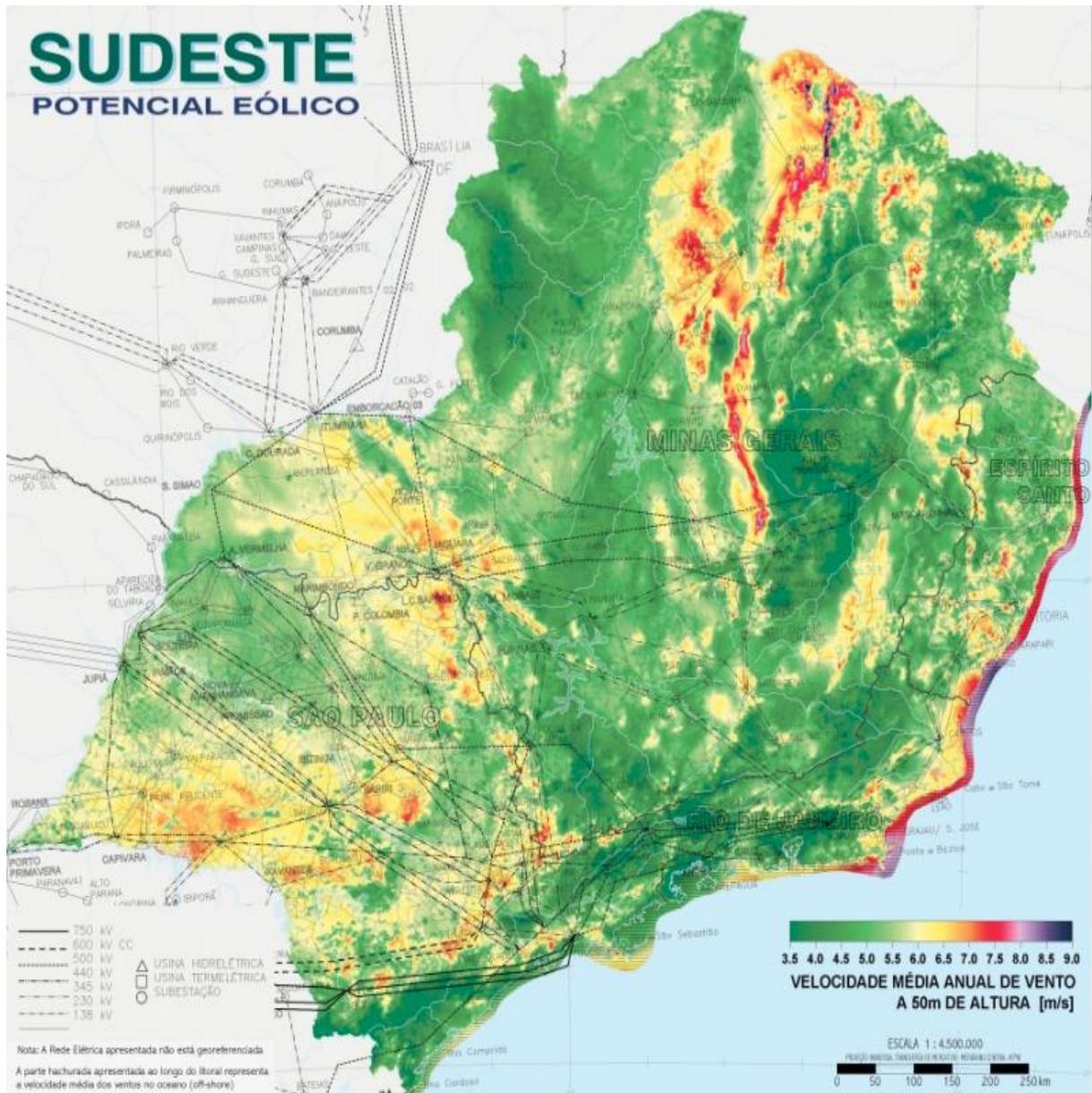
**Figura 16:** Mapa de ventos do Brasil.



**Fonte 17:** [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=261](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=261)

A figura 17, mostra a distribuição dos ventos, por velocidade média na região sudeste:

**Figura 17:** Mapa de ventos no sudeste.



**Fonte 18:** cresesb.cepel.br

A região litorânea apresenta grande potencial para instalação de fazendas eólicas de produção de energia, porém várias localidades no estado de Minas Gerais possuem potencial baixo para geração eólica, devido as regiões montanhosas.

A análise de rotação deve ser considerada a partir das velocidades mínimas de ventos. Já para efeitos de cálculos de rupturas devemos considerar as velocidades mínimas para os ventos em estado de tempestade.

Existem várias classificações para tempestades climática, todas elas levando em consideração a velocidade média dos ventos sustentada por um período de tempo e seus efeitos nas ondas e marés (NOAA.GOV, 2019).

Ventos acima de 16m/s, ou 58km/h, já podem ser considerados potenciais formadores de ciclones tropicais, e ventos acima de 17,5m/s, ou 62km/h, se sustentados por 10 minutos ou mais, é considerado uma tempestade tropical na região (NOAA.GOV). De acordo com a classificação de tempestades tropicais e a classificação de Saffir-Simpson para furacões, ilustrada pelo quadro 1:

**Quadro 1:** Classificação de fenômenos tropicais.

<b>ESCALA DE FENÔMENOS TROPICAIS</b>	
<b>FENÔMENO</b>	<b>VELOCIDADE DOS VENTOS (km/h)</b>
DEPRESSÃO	Até 61
TEMPESTADE	De 62 a 118
FURACÃO CATEGORIA 1	De 119 a 153
FURACÃO CATEGORIA 2	De 154 a 177
FURACÃO CATEGORIA 3	De 178 a 208
FURACÃO CATEGORIA 4	De 209 a 251
FURACÃO CATEGORIA 5	Mais de 252

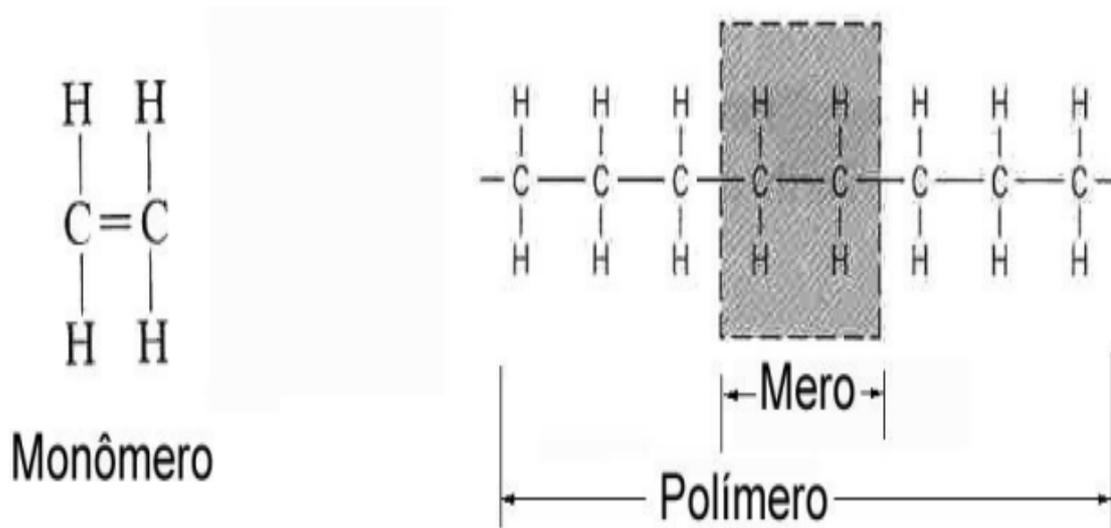
**Fonte 19:** climatempo.com.br Adaptado.

#### **4.10. Polímeros**

Os polímeros são amplamente encontrados na natureza, advindos de plantas e animais, tais como a madeira, borracha e couro. Recursos modernos utilizados em pesquisas científicas possibilitam a identificação das cadeias moleculares destes materiais, bem como a sintetização de novos polímeros a partir de pequenas moléculas orgânicas (CALLISTER, 2002).

As moléculas dos polímeros são constituídas por muitas unidades ou segmentos repetidos, que são chamadas meros, como mostra a figura 18.

**Figura 18:** Cadeias moleculares dos polímeros.



**Fonte 20:** CALLISTER, 2002.

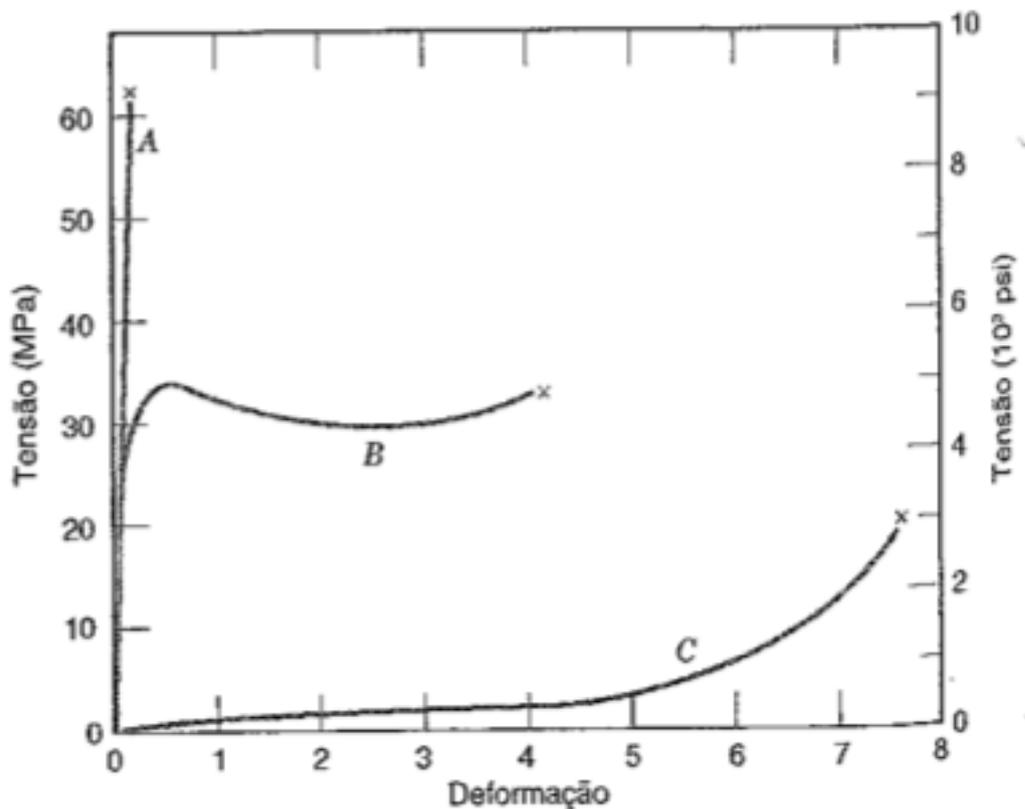
Uma molécula constituída por um único mero é chamada de monômero, porém o polímero é uma macromolécula constituída por vários meros que reagiram por polimerização, que se trata de reações químicas intermoleculares pelas quais os monômeros são ligados, na forma de meros, à estrutura molecular da cadeia (CALLISTER, 2002).

Os polímeros são substâncias que apresentam ligações em cadeia entre átomos de carbono com outros elementos químicos. Estas ligações são predominantemente covalentes. O processo de polimerização pode ser regulado físico-quimicamente de modo a se obter diferentes estruturas de polímeros, de acordo com os tipos de monômeros ligados, o íon  $\text{OH}^-$ , a sua sequência e disposição deles. Essa formação dos polímeros se dá através de reações químicas através de processos com auxílio de calor e pressão. Pode-se utilizar também outros reagentes químicos para controlar como o polímero é formado e assim se obter as propriedades desejadas (Shackelford, 1996).

#### 4.10.1. Propriedades mecânicas dos Polímeros

Os polímeros podem ter propriedades mecânicas especificadas através dos mesmos processos usados para os metais. Em muitos materiais poliméricos é realizado o ensaio de tensão-deformação para a caracterização destes parâmetros mecânicos (CALLISTER, 2002), como mostra a figura 19:

**Figura 19:** Comportamento tensão-deformação de materiais poliméricos frágeis (curva A), plásticos (curva B), elásticos (curva C).



Fonte 21: CALLISTER, 2002.

As propriedades dos polímeros, em sua maioria, são muito sensíveis à taxa de deformação, à temperatura e à natureza química dos ambientes. E muitos materiais precisam de adaptações aos corpos de prova e às técnicas de ensaio (MANCINI, 2017).

Porém, muitos materiais comumente utilizados, possuem propriedades já conhecidas, como mostra a figura 20:

**Figura 20:** Parâmetros mecânicos de alguns polímeros comerciais.

MATERIAL	DENSIDADE RELATIVA	MÓDULO DE TRAÇÃO (GPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (MPa)	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	ALONGAMENTO (%)
Polietileno (baixa densidade)	0,917-0,932	0,17-0,28	8,3-31,4	9,0-14,5	100-650
Polietileno (alta densidade)	0,952-0,965	1,06-1,09	22,1-31,0	26,2-33,1	10-1200
Poliestireno	1,04-1,05	2,38-3,28	35,9-51,7	-	1,2-2,5
Náilon 6,6	1,13-1,15	1,58-3,80	75,9-94,5	44,8-82,8	15-300
Poliéster (PET)	1,29-1,40	2,8-4,1	48,3-72,4	59,3	30-300

Fonte 22: CALLISTER, 2002 Adaptado.

Com base nas propriedades dos polímeros será possível determinar a escolha dos materiais para cada aplicação em um projeto, considerando os esforços e comportamentos esperados sob estes esforços.

Os materiais poliméricos possuem diversos modos de classificações e propriedades mecânicas, elétricas e térmicas. O que o torna uma classe de material com aplicações distintas de acordo com estas propriedades, como mostra a figura 21 (CALLISTER, 2002):

**Figura 21:** Aplicações de alguns polímeros.

TIPO DE MATERIAL	NOMES COMERCIAIS	CARACTERÍSTICAS DAS APLICAÇÕES	APLICAÇÕES TÍPICAS
Poliamidas (náílon)	Nylon, durathan, herox, zytel, ultramid.	Boa resistência mecânica, resistência à abrasão e tenacidade; baixo coeficiente de atrito.	Mancais, engrenagens, cames, buchas, cabos e puxadores, e revestimentos para fios e cabos.
Polietileno	Alathon, Ethron, fortiflex, rigidex, zendel.	Quimicamente resistente, e isolante elétrico; duro e coeficiente de atrito baixo; baixa resistência mecânica e às intempéries.	Garrafas flexíveis, brinquedos, tambores, peças de baterias, materiais para películas de embalagens.
Poliestireno	Carinex, celatron, lustrex, styron, vestyron.	Propriedades elétricas e clareza óticas excelentes; boa estabilidade térmica e dimensional; relativamente barato.	Azulejos, caixas de baterias, brinquedos, painéis de iluminação interna, carcaças de instrumento.

