

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

KAUANY CAMARGO RAMOS

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UMA PÁ DE UM
AEROGERADOR HORIZONTAL**

CORNÉLIO PROCÓPIO

2025

KAUANY CAMARGO RAMOS

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UMA PÁ DE UM
AEROGERADOR HORIZONTAL**

Finite Element Analysis of a Blade of a Horizontal Axis Wind Turbine

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Me. Fernando Henrique De Oliveira Camara.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2025



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

KAUANY CAMARGO RAMOS

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UMA PÁ DE UM
AEROGERADOR HORIZONTAL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06/03/2025

Fernando Henrique De Oliveira Camara
Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adriano Silva Borges
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Edson Hideki Koroishi
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CORNÉLIO PROCÓPIO

2025

Dedico este trabalho aos meus pais e meus irmãos,
por acreditarem em mim, apesar de toda dificuldade,
tempo e ausência. Ao exemplo de pessoa que
sempre foram para mim, e, por fazerem possível
mais um passo em direção a pessoa que um dia eu
pretendo ser.

AGRADECIMENTOS

Expressar a gratidão sentida em palavras com certeza não será suficiente, mas vale o registro de agradecimento. Primeiro, à instituição que foi meu lar por mais de dez anos, desde o ensino técnico: a Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E, conseqüentemente, a cada pessoa, servidor, professor e aluno que cruzou o meu caminho nesse trajeto. Minha formação acadêmica, mas também de vida, foi forjada entre suas paredes e corredores.

Obrigada ao meu orientador, Prof. Fernando Camara, e à coordenação do curso por toda a paciência e apoio.

E, principalmente, o meu agradecimento à minha mãe e ao meu pai, Ana Claudia Camargo Ramos e José Antônio de Paula Ramos, cujo afeto, amor e dedicação me sustentaram por todo o período.

Sem esses elementos supracitados, este trabalho não poderia ter sido escrito. Muito obrigada.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento estrutural de uma pá de aerogerador horizontal utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Com o crescimento da demanda por fontes renováveis de energia, a energia eólica tem se destacado como uma alternativa sustentável, e no Brasil, os aerogeradores representam uma das principais fontes de energia renovável. Considerando que as pás correspondem a cerca de 23% do custo total do equipamento, torna-se essencial otimizar seu design para garantir eficiência e durabilidade. A metodologia empregada baseou-se no MEF, utilizando o software SolidWorks para modelagem tridimensional e análise estrutural. A pá analisada segue o modelo NREL 5-MW, caracterizado por perfis aerodinâmicos variáveis ao longo de seus 61,5 metros de comprimento. A análise foi dividida em três etapas: pré-processamento, com a modelagem da pá e definição das propriedades do material; processamento, onde foram aplicadas restrições, carregamentos externos (vento e gravidade) e geração da malha; e pós-processamento, com a interpretação dos resultados obtidos, incluindo deslocamentos, tensões e reações de apoio. Os resultados mostraram que as tensões e deslocamentos aumentam significativamente com a velocidade do vento, exigindo um design robusto para garantir a integridade estrutural da pá. Dessa forma, a pesquisa evidencia a importância da otimização do projeto para minimizar falhas e reduzir custos operacionais, reforçando a relevância do uso do MEF na engenharia mecânica para aprimoramento das turbinas eólicas e para o avanço da energia renovável no Brasil.

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos; Energia Eólica; Aerogerador; Análise Estrutural.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the structural behavior of a horizontal axis wind turbine blade using the Finite Element Method (FEM). With the growing demand for renewable energy sources, wind energy has emerged as a sustainable alternative, and in Brazil, wind turbines represent one of the main sources of renewable energy. Considering that the blades account for approximately 23% of the total equipment cost, optimizing their design is essential to ensure efficiency and durability. The methodology employed was based on FEM, using SolidWorks software for three-dimensional modeling and structural analysis. The analyzed blade follows the NREL 5-MW model, characterized by variable aerodynamic profiles along its 61.5-meter length. The analysis was divided into three stages: pre-processing, which included blade modeling and material property definition; processing, where constraints, external loads (wind and gravity), and mesh generation were applied; and post-processing, which involved interpreting the obtained results, including displacements, stresses, and support reactions. The results showed that stresses and displacements significantly increase with wind speed, requiring a robust design to ensure the blade's structural integrity. Thus, this research highlights the importance of design optimization to minimize failures and reduce operational costs, reinforcing the relevance of FEM in mechanical engineering for the improvement of wind turbines and the advancement of renewable energy in Brazil.

Keywords: Finite Element Method; Wind Energy; Wind Turbine; Structural Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes básicos de um aerogerador de eixo horizontal	15
Figura 2 Perfil aerodinâmico	16
Figura 3 - Modelo de turbina eólica NREL 5-MW: a) posições dos perfis ao longo do comprimento b) cortes transversais dos aerofólios em código padronizado	17
Figura 4 - Fases de solução de um problema pelo MEF	19
Figura 5 - Hélice de turbina eólica NREL 5-MW: a) Sequência de 19 planos utilizados para criação de modelo tridimensional e b) modelo tridimensional ..	21
Figura 6 - Propriedades mecânicas da fibra de vidro criada no SolidWorks.....	22
Figura 7 - Dimensões de modelo simplificado	22
Figura 8 - Modelo simplificado a) com engaste na extremidade e b) com carregamento externo e gravidade	24
Figura 9 - Malha aplicada pelo software ao modelo simplificado de pá eólica..	24
Figura 10 - Reações de apoio da pá com a velocidade mínima do vento	25
Figura 11 - Reações de apoio na pá exposta à velocidade nominal do vento ...	25
Figura 12 - Malha gerada pelo software	26
Figura 13 - Tensão de Von Mises com velocidade mínima do vento	26
Figura 14 - Von Mises com vento na velocidade nominal	27
Figura 15 - Deslocamento com vento na velocidade mínima.....	28
Figura 16 - Deslocamento da pá na velocidade nominal do vento	28
Figura 17 - Tensão da pá com vento na velocidade mínima	29
Figura 18 - Tensão da pá com o vento na velocidade nominal de trabalho.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Divisão de custos na instalação de parque eólicos.....	14
Tabela 2 - Características geométricas da pá.....	17