**Fonte 23:** CALLISTER, 2002 Adaptado.

Dentro dessas classificações, podemos destacar os polímeros avançados. Que são materiais desenvolvidos para possuírem propriedades específicas e desejáveis. Um exemplo deste tipo de material é o polietileno de peso molecular ultra-alto, com molecular médio de  $4 \times 10^6$ g/mol. Na forma de fibras este material possui o nome comercial de Spectra e possui as seguintes características (CALLISTER, 2002):

- Resistência ao impacto extremamente elevada;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Excepcional resistência ao desgaste e a abrasão;
- Isolante elétrico e excelente propriedades dielétricas;
- Superfícies autolubrificante e antiaderente.

Essa combinação incomum de propriedades o torna um material com diversas aplicações, incluindo vestimentas à prova de balas, próteses biomédicas e filtros de sangue (CALLISTER, 2002).

O PETG caracteriza-se por ser uma versão modificada do PET, na qual o “G” significa “glicol modificado”, ou seja, foi adicionado glicol à composição do material durante a polimerização. O resultado deste processo é material, menos rígido, e mais fácil de ser conformado do que a sua forma base, o PET. (Wang & Liu, 2013).

Em um aspecto geral, o PETG consiste em um polímero com propriedades mecânicas semelhantes às do PET, tendo como vantagens uma notável tenacidade, flexibilidade, e alta capacidade de processamento (Wang & Liu, 2013).

#### **4.11. Transmissões**

Com o advento dos motores de combustão interna e de vapor para o transporte de pessoas e produtos surgiu a necessidade de se criar meios de variações de velocidades e torque que se adequassem a cada propósito momentâneo, conhecidos como transmissões de velocidade. Aumentando o leque de atividades de um mesmo motor (ALBUQUERQUE, 2003).

##### **4.11.1. Transmissões mecânica**

As transmissões são utilizadas para alterar a velocidade e o torque de saída de um motor e adequá-lo as necessidades do equipamento ou do usuário. Os primeiros variadores de velocidade eram conhecidos como redutores, que tem apenas uma redução fixa. Ou seja, para cada rotação de entrada no redutor, só tem uma rotação de saída (ALBUQUERQUE, 2003).

As transmissões de velocidade podem variar as velocidades de saída, de maneira ajustável. A razão pode variar de acordo com a necessidade do usuário ou equipamento, para cada velocidade de saída almejada, dentro dos limites entre as razões máxima e mínima do projeto da transmissão (ALBUQUERQUE, 2003).

As transmissões, tanto variadores como redutores, são equipamentos de funcionamento mecânico basicamente formada por engrenagens, correntes, correias, polias, ou rodas de atrito (ALBUQUERQUE, 2003).

Existem vários tipos de redutores e transmissores de velocidades. O mais comum é encontrá-los com um sistema de engrenagens, podendo ser cônicas ou cilíndricas. Esse tipo de transmissão é muito utilizado na indústria automobilística. O redutor de engrenagens cilíndricas é muito utilizado na indústria por ter seu custo mais baixo em relação aos outros e com grande capacidade de transmissão e rendimento, chegando a valores acima de 95% e possui uma concepção robusta e grande durabilidade, no entanto, uma das desvantagens deste sistema é que quando há necessidade de grandes reduções, passa a ter tamanho muito elevados tornando-os inaplicáveis (TELMAC,2015).

Contudo, também existem outros modelos, como rosca sem fim e coroa, utilizado em uma larga escala para as mais variadas aplicações de acionamento industriais com reduções entre 1:10 até 1:4000 com grandes capacidades de torque. Essas características permitem excelente performance com enorme abrangência de formas construtivas e diversos conceitos de montagem (TELMAC, 2015).

#### 4.11.2. Transmissão CVT

A transmissão continuamente variada, CVT, simula a utilização uma grande quantidade de relações de marcha por engrenagens, dado que funciona com um sistema de duas polias de tamanhos diferentes interligadas por uma correia que muda sua posição nas polias para gerar relações diferentes de acordo com a velocidade do sistema (ALBUQUERQUE, 2003) Como mostrado na figura 22:

**Figura 22:** Sistema CVT por polias e correia.



**Fonte 24:** <https://www.pakwheels.com/blog/toyota-corolla-new-transmission-cvt>

O sistema de transmissão CVT, devido ao seu modo de operação, gera uma aceleração constante que trabalha na melhor faixa de potência, independente da velocidade. Outra vantagem deste dispositivo é que ele permite o maior controle da faixa de rotação de trabalho do rotor (ALBUQUERQUE, 2003).

Essa transmissão é simples e com poucos componentes, por exemplo, os CVTs de polias expansivas, possui os seguintes elementos (ALBUQUERQUE, 2003):

- Correia ou corrente de alta densidade de potência;
- Polia móvel com deslocamento controlado;
- Polia da movimentação sensível ao torque;
- Mecanismo de incremento de pressão de contato.

O rendimento das polias de acordo com sua tipologia pode ser assim descrita conforme o quadro 2 abaixo:

**Quadro 2:** Rendimento dos diferentes tipos de transmissão.

TIPOS DE TRANSMISSÃO	RENDIMENTO
TRANSMISSÃO POR CORREIAS	
Correias planas	0,96< $\eta$ <0,97
Correias em V	0,97< $\eta$ <0,98
TRANSMISSÃO POR CORRENTE	
Correntes silenciosas	0,96< $\eta$ <0,99
Correntes Renold	0,95< $\eta$ <0,97
TRANSMISSÃO POR CORDAS	
De atrito	0,95< $\eta$ <0,98
TRANSMISSÃO POR ENGRENAGES	
Fundidas	0,92< $\eta$ <0,93
Usinadas	0,96< $\eta$ <0,98

**Fonte 25:** Albuquerque, Alfredo Alves, 2002. Adaptado.

#### 4.12. Gerador de energia elétrica

Os geradores elétricos de indução são empregados em diversos ramos, como uma alternativa de geração de energia elétrica. O baixo custo de manutenção e facilidade de construção são características que promovem seu uso em larga escala (MEDEIROS, 2005).

Estes tipos de projetos de geração de energia são baseados no princípio físico da indução magnética de Faraday, o qual fórmula que a variação de campo magnético em um condutor provoca a circulação de corrente elétrica (SILVEIRA, 2015)

O desenvolvimento das tecnologias associadas ao melhoramento das características dos materiais magnéticos, promovem maior eficiência do gerador. A utilização de materiais com melhores propriedades magnéticas vem sendo utilizadas para este fim.

Com advento de elementos do grupo Terras Raras, em especial o Neodímio, foram produzidas ligas como Neodímio-Ferro-Boro – NdFeB, com excelentes

características magnéticas, demonstrado na figura 23, revolucionando o campo de aplicações dos ímãs permanentes na utilização de geradores elétricos (GOLTZ, 2012).

**Figura 23:** Propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos duros.

MATERIAL	$\beta_R$ (T)	$H_c$ (kA/m)	$\beta H \max$ (kJ/m <sup>3</sup> )
Neodímio Ferro Boro	1,3	1120	320
Samário Cobalto	0,9	696	160
Aço	0,9	4	1,59
Renalloy	1,0	18,4	9
Vicalloy	1,0	36	24

**Fonte 26:** NEUMANN, 2016.Adaptado.

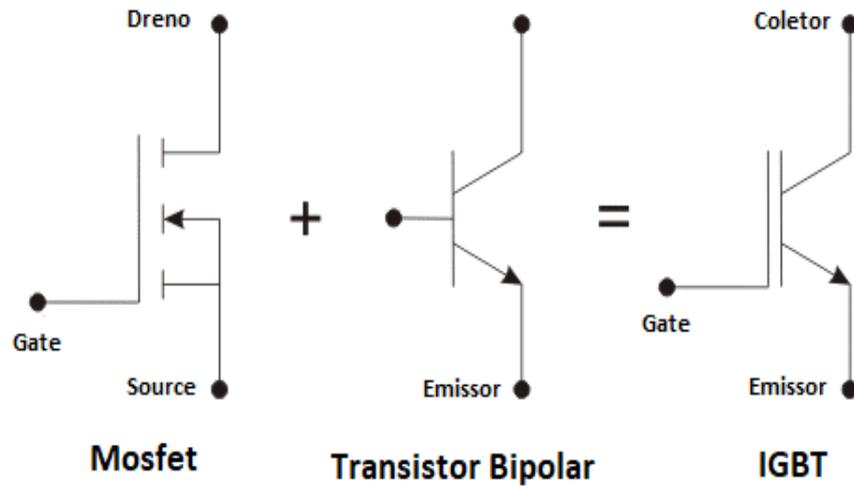
#### 4.13. Conversor

Um outro tipo de máquina é o gerador de indução (GI) com rotor gaiola de esquilo, que pode ser conectado diretamente à rede de alimentação. O gerador de indução trifásico com rotor em gaiola, apesar do baixo custo e manutenção simples, apresenta como desvantagens a falta de possibilidade de regulação de tensão e de frequência, bem como a operação apenas em velocidade fixada pela frequência da rede. Para possibilitar o controle de potências do GI, são usados conversores (CA[FMDA3]-CA). Estes conversores são compostos, geralmente, por duas pontes trifásicas de dois níveis, controladas por chaves semicondutoras de potência do tipo IGBT que compartilham o mesmo elo de corrente contínua

O IGBT, do inglês, *Insulated Gate Bipolar Transistor* ou, em português Transistor Bipolar de Porta Isolada, é um semicondutor de potência que alia as características de chaveamento dos transistores bipolares com a alta impedância dos MOSFETs, transístores de efeito de campo, apresentando baixa tensão de saturação e alta capacidade de corrente. Esse sistema possui alta eficiência e rápido chaveamento (CARDOSO FILHO, 2014).

Seus esquemas são mostrados na figura 24:

**Figura 24:** Diagramas elétricos dos componentes dos conversores.



**Fonte 27:** <https://www.embarcados.com.br/escolha-de-mosfet-nos-projetos-de-fonte/>

Este conversor também é conhecido com a denominação *back to back*. O emprego deste conversor possibilita a operação do gerador em velocidade variável (FILHO, CARDOSO, 2014).

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para se analisar a eficiência, quanto a conversão de energia cinética em mecânica, das turbinas proposta, foi realizado uma simulação CFD considerando a modelagem matemática, as condições de contorno e computacionais adequadas a fim de gerar resultados coerentes e mais confiáveis.

Para a validação do projeto estrutural em material polimérico, bem como o levantamento de dados sobre os esforços em que os rotores estão sujeitos, foi realizado uma análise estática.

Com os resultados obtidos computacionalmente, foram calculados a potência entregue por cada gerador, em funcionamento com os sistemas de transmissão mecânica, gerador e conversor de energia elétrica para análise de aplicabilidade.

~~[—Aqui deve-se iniciar o que será feito e como, depois vem o modelo matemático](#)~~

### 5.1. Modelo Matemático

A consideração matemática se baseia na descrição do modelo do escoamento de fluido, viscoso e incompressível, por meio de equações de conservação de massa, de energia, da quantidade de movimento linear e também de turbulência. Para descrever a turbulência do escoamento do ar, foi utilizado as equações de conservação de Reynolds Average Navier-Stokes, RANS, ~~[Existe alguma explicação para o uso deste modelo?](#)~~ (Lauder & Shima, 2015).

#### 5.1.1. Conservação de massa

Na equação de conservação de massa, considerando o regime transiente é expressa da seguinte forma:

$$\left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (10)$$

Onde, a derivada de  $p$  é a massa específica do fluido,  $x_i$  a coordenada espacial,  $U_j$  é a velocidade média do componente  $j$  e  $t$  é o tempo (LAUDER et al, 1975).

### 5.1.2. Conservação de quantidade de movimento linear

Para fluidos de escoamento incompressível, a equação da conservação da quantidade de movimento é dada da seguinte forma:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{ef} \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \right) + \rho g_i \quad (11)$$

Onde a viscosidade efetiva é dada pela equação 12:

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t(\mathbf{x}, t) \quad (12)$$

Sendo  $\mu$  a viscosidade dinâmica e  $\mu_t$  a viscosidade turbulenta.

Na equação 13 temos que o variável  $P$  é a pressão modificada e pode ser expressa da seguinte forma:

$$P = p + \frac{2}{3} \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) + \frac{2}{3} \rho \kappa \quad (13)$$

onde  $\kappa$  é energia cinética.

Na equação 2 temos que o termo  $\delta_{ij}$ , que representa o delta Kronecker, utilizado para identificar o conjunto ortonormal. [O que é o delta de Kronecker?](#)

## 5.2. Modelo de turbulência de Reynolds-RSM

Segundo Alho e Ilha (2006), o modelo para o ~~complemento~~ das equações RANS para o regime turbulento podem ser obtidas através das equações de Navier-Stokes e equações de médias de Reynolds, como evidenciado na equação 14, ~~esta equação pode ser descrita da seguinte forma:~~

$$\frac{\overline{\partial u_i' u_j'}}{\partial t} + \overline{u_\ell} \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_\ell} = D_{ij} + P_{ij} + \Phi_{ij} - \epsilon_{ij}$$

(14)

Onde  $D_{ij}$  é o termo de transporte difusivo,  $P_{ij}$  é o termo de produção de tensão,  $\Phi_{ij}$  o termo de pressão e  $\epsilon_{ij}$  o termo de dissipação viscosa.

## 5.3. Modelo físico

O modelo físico, após amplo estudo, foi definido pela análise estática para dimensionamento dos esforços e solicitações do equipamento. Assim, pode-se definir os materiais utilizados.

Bem como, por análises conceituais através da interpretação das simulações dinâmicas e comportamento durante operação simulada. Ambas por método de elementos finitos.

### 5.3.1. Análise estática

Neste estudo, foi aplicada uma carga no valor de 500N (50,98kgf), considerado como a foça do vento perpendicularmente ao plano axial do eixo na altura máxima, onde a solicitação sofrerá maior momento.

A base é engastada, considerando que será fixada ao chão.

Para o cálculo de força do vento foi considerado a equação 15:

$$F_v = P * (V^2 / 2) * A * C_d \quad (15)$$

Onde  $F_v$  é a força do vento em Newtons;

$P$  é a densidade do ar, neste caso  $1,23\text{kg/m}^3$ ;

$V$  é a velocidade do vento em  $\text{m/s}$ ;

$A$  é a área do eixo;

$C_d$  representa o coeficiente de arrasto.

A velocidade do vento foi considerada de  $130\text{km/h}$  ( $468\text{m/s}$ ) de forma a resistir a ventos maiores que uma tempestade tropical. O eixo possui  $2$  polegadas ( $0,0254\text{m}$ ) de diâmetro por ser um diâmetro comercial e dentro da resistência exigida.

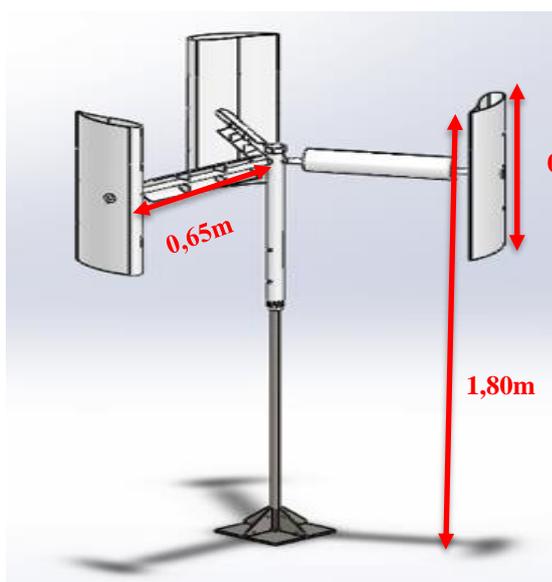
A simulação estática foi feita primeiramente considerando o eixo em alumínio 3004, para levantamento de propriedades dada pela tensão e deformação máxima geradas. E assim, se dimensionar as propriedades do material a ser escolhido, no caso do eixo foi o aço SAE1035 e O PETG para as demais construções das torres.

### 5.3.2. Dimensionamento físico

~~A fim de simular as condições atmosféricas sobre o gerador, foi desenvolvida proposta uma atmosfera controlada enclausurando a torre para possibilitar as condições de contorno. Como assim? Você quer dizer que as condições de contorno são satisfeitas nesta condição?~~

O modelo físico das pás em análise é derivado do modelo de eixo vertical de Darrieus. A torre 1 é composta por um eixo de 1,80m de altura de aço SAE 1035. O rotor possui diâmetro de 1,30m, fixados com rolamento de esferas de alto rendimento e três pás de perfil NACA0021 de 0,70m de comprimento com aparadores de vento arredondados nas hastes de fixação, todos em PETG conforme figura 25.

**Figura 25:** Torre 1 de modelo Darrieus.

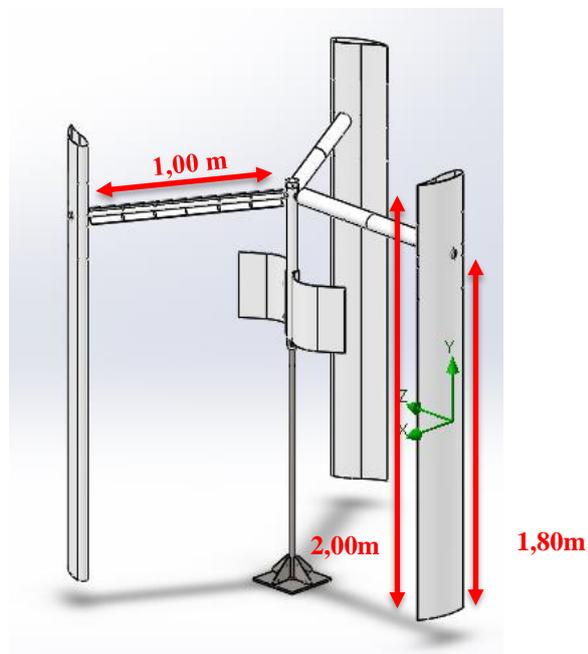


**Fonte 28:** Autor.

A Torre 2 possui mesma medida de altura do eixo e diâmetro de rotor, porém com pás de 2,00m de comprimento e 2,00m de diâmetro além de duas pás côncavas no centro do eixo, defasadas 180°, com intuito de auxiliar no torque de partida.

Além disso, os aparadores de vento fixados na haste de fixação das asas têm formato mais aerodinâmico e sem enclausuramento com o rotor Savonius, para reduzir a força de arrasto contrária ao movimento de rotação positivo, esse menor arrasto melhora a eficiência durante o movimento, conforme figura 26.

**Figura 26:** Torre 2 com pás no centro do eixo e asas com maior comprimento.

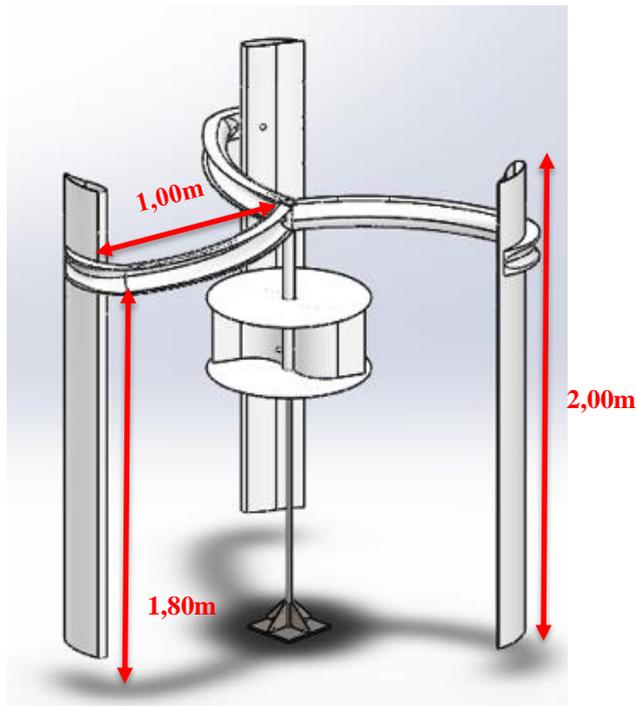


**Fonte 29:** Autor.

A Torre 3 difere da Torre 2 pelo formato otimizado aerodinamicamente das hastes de sustentação das asas e pela presença de discos fixado nas pás de auxílio ao torque de partida centrais que possui configuração Savonius conforme figura 27.

÷

**Figura 27:** Torre 3, modelo similar ao Darrieus-Savonius.

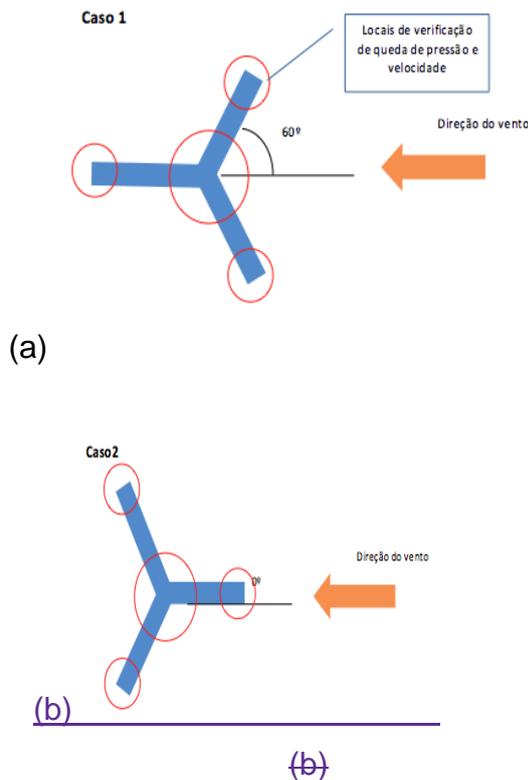


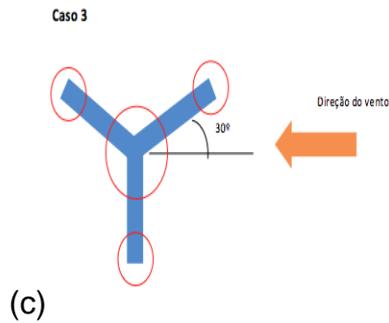
**Fonte 30:** Autor.

## 5.4. Condições ambiente

Nas simulações realizadas para cada modelo, foi considerado um vento com velocidade média de 5,0m/s, umidade 62% e temperatura de 22°C conforme média apontada pelo atlas eólico para a região de Belo Horizonte - MG (CEMIG, 2010). As variações de direção aplicadas aos rotores foi de 0, 30 e 60 graus em relação ao eixo de sustentação da pá para se analisar a velocidade e pressão em diversas posições e nos principais pontos do rotor, conforme figura 28:

**Figura 28:** (a) Ângulo de 60° em relação ao eixo de sustentação da pá. (b) Ângulo de 0° em relação ao eixo de sustentação da pá. (c) Ângulo de 30° em relação ao eixo de sustentação da pá.





Fonte 31: Autor.

## 5.5. Condições de contorno

Com o intuito de parametrização dos resultados encontrados, os dados de entrada e considerações no *software* foram os mesmos para os três (3) tipos de torres e são:

1 - Foi considerado o escoamento uniforme isotérmico e incompressível do ar atmosférico e a 5m/s.

2 - A entrada é na face geradora de escoamento e a saída foi considerado como condição de abertura. Já os contornos superficiais, laterais e -base -foi definido o escoamento com deslizamento livre e viscosidade infinita.

3 - As peças que formam o gerador foram consideradas sólidas e impermeáveis de parede lisa, com condição de não deslizamento.

4 - A análise foi realizada no software SolidWorks pelo método RANS para equações de conservação de massa e quantidade de movimento. O método RSM para a resolução de turbulência.

## 5.6. Malha computacional

Para garantir que os resultados obtidos com as malhas geradas forneçam informações confiáveis de formato tetraédrico com 9512 elementos, pois segundo Biswas e Strawn (1998) ela reproduz de forma mais precisa corpos mais complexos. E para a malha de refino foi utilizada em formato piramidal para se obter elementos com tamanho mais próximos.

Para a resolução da simulação foram considerados os seguintes parâmetros:

Tipo automático (TA): o formato dos elementos e o refino da malha é feito automaticamente pelo programa;

Tamanho inicial do elemento (TIE): é tamanho do maior elemento da malha. O computador utiliza esse valor como parâmetro para calcular os demais tamanhos de elementos;

Tamanho mínimo de espaçamento (TME): é o tamanho mínimo de espaço que o computador considera como elementos em contato como se fosse uma estrutura fixada;

Taxa de redução de elemento (TRE): é o fator de variação do tamanho do elemento.

A malha é predominantemente grosseira no sistema como um todo e mais refinada em torno das pás. Essa malha refinada gera camadas de elementos prismáticos, os quais melhoram os resultados de escoamento no local.

Valores para os modelos conforme quadro 1:

**Quadro 1** – Parâmetros de simulação

TA	Automático
TIE	3,0
TME	0,5
TER	4,0

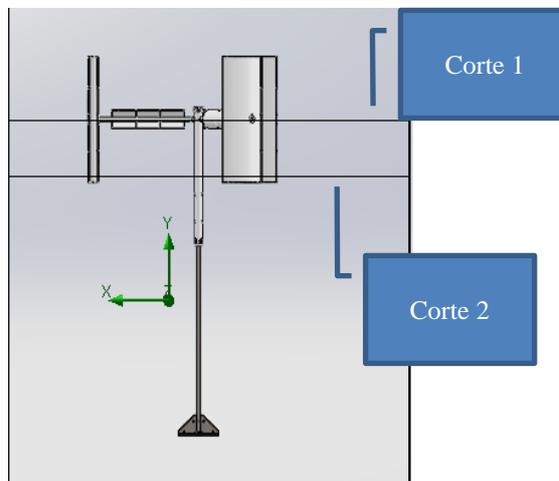
**Fonte:** Autor

## 5.7. Apresentação de resultados

Para melhor visualização dos resultados foram considerados 2 cortes paralelos em cada turbina, [para melhor visualizar o efeito do eixo de sustentação da asa e dos rotores centrais](#), conforme figuras 29, 30 e 31:

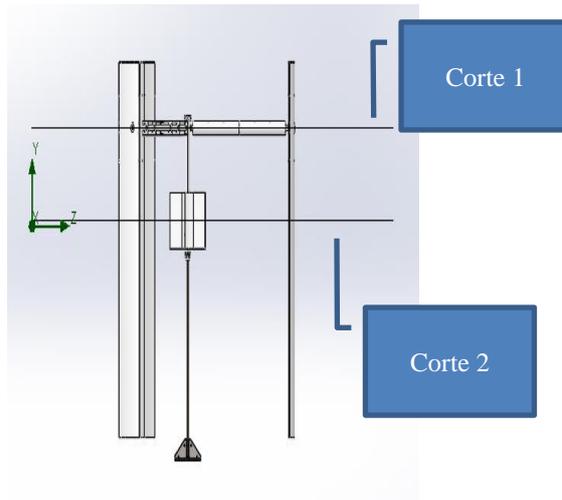
‡  
[Por quê?](#)

**Figura 29** - Cortes na turbina 1.



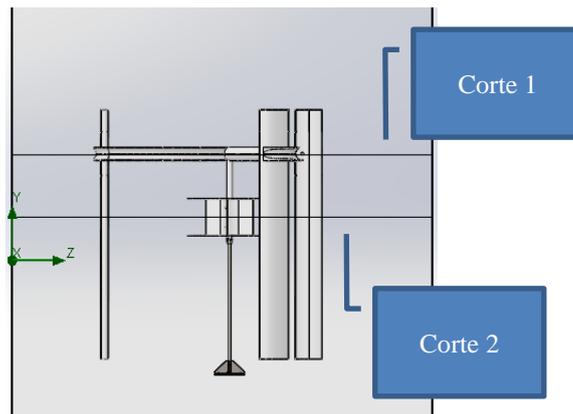
**Fonte 32:** Autor

**Figura 30:** Cortes na Turbina 2.



**Fonte 33:** Autor.

**Figura 31:** Cortes na Turbina 3.



**Fonte 34:** Autor.

## 5.8. Cálculo de potência médio fornecida

Através do software Solidworks®, será calculado a potência média gerada pelo aerogerador. Para este cálculo será considerado a energia cinética total do ar com velocidade média de 5m/s para o cálculo de eficiência do sistema em cada modelo de torre.

Após serem comparadas as eficiências de cada rotor será calculado a sua potência conforme a equação:

$$P_m = \frac{1}{2} \eta \cdot \rho \cdot C_P \cdot A \cdot V_M^3 \quad (16)$$

Onde:

$\eta$  é a eficiência do gerador;

$\rho$  a massa específica do ar;

$C_p$  é o limite de Betz;

$A$  é a área correspondente ao ar turbinado pelas pás;

$V_m$  é a velocidade do ar em metros por segundo.

Essa potência do gerador sofre perdas assim, a potência útil disponível para este tipo de turbina pode ser calculada pela fórmula abaixo, que leva em consideração o rendimento do gerador, o rendimento do multiplicador de velocidades e o rendimento do inversor de tensão.

$$P_{\text{útil}} = P_{\text{ot}} * \eta_g * \eta_{mv} * \eta_{it} \quad (17)$$

Foi considerado um gerador, inversor e um multiplicador de velocidades do tipo CVT com os seguintes coeficientes:

Quadro 3: Coeficientes de rendimentos do sistema.

Descrição	(%)
Rendimento do Gerador ( $\eta_g$ )	98
Rendimento do multiplicador de velocidades ( $\eta_{mv}$ )	98
Rendimento do inversor de tensão ( $\eta_{it}$ )	94

Fonte 35: Autor.

Através da potência útil o gerador poderá ser avaliado conforme sua viabilidade econômica.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram dispostos em 3 etapas: teste do material em análise estática, teste do projeto em análise dinâmica e potência obtida.