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Turbinas eólicas	15
2.2	Perfil aerodinâmico das pás	15
2.3	Método de elementos finitos (MEF)	17
2.4	Análise Estática	18
3	METODOLOGIA E MATERIAIS	19
4	DESENVOLVIMENTO	21
4.1	Pré-processamento	21
4.2	Processamento	23
4.3	Pós-processamento: Resultados	25
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
	REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

Frente ao contexto de degradação ambiental, o aumento da utilização de fontes renováveis de energia não é uma novidade e seu uso vem sendo incentivado pelas diversas crises ambientais e político-econômicas, tendo como o maior marco a crise do petróleo na década de 70, e, mais recentemente no Brasil pela crise hídrica, que vem assolando o planeta nos últimos anos (RIBEIRO, 2020). No Brasil, as hidrelétricas ainda são a principal fonte de geração de energia nacional, mas a busca por uma matriz energética mais diversa é contínua. Nesse cenário, a energia eólica também se destaca como uma solução viável (ABEEólica, 2023);

A utilização de turbinas eólicas, também conhecidas como aerogeradores, em território brasileiro acontece desde 1992 (MOURA, 2022), mas sua importância e necessidade vem aumentando, em especial nesses últimos anos, fazendo desta a segunda maior fonte de energia renovável, e terceira no âmbito geral (TOLMASQUIM, 2020). Desse modo, o Brasil se torna o sexto país em capacidade de geração de energia eólica em terra (*onshore*, em inglês).

A captação e conversão da energia potencial do vento é realizada através das turbinas eólicas. Estas podem ter diferentes configurações, divididas de acordo com a posição do eixo (MOURA, 2007): turbinas eólicas de eixo vertical e turbinas eólicas de eixo horizontal. As configurações são determinadas por diversos fatores, como a performance individual, fator de influência sobre os outros componentes ou requisitos do sistema, custo, entre outros.

Segundo Pinto (2019), uma configuração padrão, predominante no mercado para a conexão à rede elétrica de distribuição, é a de eixo horizontal, configuração que realiza a conversão de energia por força de sustentação aerodinâmica. Para esta configuração, são utilizados um eixo mecânico horizontal, um rotor com três pás, a montante da torre e, por fim, um sistema ativo ou passivo de orientação do rotor em relação ao vento.

A turbina eólica de eixo horizontal é a mais comum devido à melhor performance e ao alto custo do aerogerador com eixo vertical, embora ainda haja muito interesse e estudos internacionais (PINTO, 2019). Mas mesmo com o estabelecimento de uma configuração padrão de mercado e especificações técnicas que podem ser aplicadas para um melhor custo-benefício, essa tecnologia ainda tem um alto custo inicial.

De acordo com a CPFL, empresa do setor de energia elétrica no Brasil, os equipamentos eólicos representam cerca de 60% do custo total na instalação de um parque eólico. Olhando a nível de equipamentos, as pás de um gerador eólico representam cerca de 23% do custo total do equipamento, uma parcela bastante representativa (LOPES, 2012).

Tabela 1 – Divisão de custos na instalação de parques eólicos

Custos	Participação no custo total - %	Custo em R\$/kW instalado
Projeto	5,0	216,00
Infraestrutura	15,0	646,00
Equipamentos	60,0	2.588,00
Financeiros	13,0	561
Linhas de Transmissão	7,0	302,00
Total	100	4.313,0

Fonte: LOPES, 2012

Visto que em um parque eólico o maior capital investido se traduz nos próprios geradores horizontais e o que as pás significam do total, se faz necessário uma atenção especial no dimensionamento e processo de fabricação, para garantir que elas sejam capazes de resistir mecanicamente aos esforços que serão submetidas. A manutenção do parque eólico custa entre 15% e 25% do custo total durante toda a vida útil do parque (SILVA, 2021). Dessa forma, o ideal é garantir que as pás irão resistir aos esforços de trabalho e minimizar custos não planejados de manutenção.

1.1 Objetivo

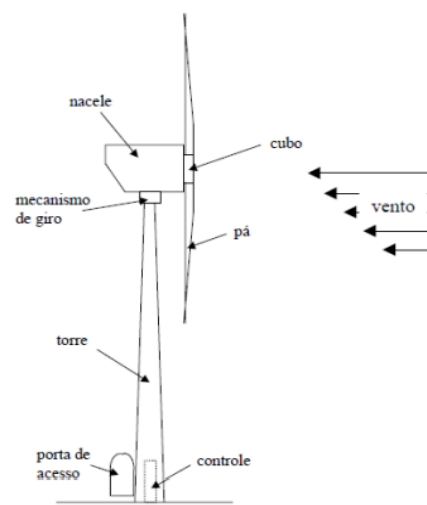
O presente trabalho propõe uma metodologia para discussão acerca do comportamento estático da pá de um aerogerador horizontal. Quantificando os diversos parâmetros que expressam o comportamento da estrutura sujeita a uma carga externa. Além de determinar esforços internos, deslocamentos, tensões, esforços externos e reações de apoio.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Turbinas eólicas

O conceito moderno mais popular de turbinas eólicas, apresentado na Figura 1, é constituído basicamente de torre de sustentação, um sistema de controle, o mecanismo de giro para o posicionamento do eixo em relação ao vento, o rotor, composto pelo cubo e pelas pás, e o compartimento onde fica a caixa de transmissão e o gerador, chamado de nacele (MOURA, 2007).