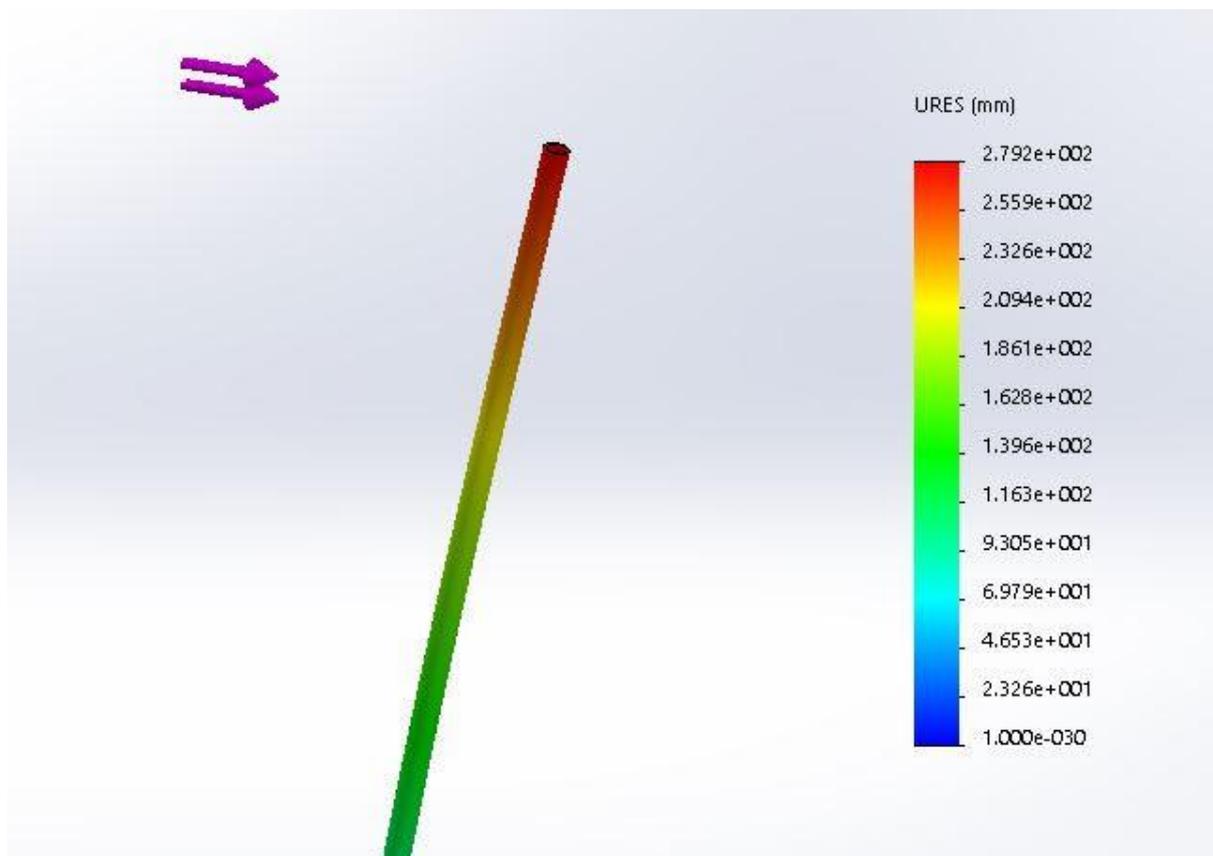
### 6.1. Análises estáticas

Através de ensaios empíricos preliminares foi observado a necessidade de um material mais robusto no eixo do rotor e solicitações baixas nos outros componentes.

Assim, com a definição do eixo em aço SAE1035, foi realizado 2 testes, de tensão e deformação na viga, para se definir melhor a deformação máxima e limite de escoamento, conforme figura 32:

Teste estático com 500N de força no pico do eixo.

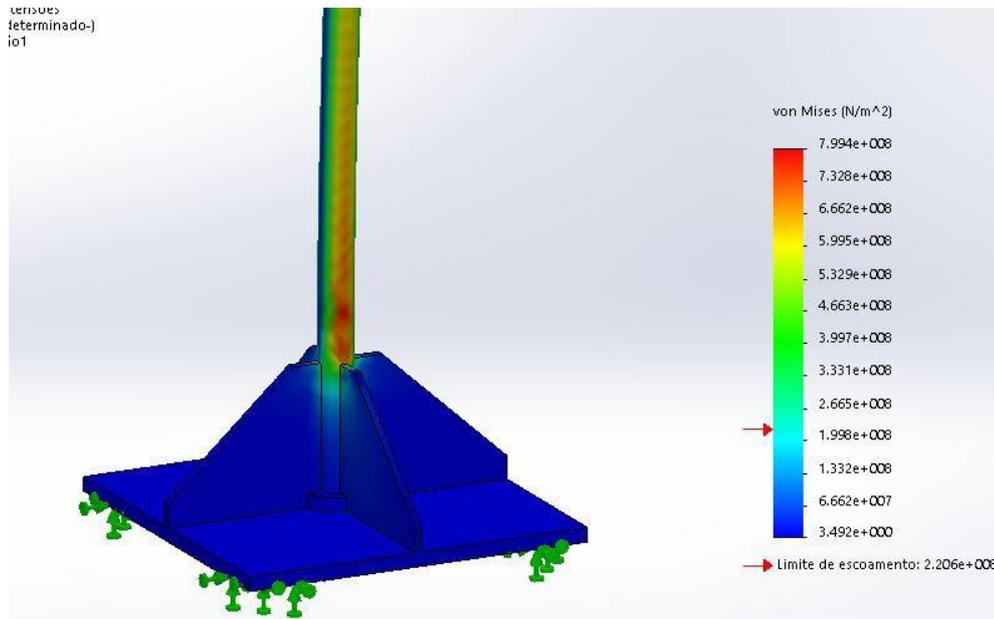
**Figura 32:** Análise de deformação no pico do eixo.



Fonte 36: Autor.

Para a análise da base, foi considerada a mesma força, e a base como engastada no chão. Evidenciando o limite de escoamento em  $2,206 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , conforme figura 33:

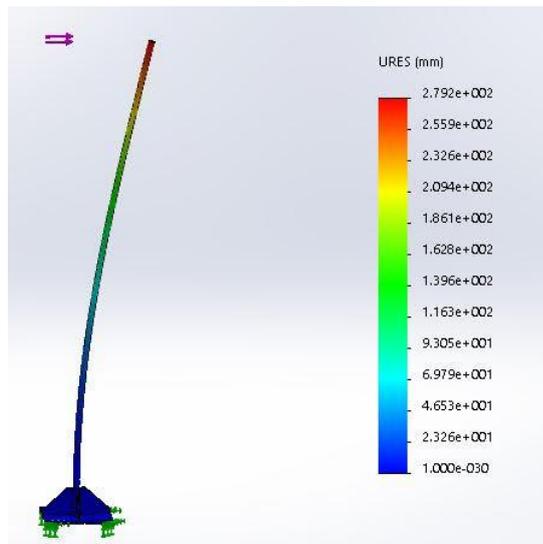
**Figura 33:** Comportamento da base sobre a solicitação máxima.



**Fonte 37:** Autor.

A análise estática também nos mostra a deformação que o eixo está sujeito, assim pode se definir a rigidez necessária para tal esforço, indicando um material que se adequa mesmo à condição de máximo esforço sem falha catastrófica, conforme figura 34:

**Figura 34:** Deformação do eixo em milímetros.



**Fonte 38:** Autor.

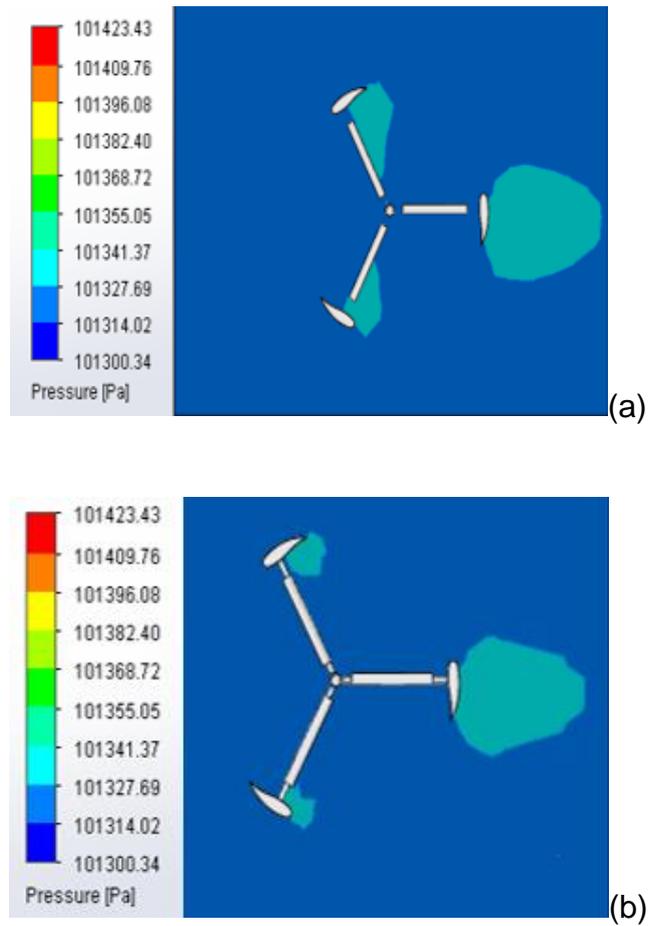
## 6.2. Análises dinâmicas

Os resultados foram dispostos com o corte 1 e 2, para de pressão e velocidade. Sendo também considerados os três ângulos de estudo, 0°, 30° e 60° respectivamente para cada turbina. Assim, pôde-se analisar o comportamento da turbina em várias fases da operação.

### 6.2.1. Turbina 1

Para o ângulo de 0° em relação ao eixo, foi observado uma grande queda de pressão na primeira pá devido ao choque do ar com a superfície da pá, evidenciando uma perda para o movimento, porém atrás dos eixos de sustentação das outras pás essa queda favorece ao movimento. Conforme observado na figura 35:

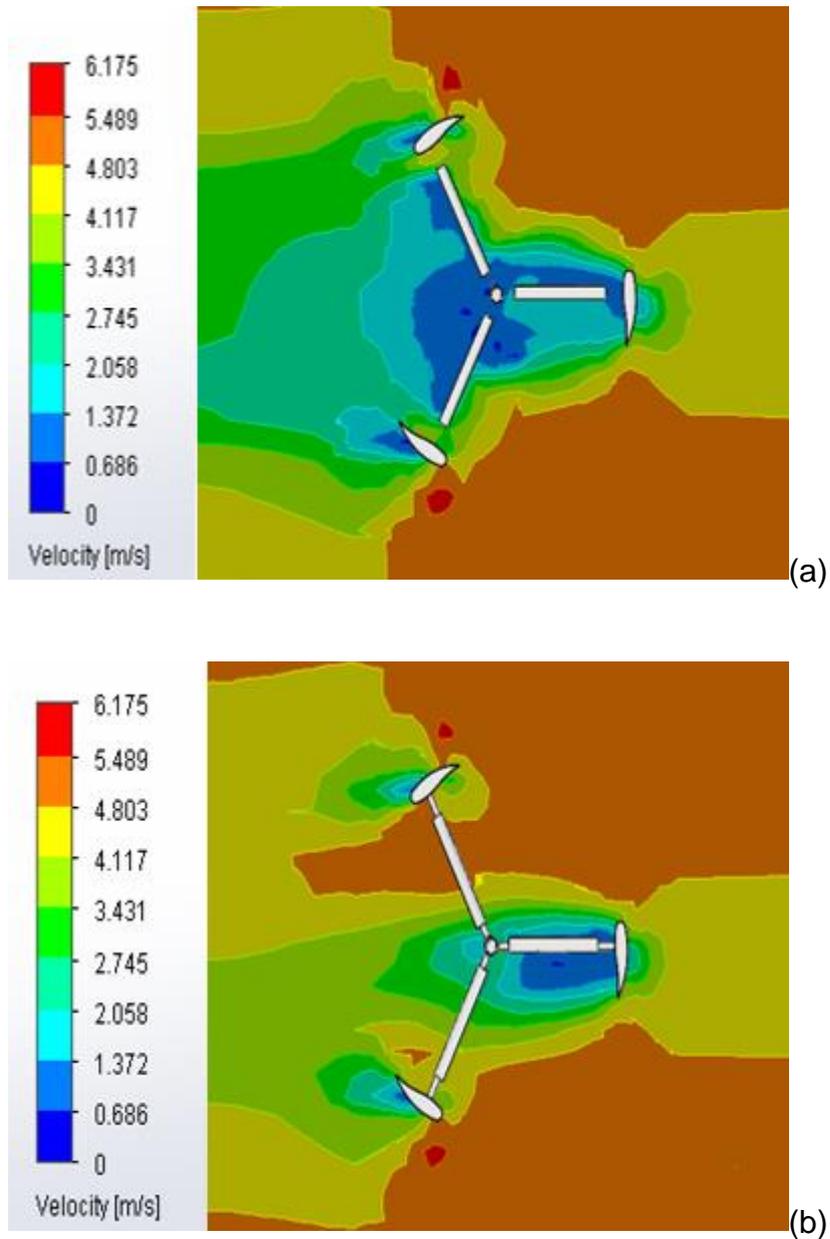
**Figura 35:** Efeito da pressão para o ângulo de  $0^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 39:** Autor.

Para velocidade é evidenciada a perda de velocidade no corte 1 dos eixos, justificando o formato côncavo que transforma grande parte da energia cinética em mecânica, conforme figura 36:

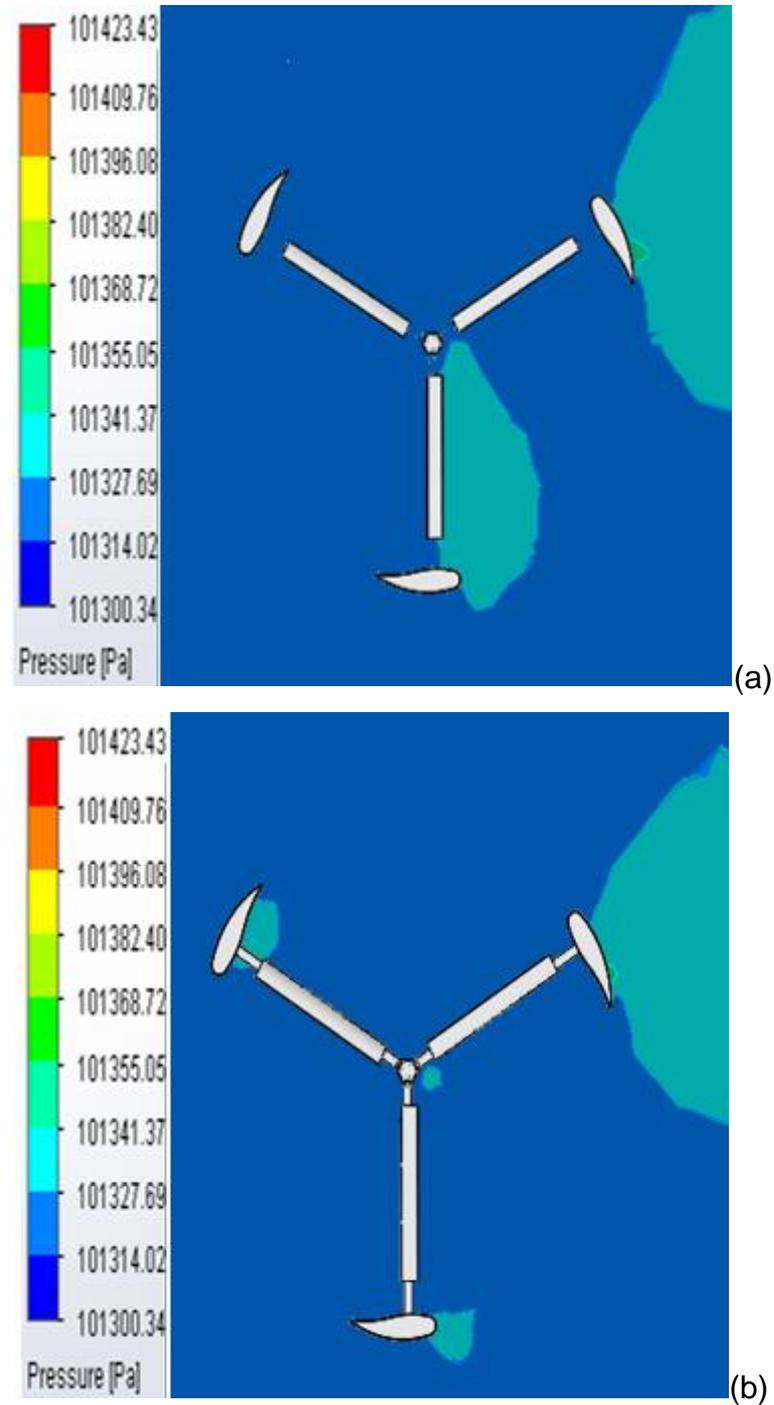
**Figura 36:** Efeito da velocidade(m/s) para o ângulo de  $0^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá.(a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 40:** Autor.