Figura 1 - Componentes básicos de um aerogerador de eixo horizontal



Fonte: MOURA,2007

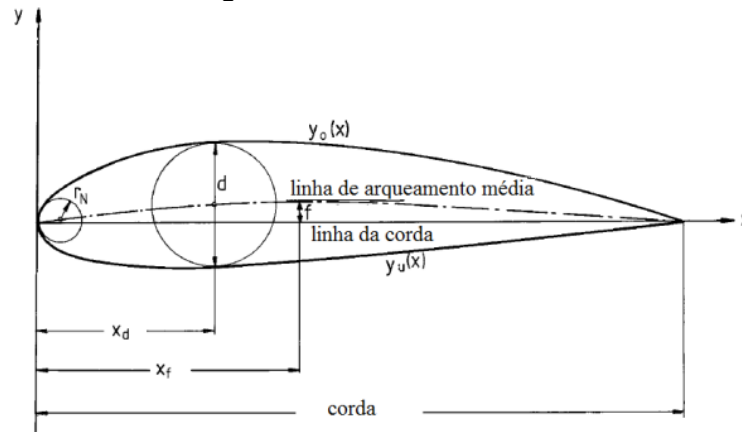
O processo de geração de energia eólica consiste em três estágios: captura do vento pela pá, geração de energia elétrica e distribuição para a rede (GUTIERREZ, 2021). Dessa maneira, embora todos os componentes sejam essenciais para a geração de energia, os perfis aerodinâmicos e comportamento estático e dinâmico das pás têm uma importância primária, já que devem ser projetados para receber e conduzir a maior energia possível do vento (ALMEIDA, 2013). A integridade estrutural das pás (foco deste trabalho) está diretamente relacionada ao primeiro estágio citado.

2.2 Perfil aerodinâmico das pás

As pás também já possuem modelos comerciais com características técnicas padrões, desta forma uma variedade enorme de perfis de aerofólios é dividida em famílias, sendo as da NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) específicas para utilização em turbinas eólicas de eixo horizontal.

Esses perfis têm alguns parâmetros, ainda de acordo com Almeida (2013), como o comprimento total chamado de corda, a linha de arqueamento médio que define o ponto médio das superfícies do perfil, a máxima espessura (d), a posição de máxima espessura (x_d), a posição máxima de cambagem (x_f) e o raio do nariz (r_n). Eles são importantes por constituírem o perfil e serem referências para a definição do ângulo de ataque e incidência do vento, e estão indicados na figura 2.

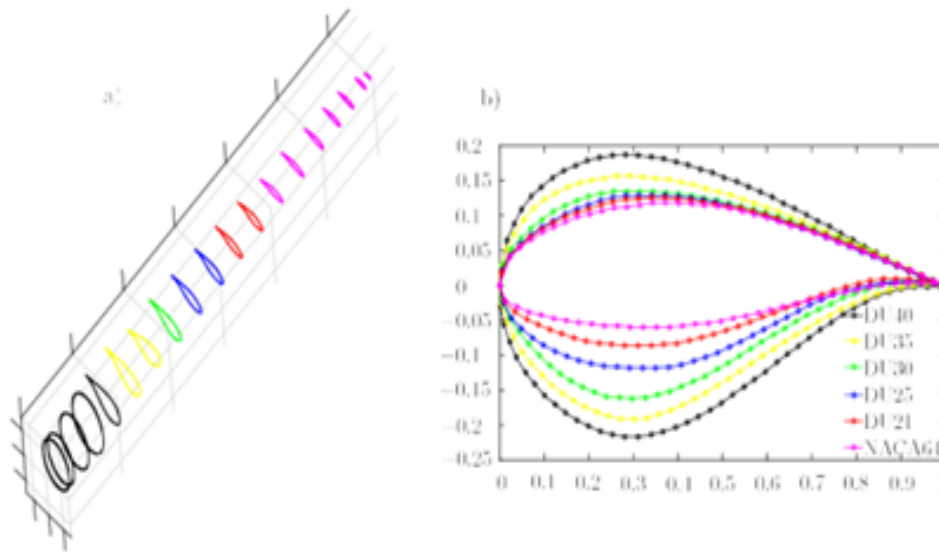
Figura 2 Perfil aerodinâmico



Fonte: ALMEIDA, 2013

Uma pá é composta por um perfil variável ao longo do seu extenso comprimento. Este perfil variável pode ser dividido em diferentes perfis ao longo do comprimento. Como no caso da pá que será considerada para o presente trabalho, a NREL 5-MW. Para este tipo de pá, as dimensões são 61,5[m] de comprimento, com um perfil variável composto por cortes transversais diferentes, conforme apresentado na Figura 3. Na Tabela 2 são apresentadas as características geométricas da pá.

Figura 3 - Modelo de turbina eólica NREL 5-MW: a) posições dos perfis ao longo do comprimento e b) cortes transversais dos aerofólios em código padronizado



Fonte: Boujleben et al, 2020

Tabela 2 - Características geométricas da pá

Comprimento	61,5 m
Fator de escala de massa	4,536%
Massa total (integrada)	17.740 kg
Segundo Momento de Inércia de Massa	11.776.047 kg*m ²
Primeiro Momento de Inércia de Massa	363.231 kg*m
Localização CM	20,475 m

Fonte: Boujleben et al, 2020

2.3 Método de elementos finitos (MEF)

Para realizar a análise estrutural estática dessa pá submetida a forças de sustentação e do vento, diferentes metodologias são possíveis. No entanto, devido à complexidade de sua geometria e condições de contorno, convém utilizar técnicas de análise numérica. Uma destas técnicas é o método de elementos finitos (MEF).

O MEF é um método de discretização que, segundo Rade (2011), “[...] consiste em dividir o domínio sobre o qual o problema é estudado em várias regiões interconectadas”. Tais regiões são chamadas de elementos, formando assim uma malha.

Cada elemento contém um determinado número de nós e, por eles, estarão conectados entre si. Por sua vez, o nó, ou ponto nodal, terá o número de grau de liberdade (gdl) correspondente ao sistema analisado. Por fim, as funções que regem o comportamento a ser analisado assumirão valores de solução em cada nó. A solução obtida tem sua exatidão dependente do número de elementos e de pontos nodais, ou seja, quando a forma ou domínio é dividida em mais elementos, mais exato é o resultado, a um custo de tempo e capacidade de processamento (FISH e BELYTSCHKO, 2009).

2.4 Análise Estática

A análise estática é um ramo muito importante da Engenharia de Estruturas, que visa entender como um elemento se comporta quando submetido a forças estáticas, buscando determinar tensões e deformações do elemento.

Na análise estática, os critérios básicos geralmente utilizados são o Critério de Von Mises, deslocamento e a relação Tensão e Deformação (HIBBELER, 2011).

O critério de Von Mises é utilizado para entender qual será o início da deformação plástica de um elemento, a partir de suas tensões principais (BORESI, 1993). É utilizado para analisar se um material irá falhar, comparando a tensão de Von Mises com as tensões principais do material (HIBBELER, 2011).

O deslocamento do elemento visa medir o quanto alguma parte específica do mesmo muda de posição quando submetido a determinada força (POPOV, 1999).

A relação entre tensão e deformação busca analisar o quanto o elemento se deforma quando submetido à determinada tensão, seja na região elástica ou plástica (MASE, 2010).

3 METODOLOGIA E MATERIAIS

Rade (2011) propõe uma forma de implementar o MEF de forma estruturada seguindo ordenadamente estas etapas:

1. Discretização do domínio;
2. Escolha das funções de interpolação;
3. Construção das matrizes elementares;
4. Obtenção das matrizes globais a partir das matrizes elementares;
5. Imposição dos carregamentos externos e condições de contorno;
6. Resolução do sistema de equação.

Como Fish e Belytschko (2009) relata, “o MEF é um método para resolver problemas de engenharia, [...], por simulações computacionais”. Sendo assim, será utilizado o *software* SolidWorks para representação em CAD e, posteriormente, para análise por elementos finitos.

As etapas do MEF podem ser distribuídas em macro fases: Pré-processamento, solução e pós-processamento. (ABREU, 2016)

Figura 4 - Fases de solução de um problema pelo MEF



Fonte: ABREU, 2016

Seguindo as etapas de implementação descritas por Rade (2011) e relacionando-as com as fases de processamento, a discretização da geometria ocorre na etapa de pré-processamento, essencial para a criação do modelo, determinação das coordenadas dos nós e definição das propriedades do material a ser utilizado. Essa fase é crucial, pois, conforme mencionado anteriormente, a precisão do resultado está diretamente ligada à forma como o domínio é discretizado. Quanto maior o refinamento da malha, mais exata será a solução, porém, isso também impacta o tempo de processamento e a demanda computacional. Para contornar essa limitação, podem ser adotadas simplificações geométricas e representações aproximadas, desde que preservem as características essenciais do comportamento estrutural da pá. A escolha dessas simplificações deve considerar tanto a capacidade dos equipamentos disponíveis quanto às funcionalidades do *software* utilizado na simulação.

As obtenções das funções podem ocorrer através de três processos com graus de complexidade teórica crescente, sendo eles: direto, variacional e de resíduos ponderados (RADE, 2011). Para o presente trabalho será aplicado o processo direto, devido a menor complexidade e clara interpretação física, já que o objetivo é uma análise estrutural, este método se torna mais adequado por obter as relações matriciais a partir dos princípios físicos que regem o comportamento de cada elemento diretamente, como equilíbrio de força e deslocamento em estruturas mais simples:

$$\{F_i^e\} = \{U_i^e\} * [K_i^e] \quad (1)$$

Da equação 1, observa-se os vetores de força e de deslocamento assim como obtêm-se a matriz de coeficientes elementares. Esta última gera a matriz elementar expandida:

$$[K_i^e] = [T_i]^T * [K_i^e] * [T_i] \quad (2)$$

Onde $[T_i]$ é a matriz de transformação, e através da soma da equação 2 de cada elemento, têm-se a matriz de coeficientes globais, abrangendo assim as etapas 2,3 e 4. Para o caso da pá será utilizada a teoria de viga de Euler-Bernoulli, uma simplificação usada amplamente na engenharia para obter as equações governantes. Esses passos são importantes para certificar e sustentar teoricamente o resultado da ferramenta computacional, já que nas fases do *software* tais etapas ficam implícitas.

Assim, após o pré-processamento, a próxima fase de solução define o tipo de análise a ser realizada e segue direto para as etapas 5 e 6, onde são aplicadas restrições, condições de contorno e cargas externas e, por fim, a resolução de fato.

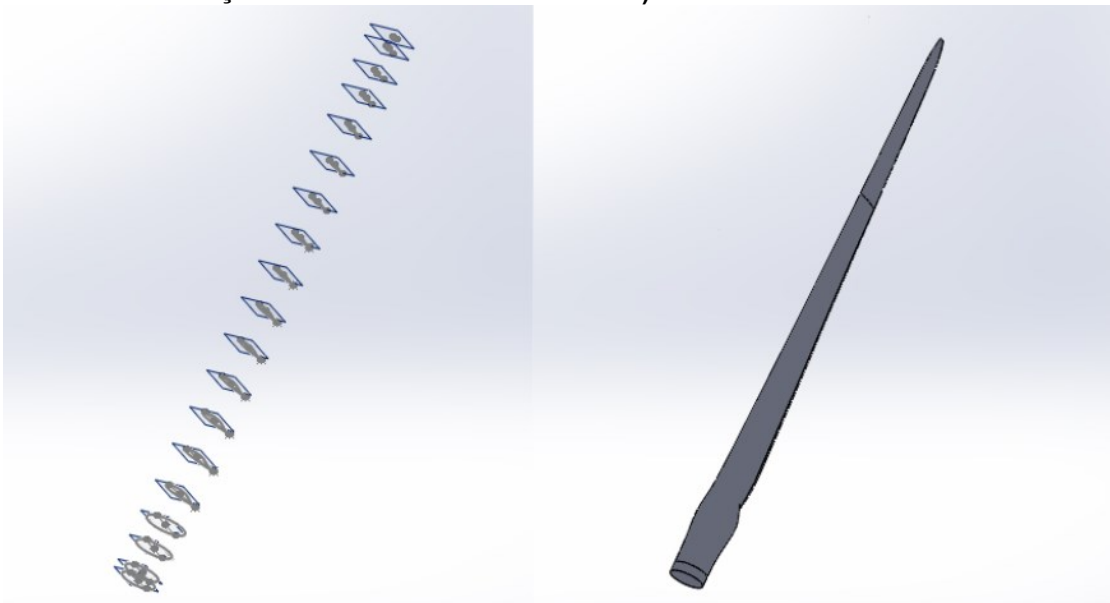
O pós-processamento é basicamente a visualização da análise, plotando graficamente, por tabela ou valores o resultado que se busca avaliar, como força, momento, deflexão, deformação etc.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Pré-processamento

Para a criação do modelo tridimensional da pá eólica em questão, os perfis presentes ao longo do corpo da pá foram desenhados em planos paralelos no *software* SolidWorks, e foram interligados na sequência utilizando o comando “*Lofted Boss/Base*”. Dessa forma, obteve-se um corpo tridimensional, Figura 5, com o formato e as dimensões da pá em estudo.