Para o ângulo de  $30^\circ$  em relação ao eixo, foi observada grande queda de pressão nas áreas de impacto do ar devido a turbulência e na parte anterior da pá favorecendo a sustentação do aerofólio e favorecendo o movimento, conforme figura 37:

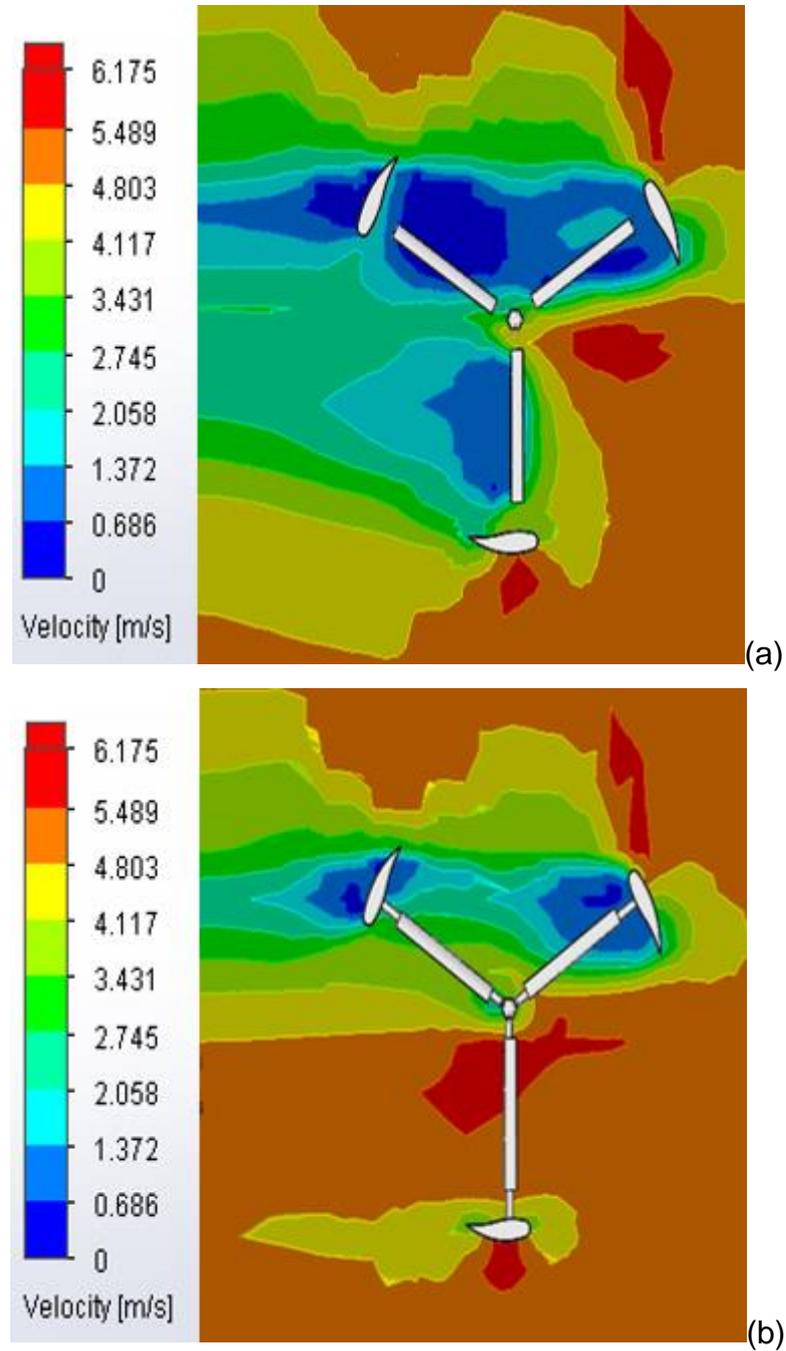
**Figura 37:** Efeito da pressão para o ângulo de 30° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 41:** Autor.

Para velocidade é evidenciada também a perda de velocidade no corte do eixo devido ao formato côncavo nos mesmos que auxilia o movimento. E nas pás quando há aumento de velocidade na parte posterior e queda na parte anterior tende a favorecer o movimento, conforme a figura 38:

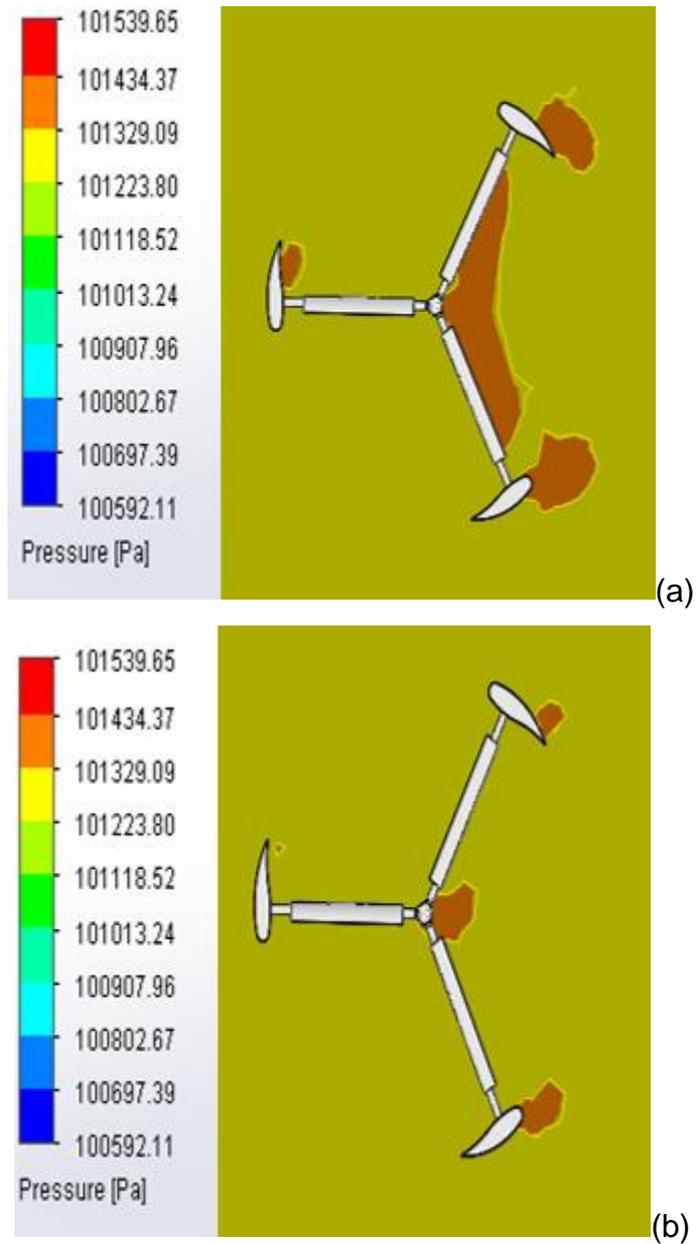
**Figura 38:** Efeito da velocidade para o ângulo de  $30^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 42:** Autor.

Para o ângulo de  $60^\circ$  em relação ao eixo, foi observada grande queda de pressão nas áreas de impacto do ar devido a turbulência, conforme figura 39:

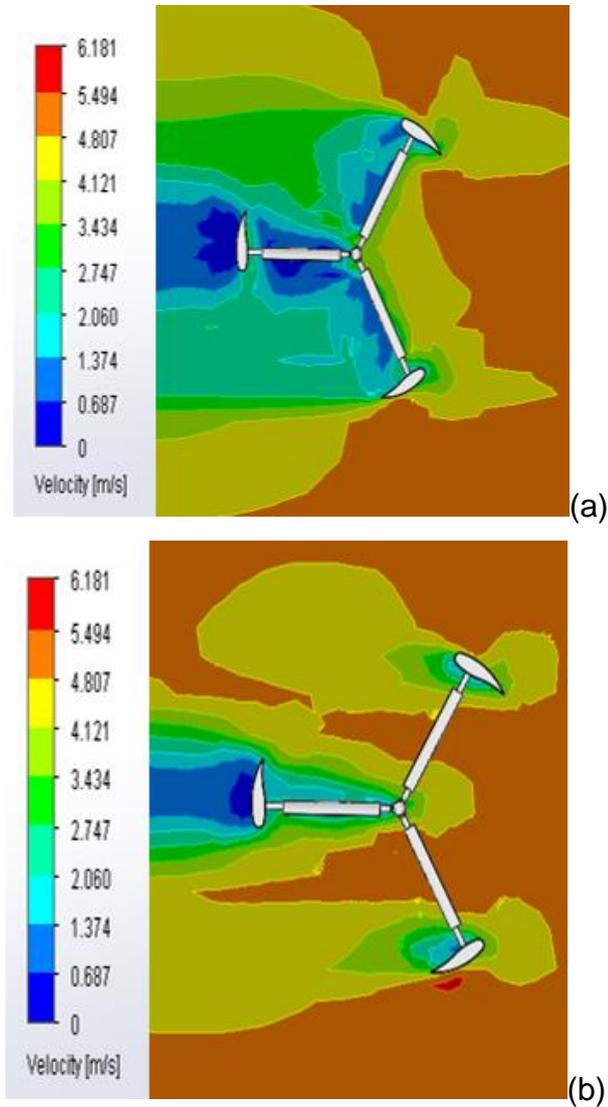
**Figura 39:** Efeito da pressão para o ângulo de  $60^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 43:** Autor.

Para a segunda análise é evidenciado a perda de velocidade no corte 1 do eixo devido ao formato côncavo e nas pás quando há uma queda na parte anterior, conforme figura 40:

**Figura 40:** Efeito da velocidade para o ângulo de  $60^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



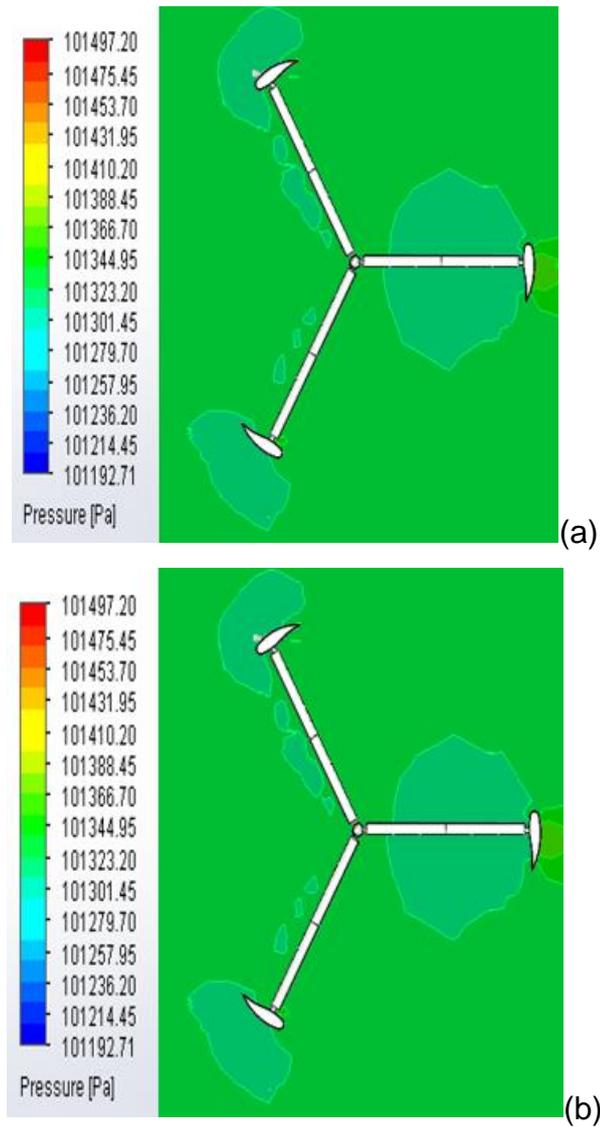
**Fonte 44:** Autor.

Esta turbina evidenciou o comportamento da pressão e velocidade, que demonstrou a dificuldade de entrar em movimento e não aproveitamento total da energia do vento devido às pás pequenas. Assim, foi verificada condições para melhorar estes aspectos nas outras turbinas.

## 6.2.2. Turbina 2

Para o ângulo de  $0^\circ$  em relação ao eixo, foi evidenciada a grande queda de pressão atrás das superfícies da turbina devido ao vácuo formado, conforme figura 41:

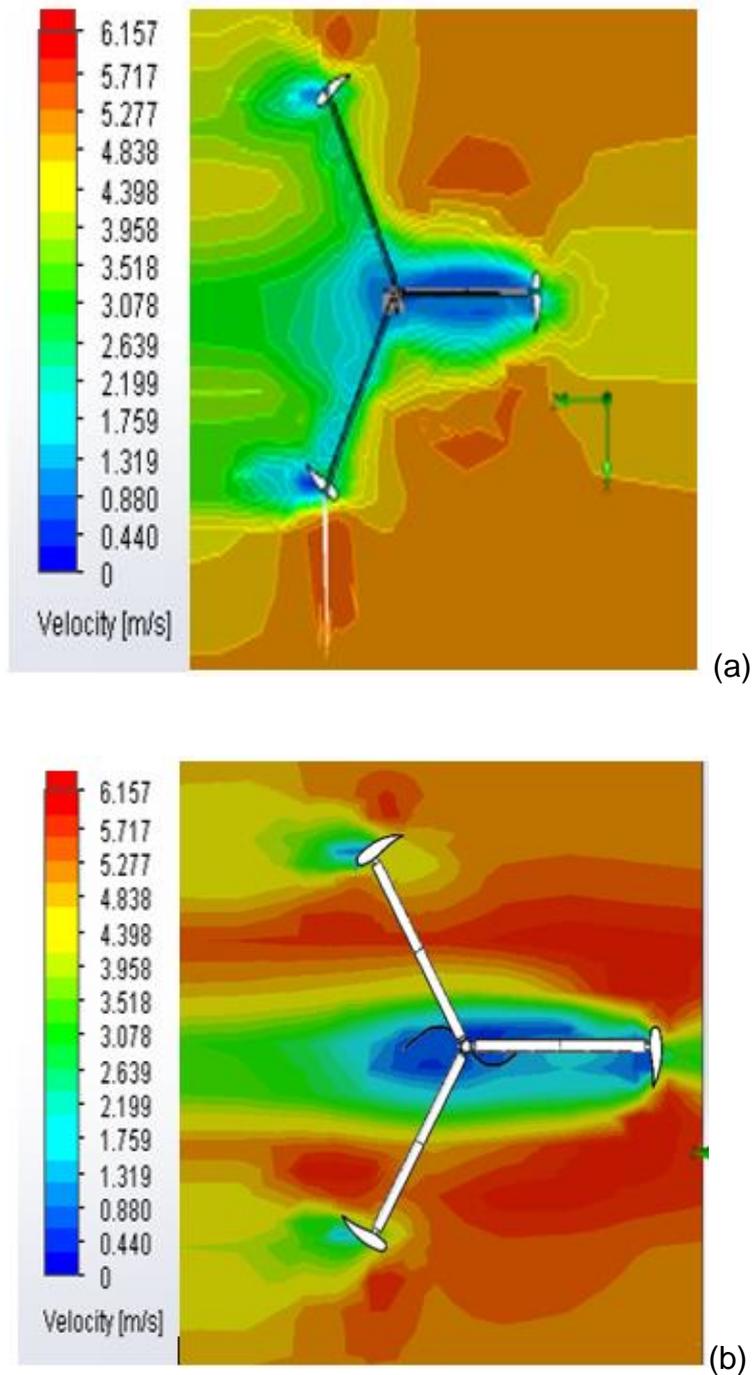
**Figura 41:** Efeito da pressão para o ângulo de  $0^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



Fonte 45: Autor.