Figura 5 - Hélice de turbina eólica NREL 5-MW: a) Sequência de 19 planos utilizados para criação de modelo tridimensional e b) modelo tridimensional

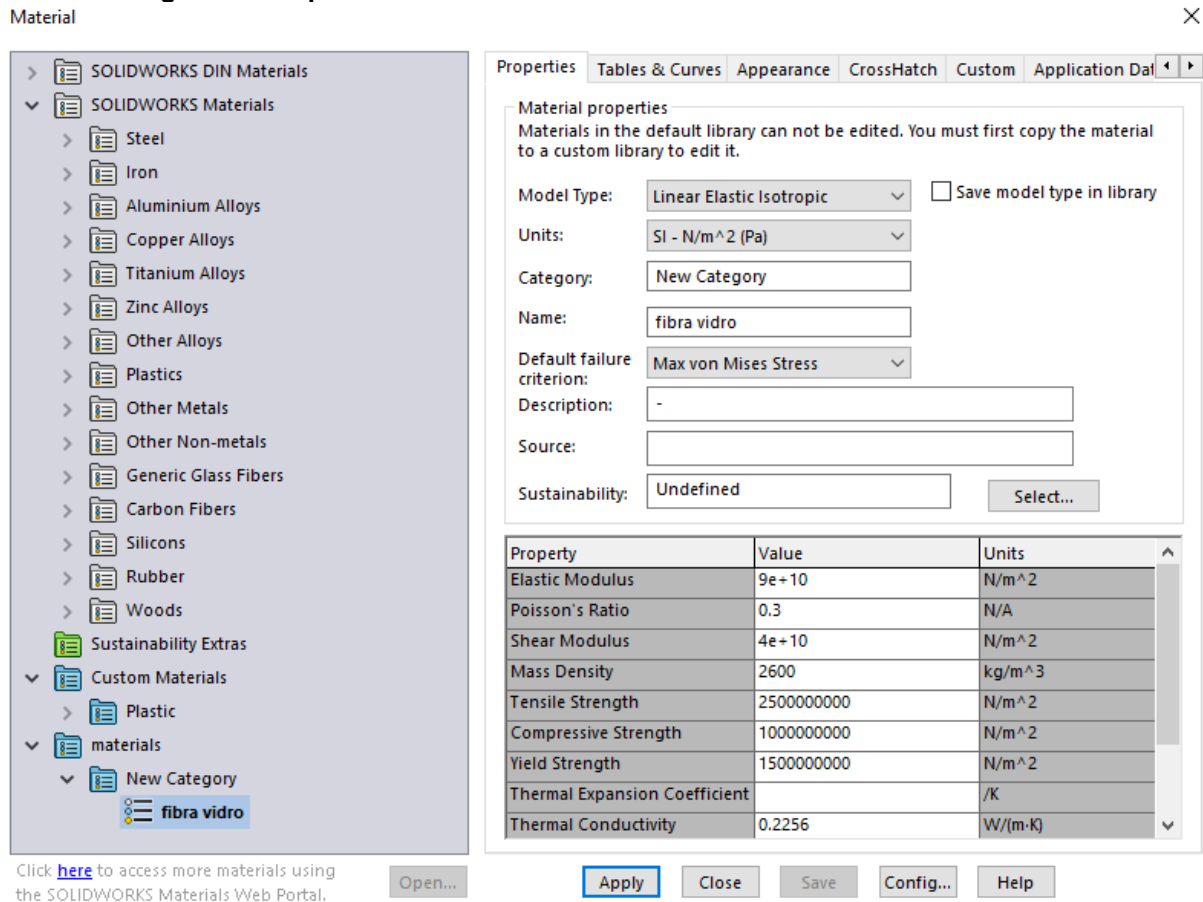


Fonte: Autoria própria

Em geral, as pás eólicas têm como principal matéria prima a fibra de vidro, um material utilizado pela humanidade desde a antiguidade, mas que ganhou mais espaço a partir da Segunda Guerra Mundial. Conhecida por ser um material leve, versátil, com alta resistência mecânica e pouco afetado por oscilações de calor, é o material ideal para a construção das pás, conferindo ao sistema pouco peso, boa resistência e boa durabilidade perante as intempéries climáticas (MALHOTRA, 2018).

Para aplicação no modelo tridimensional, o material foi criado na biblioteca de materiais disponíveis, como na Figura 6, consultando as propriedades mecânicas do material em literatura (KREBS, 2019).

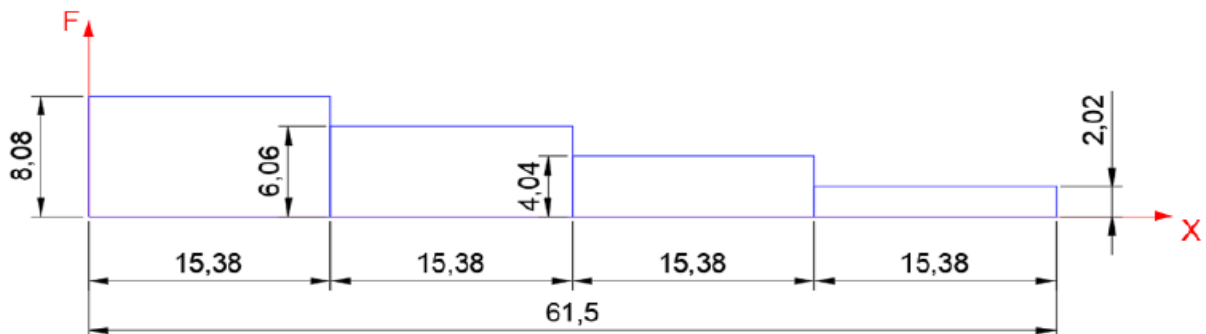
Figura 6 - Propriedades mecânicas da fibra de vidro criada no SolidWorks



Fonte: Autoria Própria

Porém, por questões de processamento computacional, se torna muito difícil realizar a simulação em um modelo 3D fidedigno de uma pá eólica. Sendo assim, é possível lançar mão de um modelo 3D simplificado (PIZZATO, 2023). O perfil proposto mantém as dimensões da pá em questão de comprimento e largura, e tem sua altura diminuindo proporcionalmente ao longo do comprimento. O modelo segue as dimensões descritas na Figura 7:

Figura 7 - Dimensões de modelo simplificado



Fonte: Pizzato, 2008

4.2 Processamento

Com o modelo simplificado pronto, o primeiro passo para começar a simulação é fixar a pá em uma das suas extremidades, de forma semelhante ao que ocorreria em um gerador eólico. A pá foi engastada utilizando o recurso “Engastar”, como se estivesse fixada pela base em uma superfície.