Para velocidade foi evidenciada a perda de velocidade no corte 1 dos eixos, justificando o formato côncavo que transforma grande parte da energia, conforme figura 42:

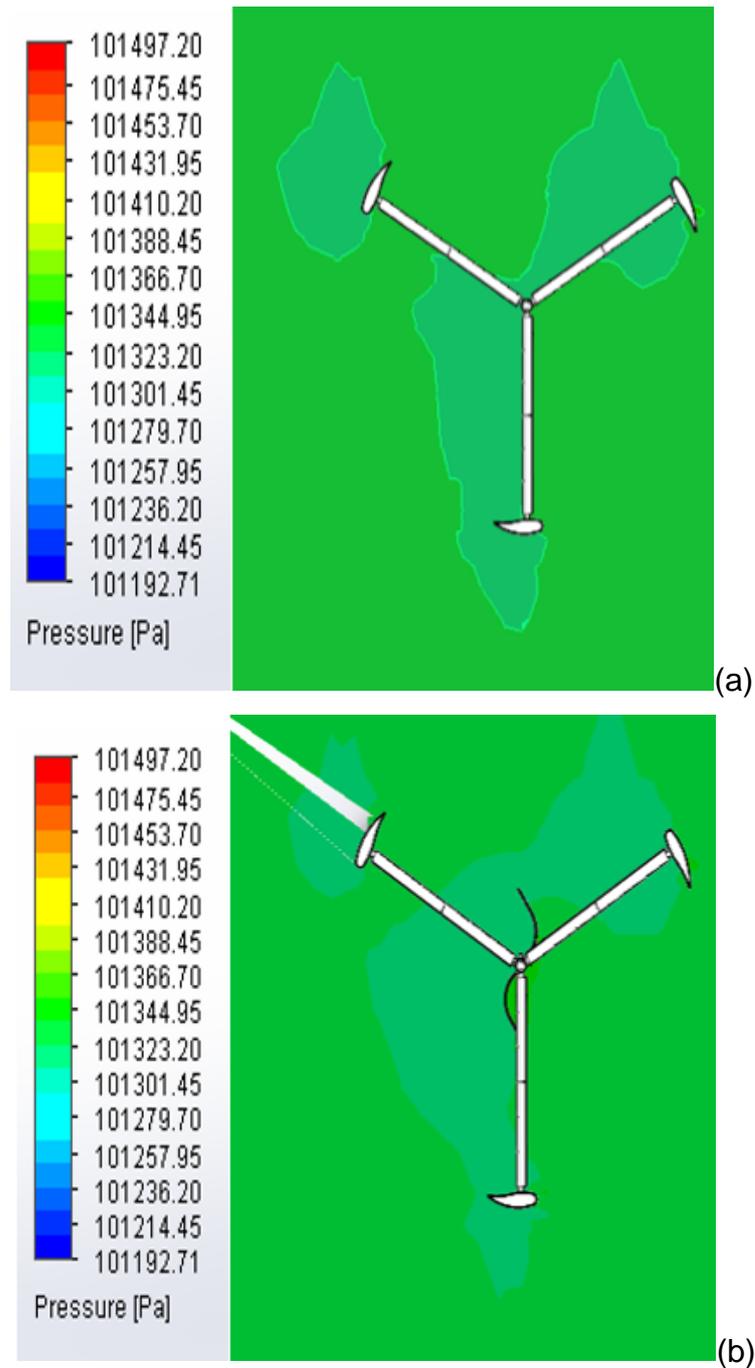
**Figura 42:** Efeito da velocidade para o ângulo de  $0^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 46:** Autor.

Para o ângulo de  $30^\circ$  em relação ao eixo, foi evidenciado grande queda de pressão atrás das superfícies da turbina devido ao vácuo formado, principalmente após as pás centrais que auxiliam no torque de partida, conforme figura 43:

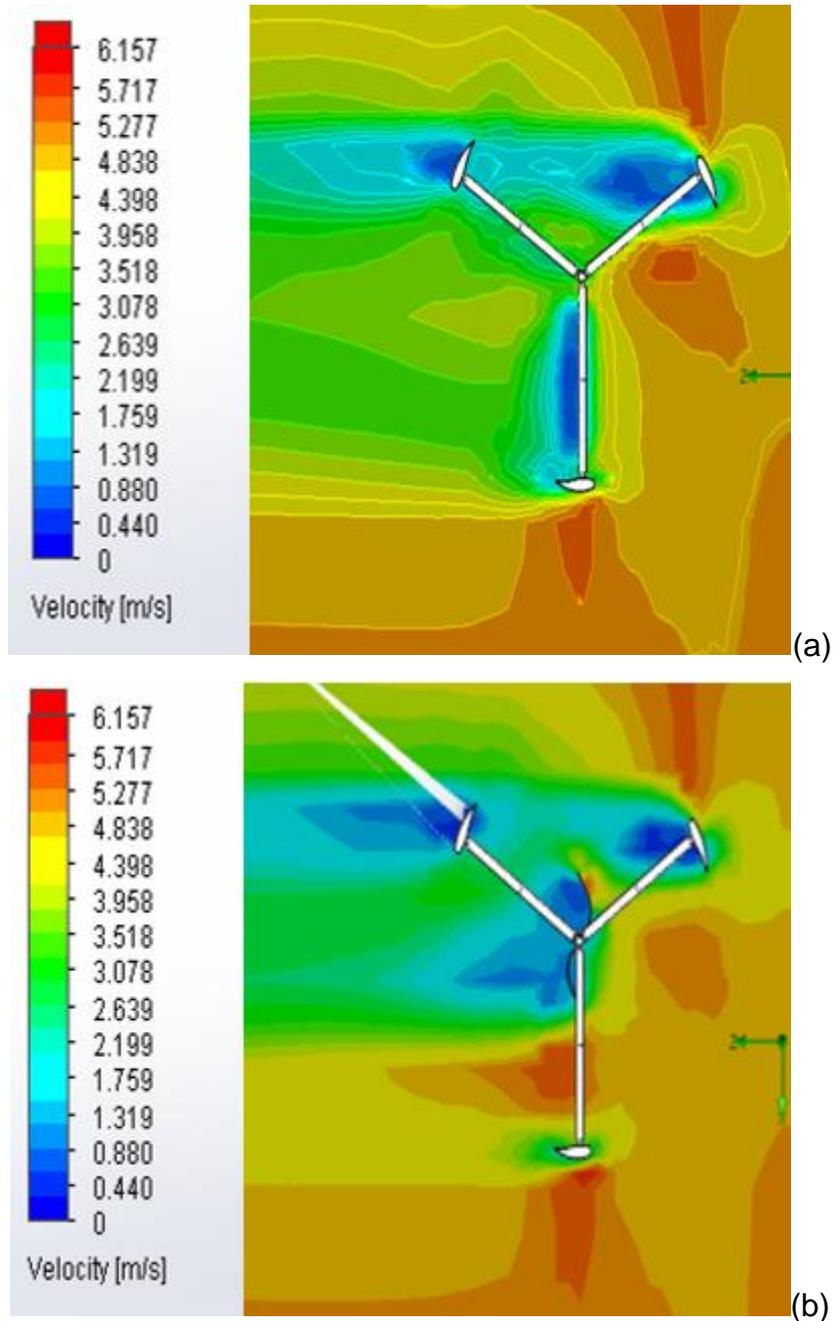
**Figura 43:** Efeito da pressão para o ângulo de  $30^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 47:** Autor.

Para velocidade é evidenciado a perda de velocidade no corte 1 dos eixos, justificando o formato côncavo e a pá no centro do eixo. Conforme figura 44:

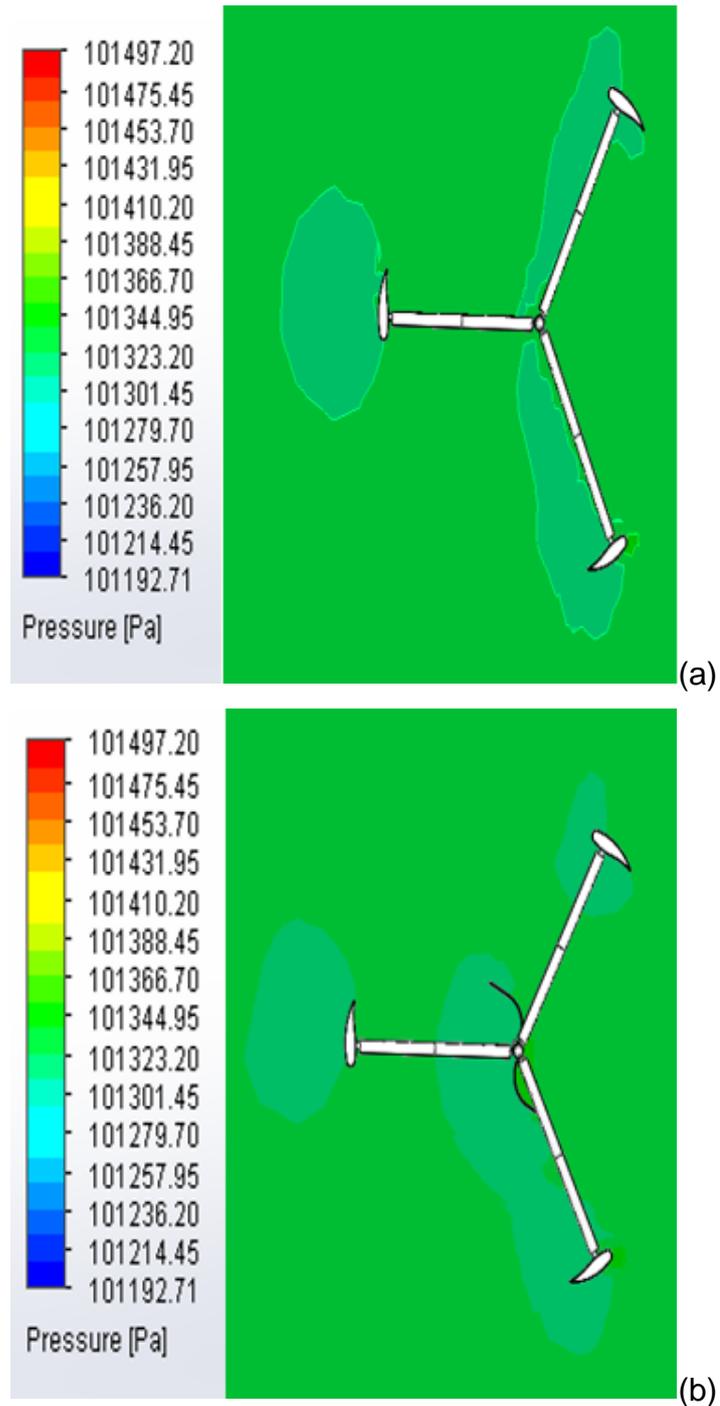
**Figura 44:** Efeito da velocidade para o ângulo de 30° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 48:** Autor.

Para o ângulo de  $60^\circ$  em relação ao eixo, também foi evidenciada grande queda de pressão atrás das superfícies da turbina devido ao vácuo formado, principalmente após as pás centrais que auxiliam no torque de partida, conforme figura 45:

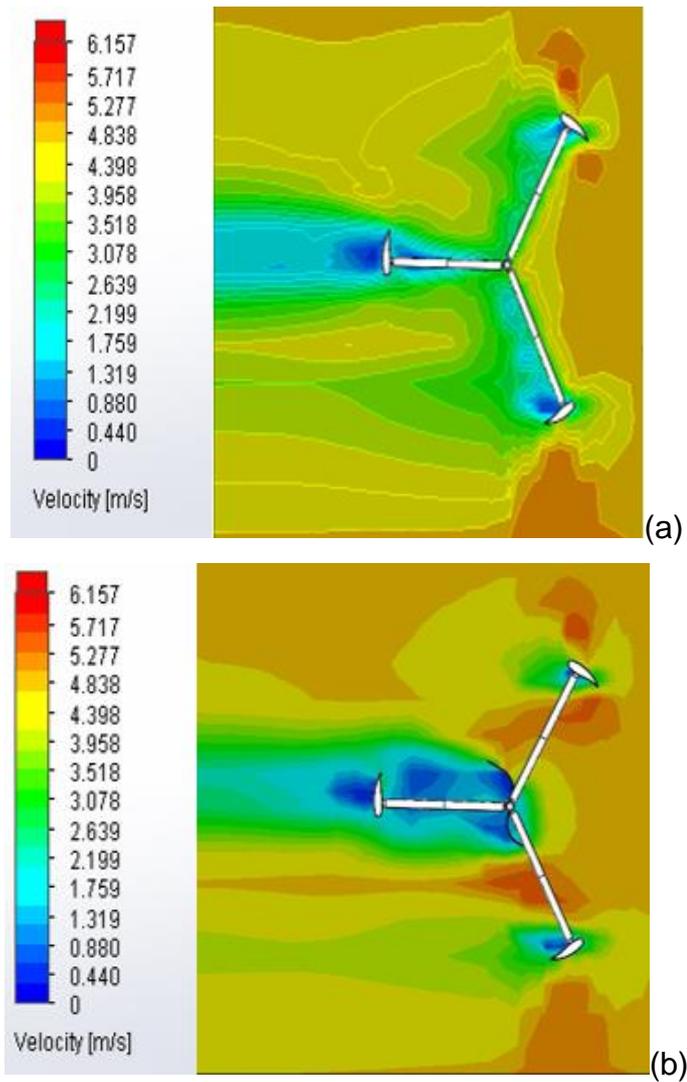
**Figura 45:** Efeito da pressão para o ângulo de  $60^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 49:** Autor.