O próximo passo é definir as cargas externas às quais a pá estará submetida. Além da gravidade, as pás eólicas também estão sujeitas à ação do vento. Segundo a NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), a faixa de trabalho ideal para este tipo de turbina é com ventos entre 5 m/s e 25 m/s. Sendo assim, neste trabalho o modelo simplificado da pá será simulado utilizando a mínima velocidade recomendada e a máxima velocidade recomendada.

Desta forma, torna-se necessário calcular a força que o vento exercerá sobre a pá. Para isso, foi utilizada a fórmula (ALEXANDRE, 2020):

$$F = \frac{1}{2} \rho v A C$$

onde,

ρ =densidade do ar, aproximadamente 1,225 kg/m³;

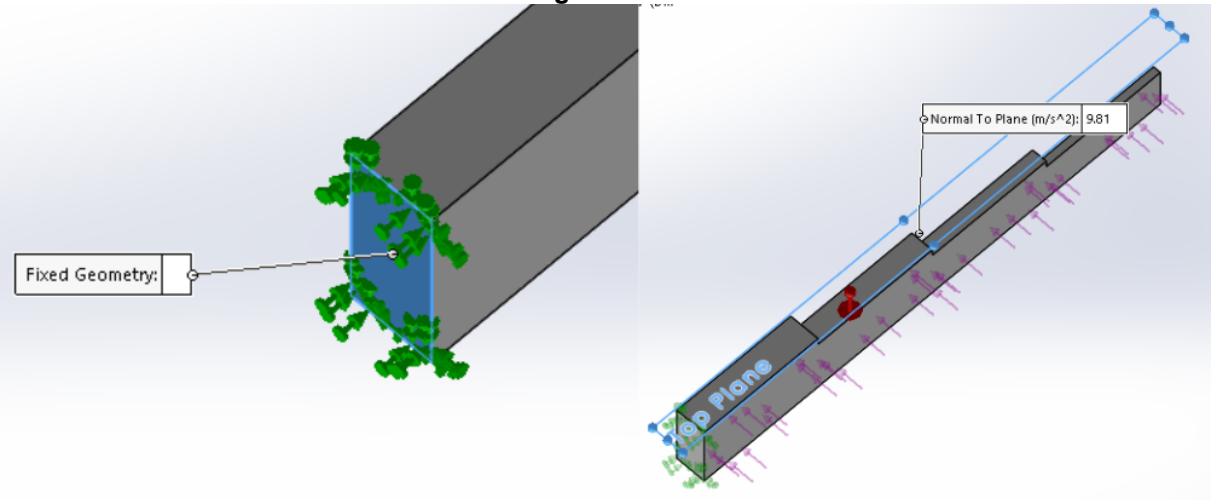
v =velocidade do vento, que será de 5 m/s na condição mínima e 25 m/s na condição máxima;

A =área da pá, sendo dada por 61,5 m x 8 m;

C =coeficiente de arrasto, aproximadamente 1.

Desta forma, a força exercida pelo vento sobre a pá é de 7,6 kN na velocidade mínima e 59,6 kN na chamada velocidade nominal (ideal para trabalho da pá eólica). Além disso, foi considerada também a ação da gravidade sobre a pá, com um valor de 9,81 m/s². Considerando as forças do vento e da gravidade, o modelo foi atualizado para a representação na Figura 8.

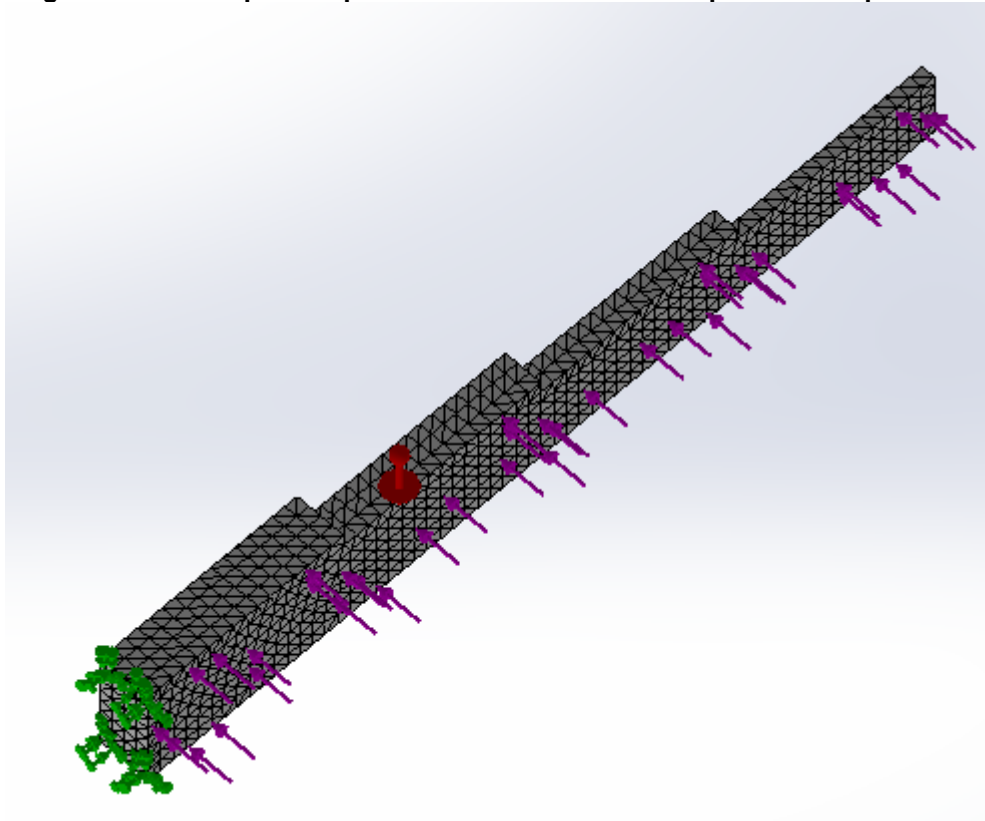
Figura 8 - Modelo simplificado a) com engaste na extremidade e b) com carregamento externo e gravidade