Para velocidade foi evidenciada a perda de velocidade no lado anterior das pás em ângulo, e na pá no centro do eixo que auxiliam o movimento, conforme Figura 46:

**Figura 46:** Efeito da velocidade para o ângulo de 60° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



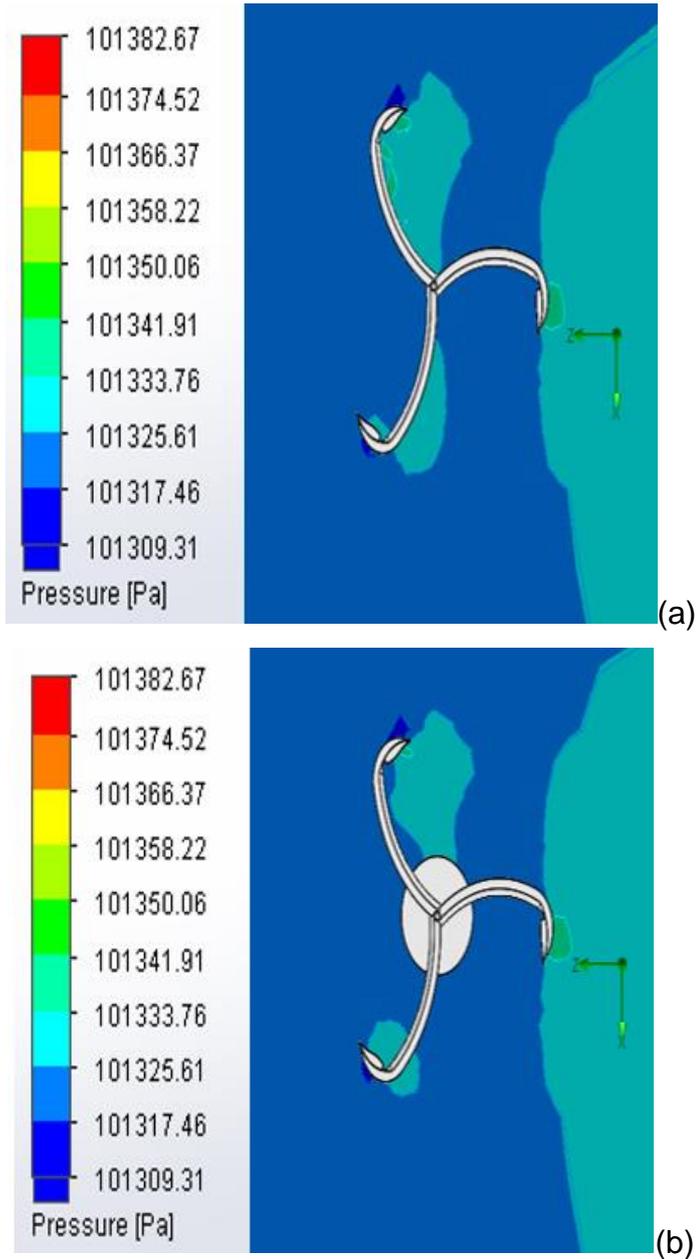
**Fonte 50:** Autor.

Esta turbina, projeto 2, foi observada um aumento da eficiência quanto ao aproveitamento da energia do vento, devido ao aumento das pás. No eixo central, as pás melhoraram a partida do rotor. Porém, esses aspectos foram analisados para serem ainda mais otimizados.

### 6.2.3. Turbina 3

Para o ângulo de  $0^\circ$  em relação ao eixo, é observado grande queda de pressão onde o ar atinge as superfícies, conforme Figura 47:

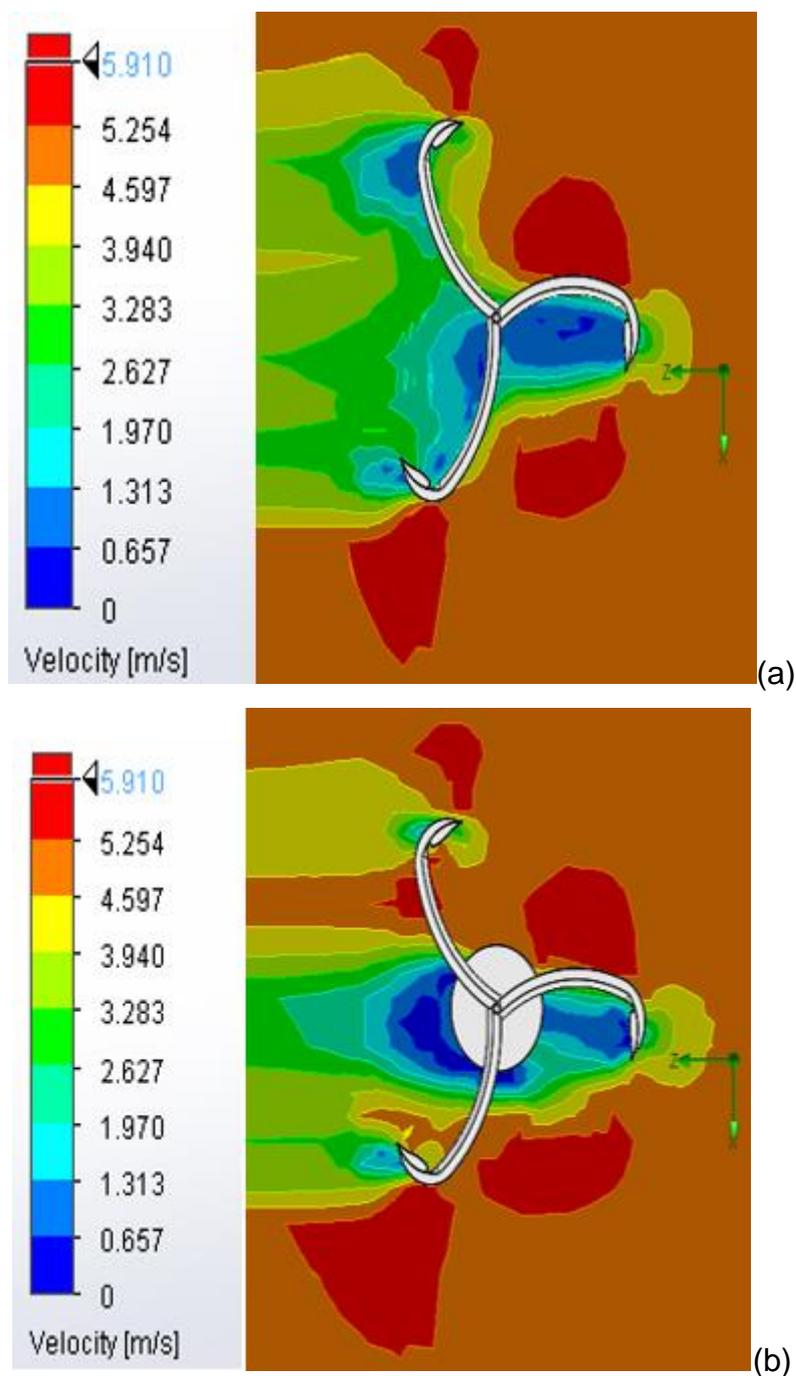
**Figura 47:** Efeito da pressão para o ângulo de  $0^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 51:** Autor.

Para velocidade é evidenciada a perda de velocidade no rotor Savonius no centro da turbina que auxilia na partida do movimento, conforme Figura 48:

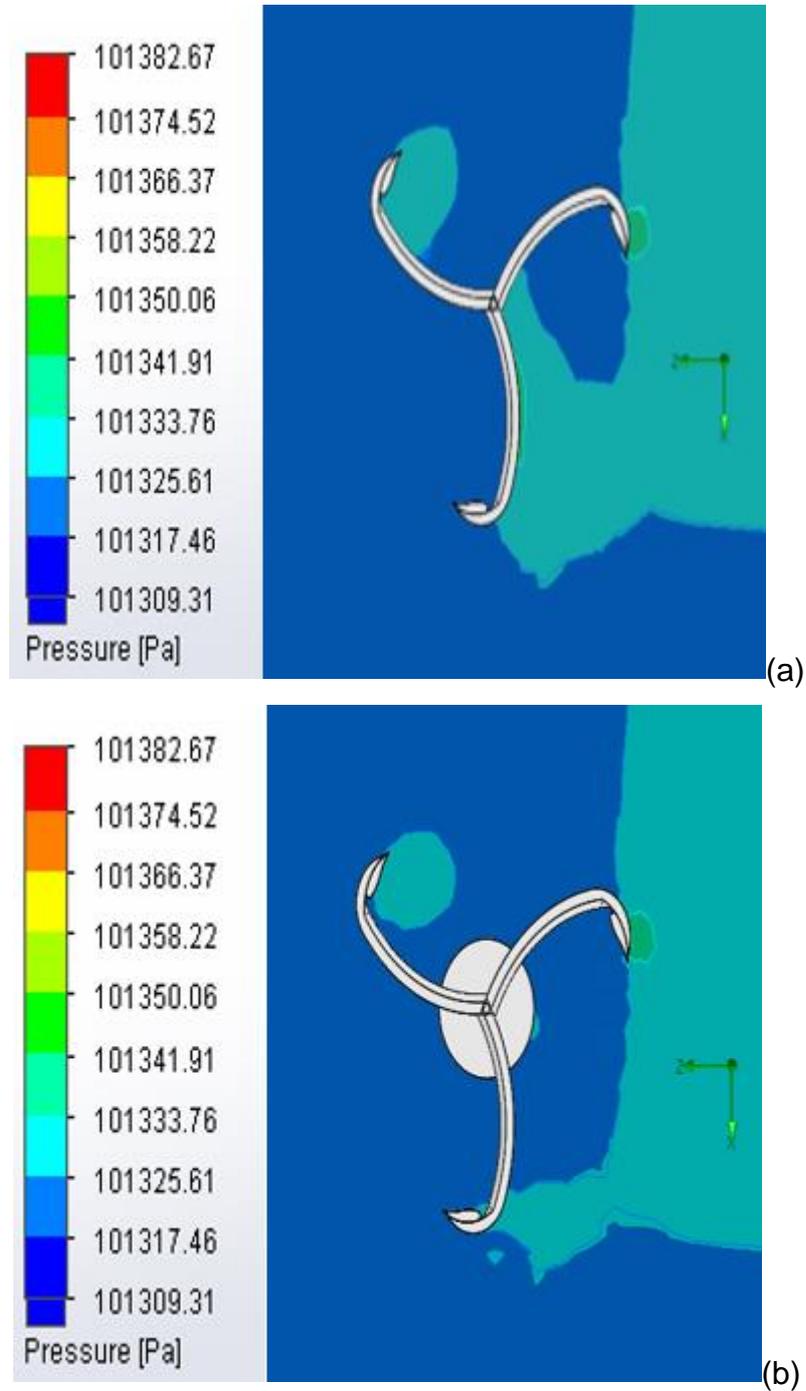
**Figura 48:** Efeito da velocidade para o ângulo de  $0^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



Fonte 52: Autor.

Para o ângulo de  $30^\circ$  em relação ao eixo, foi evidenciada a grande queda de pressão próximo às superfícies de impacto do ar na pá, conforme Figura 49:

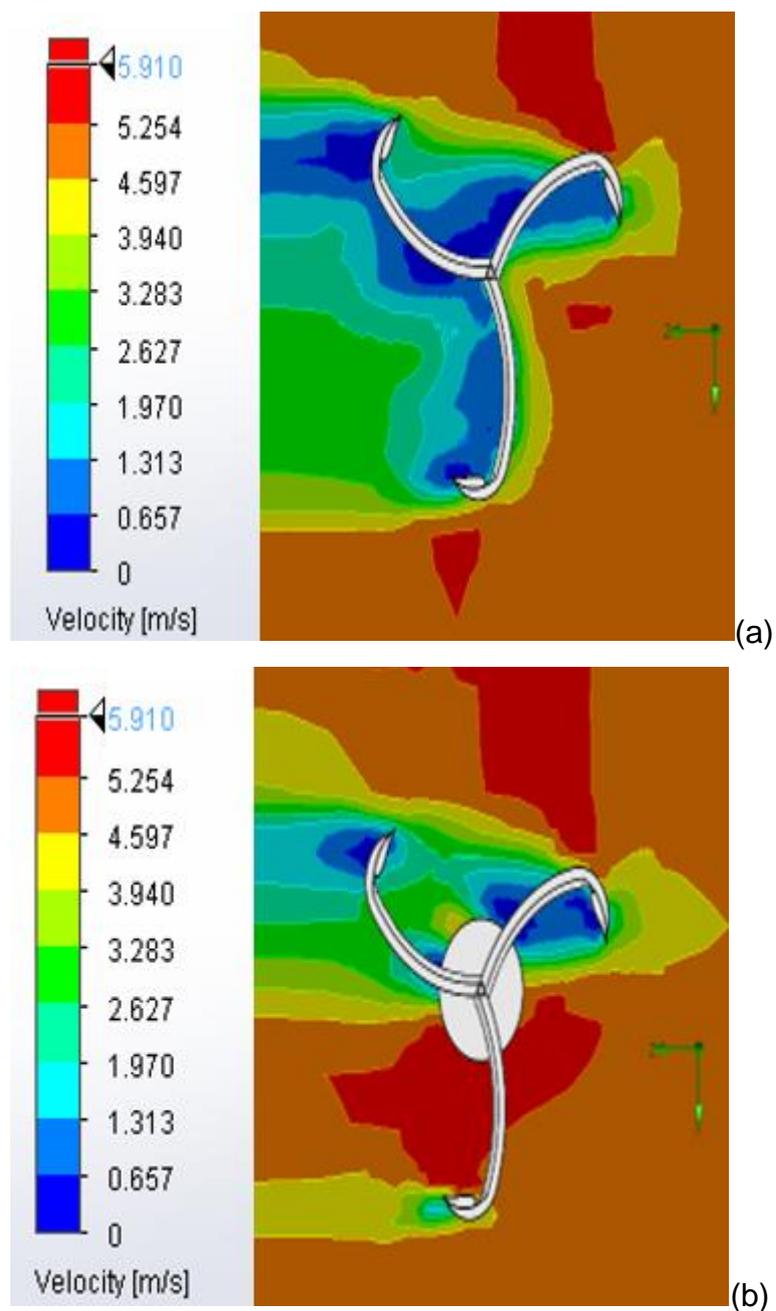
**Figura 49:** Efeito da pressão para o ângulo de  $30^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 53:** Autor.

Para velocidade foi evidenciada a perda de velocidade melhor distribuída em relação, modelo anterior, ao longo dos eixos de sustentação dos aerofólios, justificando a utilização do eixo curvo, conforme Figura 50:

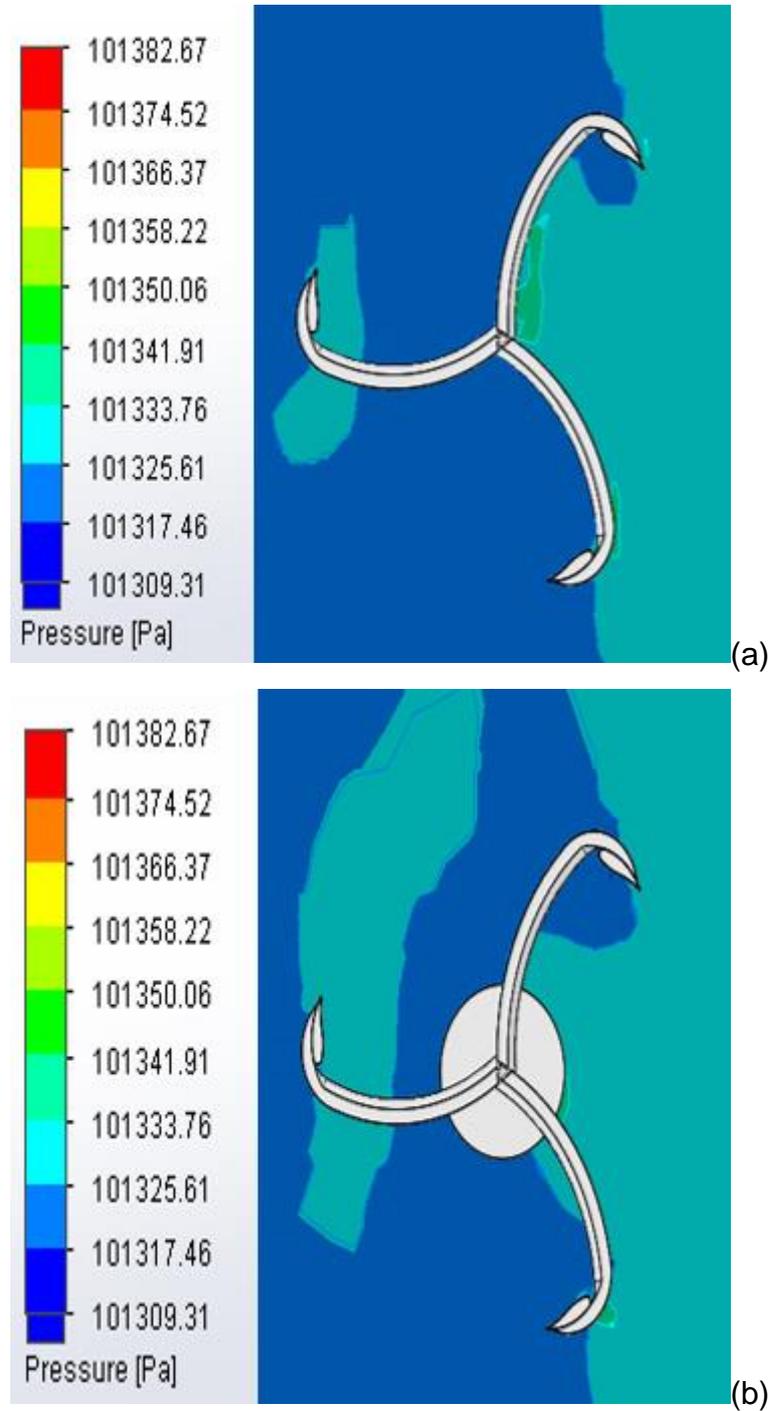
**Figura 50:** Efeito da velocidade para o ângulo de  $30^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 54:** Autor.

Para o ângulo de 60° em relação ao eixo, foi evidenciada a grande queda de pressão após o rotor Savonius, conforme Figura 51:

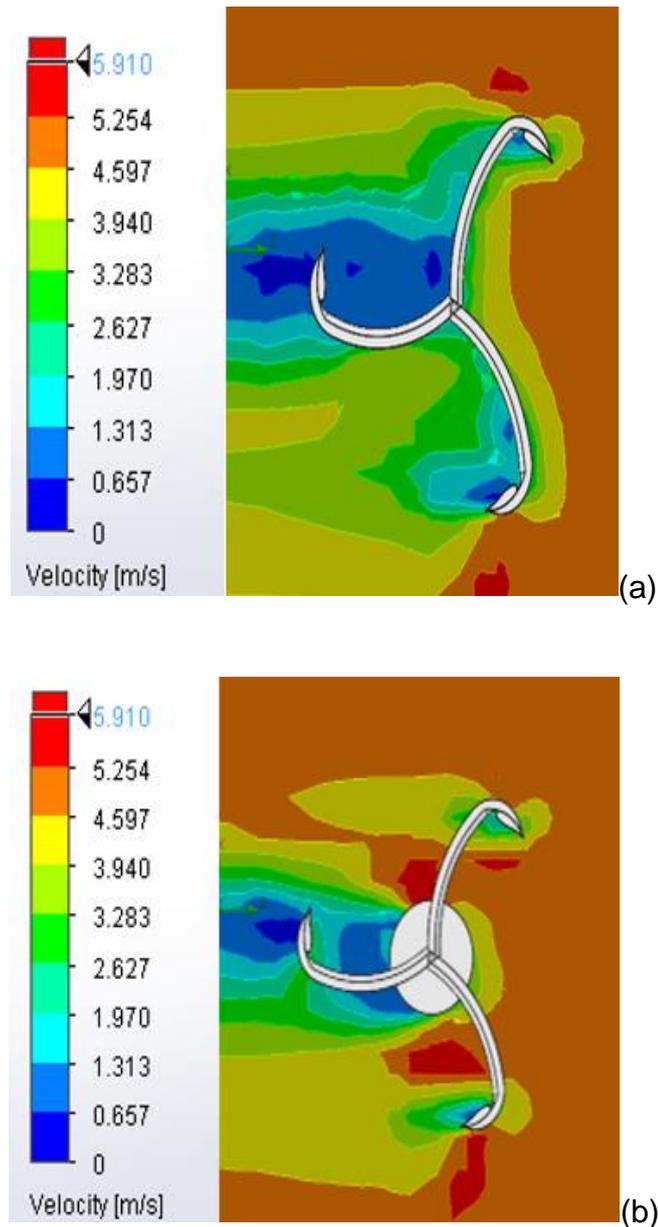
**Figura 51:** Efeito da pressão para o ângulo de 60° em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



Fonte 55: Autor.

Para a simulação de velocidade foi evidenciada uma grande queda distribuída após o rotor Savonius, justificando a boa eficiência para conversão de energia, conforme Figura 52:

**Figura 52:** Efeito da velocidade para o ângulo de  $60^\circ$  em relação ao eixo de sustentação da pá. (a) Considerando o corte 1 e (b) para o segundo corte de visualização.



**Fonte 56:** Autor.

Na turbina 3, foi observado o aumento da eficiência com o formato curvo dos eixos de sustentação das pás, que geram menos resistência ao ar. Já no eixo central, o rotor Savonius para esta velocidade de vento, evidenciou melhor eficiência, principalmente na partida.

### 6.3. Potência gerada

A análise dos 3 projetos de turbinas quanto a potência gerada foram realizadas de forma a considera um regime de trabalho com ventos sob 5, 10 e 12 m/s. O resultado deste cálculo foi demonstrado conforme tabela 2:

**Tabela 2:** Tabela comparativa de eficiência e potência por velocidade do vento.

<b>Torres</b>	<b>Coefficiente de potência</b>	<b>Potência com ventos a 5m/s (W)</b>	<b>Potência com ventos a 10m/s (W)</b>	<b>Potência com ventos a 12m/s (W)</b>
<b>1</b>	<b>21</b>	<b>46</b>	<b>367</b>	<b>636</b>
<b>2</b>	<b>23</b>	<b>111</b>	<b>888</b>	<b>1535</b>
<b>3</b>	<b>27</b>	<b>130</b>	<b>1042</b>	<b>1802</b>

Fonte: Autor

A tabela indica a proporcionalidade exponencial da potência em relação a velocidade dos ventos, sendo que um ligeiro aumento de sua velocidade implica grande aumento de potência.

### 6.4. Potência útil

A potência útil, aquela que irá na rede elétrica, deve ser considerada com as perdas de rendimento do gerador, do inversor de tensão e do Multiplicador de velocidades.

Para minimizar estas perdas foi considerado um gerador de neodímio com 98% de eficiência, um CVT como redutor, com 98% de rendimento e um inversor de 94% de rendimento, conforme revisão bibliográfica.

Logo a tabela de potência fornecida a rede elétrica é descrita segundo a tabela 3:

**Tabela 3:** Potência útil das torres por velocidade do vento.

<b>Torres</b>	<b>Potência com ventos a 5m/s (W)</b>	<b>Potência com ventos a 10m/s (W)</b>	<b>Potência com ventos a 12m/s (W)</b>
<b>1</b>	<b>41</b>	<b>332</b>	<b>574</b>
<b>2</b>	<b>100</b>	<b>802</b>	<b>1386</b>
<b>3</b>	<b>117</b>	<b>941</b>	<b>1626</b>

**Fonte:** Autor

A tabela acima mostra a aplicabilidade dos rotores domésticos quanto a potência necessária para a velocidade dos ventos na região. Assim sendo, a turbinas 2 e 3 podem ser bem aproveitadas em regiões com velocidade de vento maior que 10m/s.

## 7. Conclusão

Os rotores Darrieus, em suas 3 variações se mostraram eficazes quanto ao uso doméstico, garantindo geração de energia elétrica através da força do vento. Sendo viável a utilização de material polimérico em suas pás e eixos de sustentação. O PETG se mostrou um polímero que além de suas qualidades quanto boa capacidade de ser conformado e trabalhado, se mostrou viável e seguro mesmo em situações de fortes ventos e grandes solicitações mecânicas. Bem como, é um material de baixo custo e que pode ser aplicado a diversos tipos de formas de conformação.

A análise de escoamento unidirecional sobre as turbinas eólicas gera diversas informações que permitem analisar e otimizar o rendimento de conversão de energia. No presente estudo verificou-se que, considerando os resultados das três configurações de turbinas eólicas, a maior eficiência de conversão de energia cinética em mecânica, é da turbina 3, pois apresenta campos de pressão e velocidades mais bem distribuídos e gerando maior torque no início do giro devido ao rotor Savonius e eficiência de 27%.

Conclui-se que a turbina 3 é a de melhor desempenho aerodinâmico, visto que sua eficiência é maior que a turbina 1, 21%, e da turbina 2 com 23%. Garantindo melhor aproveitamento dos ventos para a geração de energia elétrica.

Com base nas potências geradas por velocidade dos ventos, fica evidente que não a viabilidade econômica da turbina para cidades com baixas velocidades médias de ventos, como Belo Horizonte, porém em cidades litorâneas ou com média de velocidade de vento alta, há boa aplicabilidade em termos de retorno econômico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS FLUIDS. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/fluids>. Acesso em 13 de junho de 2018.

ALBUQUERQUE, ALFREDO ALVES DE. **Caracterização da resposta dinamica de uma CVT por polias expansivas**. 179 p. 2003.

ALHO & ILHA. **A. Turbulência, simulação numérica de escoamentos complexos**. V Escola de Primavera em Transição e Turbulência–5ª EPTT, ABCM, Rio de Janeiro, Brasil. 2006.

BATISTA, N. A. M. D. C. **Novo aerogerador de eixo vertical integrado numa rede inteligente em contexto urbano**. Universidade de Évora. 22 2p. 2013.

BRANLARD, E. **Wind turbine tip-loss corrections**. Technical University of Denmark. 185p. 2011.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. Rio de Janeiro, Brasil. 2002.

CASER, Eduardo. PAIVA, Giuseppe. **Projeto aerodinâmico de uma turbina eólica de eixo vertical (teev) para ambientes urbanos**. Universidade Federal do Espírito Santo. 71 p. 2016.

CRESESB, **Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica**. Disponível em:

[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid%20=casa\\_solar](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid%20=casa_solar).

Acesso em 15 de março de 2019.

DIVONE, L.V. **Evolution of Modern Wind Turbines**. In Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, SPERA, S.A, (ed), 1 ed. New York, ASME Press, 73-138 p. 1994.

Dutra, R.M. **Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro**. Dissertação de M.Sc., Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 300 p. 2001.

FILHO, ALFEU. CARDOSO, JAQUELINE GOMES. **Energia eólica: Tipos de geradores e conversores usados atualmente**. 2014

FURTADO, D. C. **Análise estrutural de chassi de veículos automotivos**. 2014.

GENDRICH, C. P. **Dynamic Stall of Rapidly Pitching Airfoils: MTV Experiments and Navier-Stokes Simulations**. Michigan State University. 151 p. 1997.

HOMICZ, G. F. **Numerical Simulation of VAWT Stochastic Aerodynamic Loads Produced by Atmospheric Turbulence: VAWT-SAL Code**. Sandia National Laboratories. 73 p. 1991.

LOTTERMANN, J. P. T. **Projeto estrutural de chassi tipo gaiola para veículos minibus: análise numérica e experimental**. 2015.

MANCINI, Sandro. **Reciclagem de polímeros**. UNESP. 2017

MELCONIAN, S., **Elementos de Máquina**. Ed. Érica Ltda., 4a edição, São Paulo. 2000

NOAA. **Cyclone facts**. Disponível em: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/cyclone.html>. Acesso em 10 de Março de 2019.

LORA, ELECTO EDUARDO SILVA; CORTEZ, LUIS AUGUSTO BARBOSA; GOMEZ, EDGARDO OLIVARES. **Biomassa para Energia**. Editora: Unicamp. 2008.

PACHECO, E. B. A. V.; RONCHETTI, L. M.; MASANET, E. **An overview of plastic recycling in Rio de Janeiro**. Resources, Conservations and Recycling. 2012.

PAVINATTO, EDUARDO FIORINI. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica.** Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 2005

PEREIRA, NÚCIO. **Análise estrutural estática por elementos finitos de um chassi veicular tipo spaceframe.** p.96. 2016

PORTÉ-AGEL, F.; WU, Y.-T. **Atmospheric Turbulence Effects on Wind-Turbine Wakes: An LES Study.** Energies. p, 5340-5362. 2012.

SANDIA, 2006. **Vertical Axis Wind Turbine: The History of the DOE Program.** Disponível em: [http://www.sandia.gov/Renewable\\_Energy/wind\\_energy/topical.htm](http://www.sandia.gov/Renewable_Energy/wind_energy/topical.htm). Acesso em 15 de março de 2019.

SILVEIRA, F; MARQUES, N. **Motor Elétrico de Indução:** “Uma das dez maiores invenções de todos os tempos.” Cad. Bras. Ens. Fís., v. 29, n. 1: p. 114-129, abr. 2012.

SHACKELFORD, J.F.; **Introduction to Materials Science for Engineers.** 4th edition, Prentice Hall, USA, 1996.

SHEPHERD, D.G. **“Historical Development of the Windmill”.** In Wind Turbine Technology - Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering. SPERA, S.A, (ed), 1 ed. New York, ASME Press, p 1-46. 1994.

TELMAC. **TELMAC Soluções Industriais e Agrícolas.** Catálogo eletrônico. Disponível em: <http://www.telmac.com.br/redutores-de-velocidade.html>. Acesso em março, 2021.

TWELE, J., GASCH, R. **Wind Power Plants – Fundamentals, Design, Construction and Operation.** ISBN 1-902916-36-7, James & James London. 2002.

WANG, X., LIU, W., ZHOU, H., et al, **“Study on the effect of dispersion phase morphology on porous structure of poly (lactic acid)/poly (ethylene**

**terephthalate glycol-modified) blending foams”, Polymer, v. 54, n. 21, p. 5839-5851. 2013.**