Fonte: Autoria própria

Na sequência, se faz necessário a criação de uma malha para análise da pá. O próprio SolidWorks propõe uma malha para o modelo, considerando a geometria da peça e as condições de contorno envolvidas, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Malha aplicada pelo software ao modelo simplificado de pá eólica



Fonte: Autoria própria

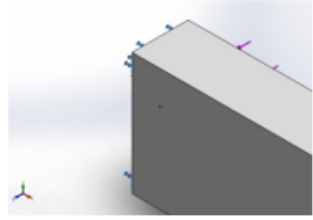
Por fim, o último passo é executar a simulação com o *software*.

4.3 Pós-processamento: Resultados

Gerou-se então um relatório com os resultados da simulação. O primeiro item a ser observado são as reações de apoio da pá engastada no rotor, vide Figura 10. Pode-se notar que a principal reação de apoio é no eixo Z, pois a face da pá exposta ao vento está no plano XY, o que faz com que a força contrária da estrutura atue predominantemente nesse eixo, seguida de uma força significativa no eixo X, devido à variação de massa ao longo da pá, e uma menor força no eixo Y, associada à gravidade. O mesmo comportamento foi observado na pá exposta à velocidade nominal do vento, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 10 - Reações de apoio da pá com a velocidade mínima do vento

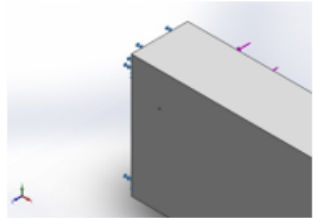
Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fixed-1		Entities: 1 face(s) Type: Fixed Geometry		
Resultant Forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	-3.28748	0.0324402	-7594.93	7594.93
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria

Figura 11 - Reações de apoio na pá exposta à velocidade nominal do vento

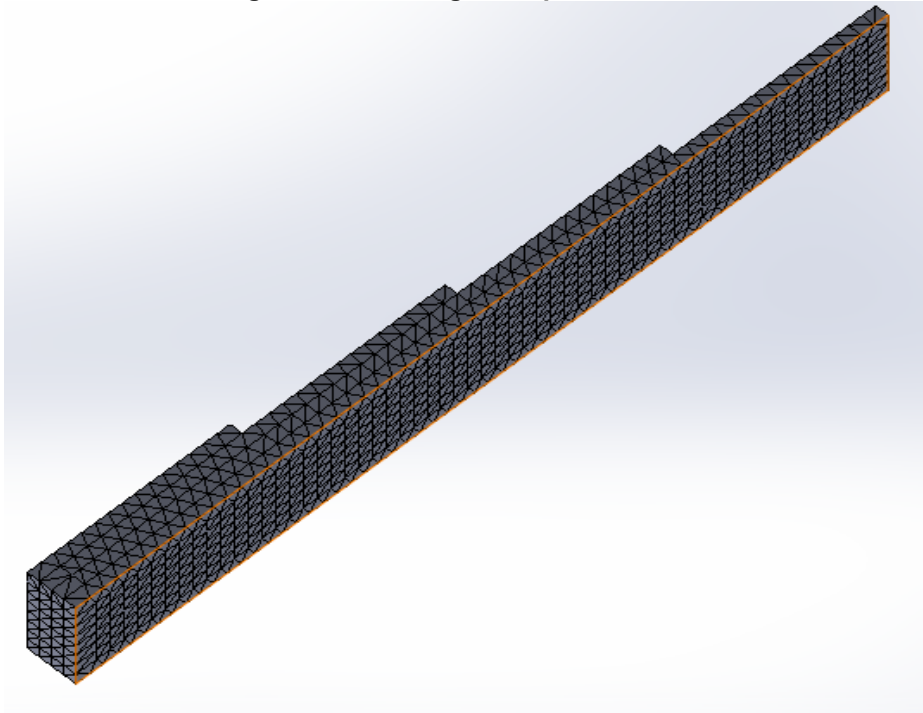
Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fixed-1		Entities: 1 face(s) Type: Fixed Geometry		
Resultant Forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	5602.58	-4515.69	-65592.4	65986
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria

Para ambos os casos, a malha gerada pelo *software*, mostrada na Figura 12, foi composta por 13.220 nós e 8.002 elementos, garantindo um refinamento adequado para a análise estrutural.

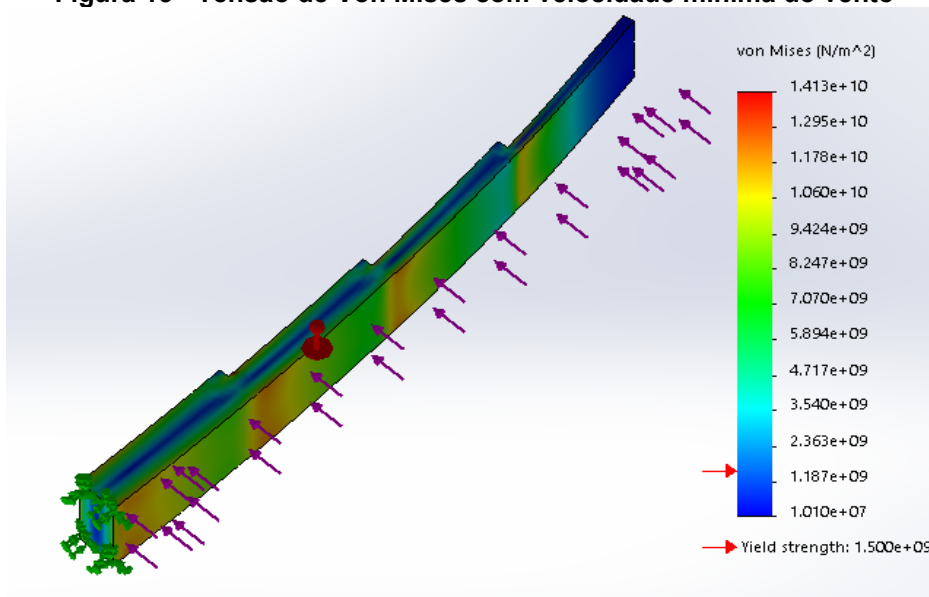
Figura 12 - Malha gerada pelo software



Fonte: Autoria própria

Em relação à tensão de Von Mises, os resultados indicaram que, com vento na velocidade mínima, a maior valor observado foi de $1,41 \times 10^{10}$ N/m², localizada no nó 6515, presente no pé da pá, na face oposta à ação do vento (Figura 13).

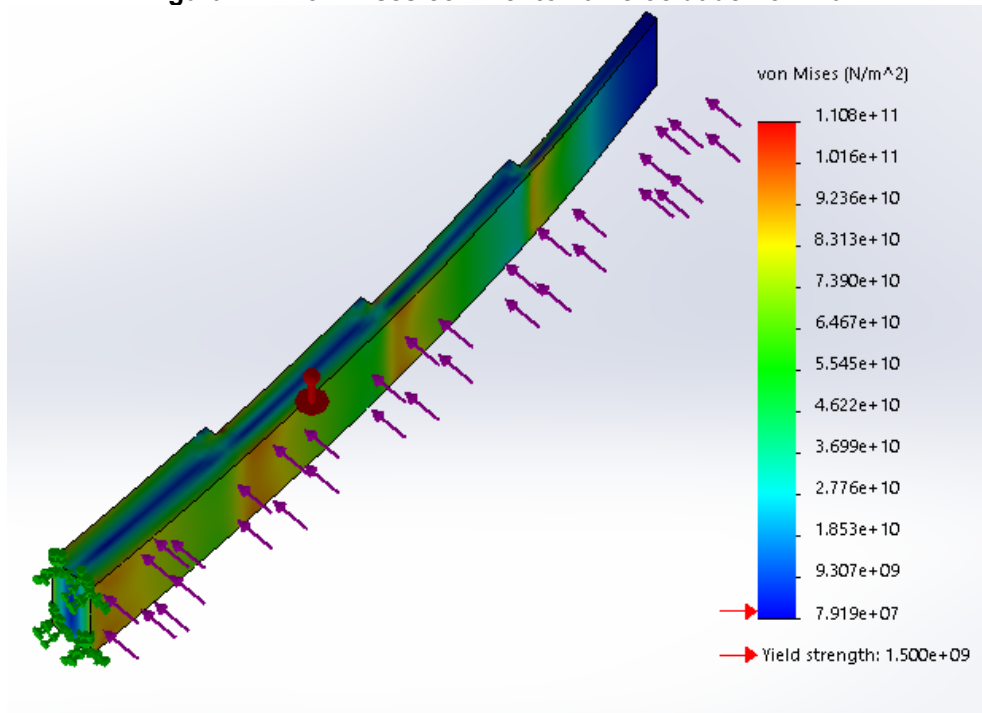
Figura 13 - Tensão de Von Mises com velocidade mínima do vento



Fonte: Autoria própria

Já quando submetida à velocidade nominal do vento, a tensão máxima aumentou para $1,11 \times 10^{11}$ N/m², dessa vez sendo registrada no nó 13112, o que evidencia um aumento dos esforços internos na estrutura, se deformando mais com o vento nessa condição (Figura 14).

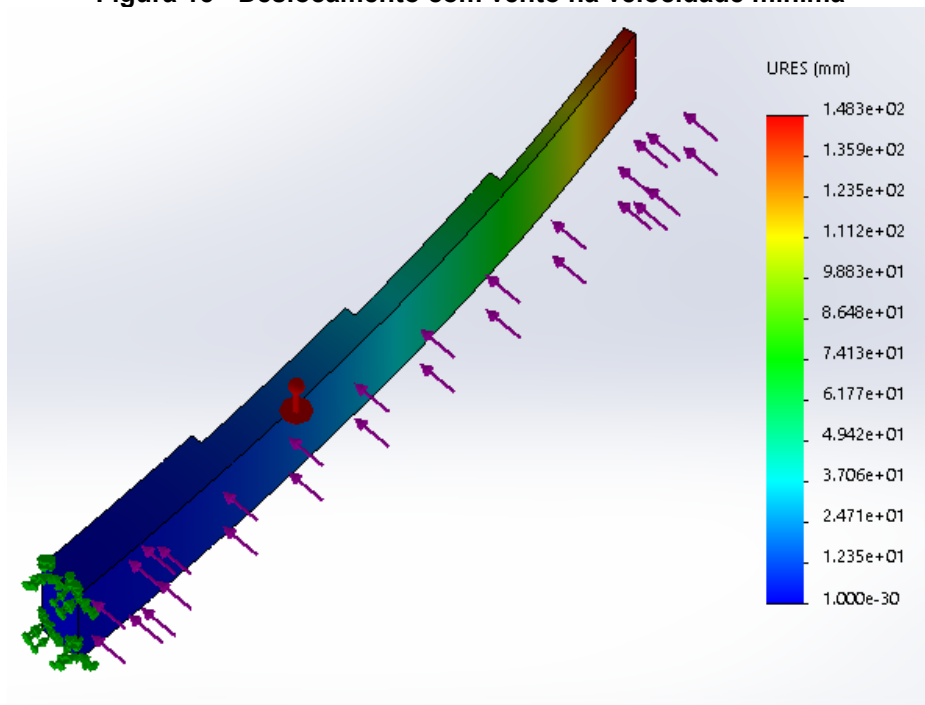
Figura 14 - Von Mises com vento na velocidade nominal



Fonte: Autoria própria

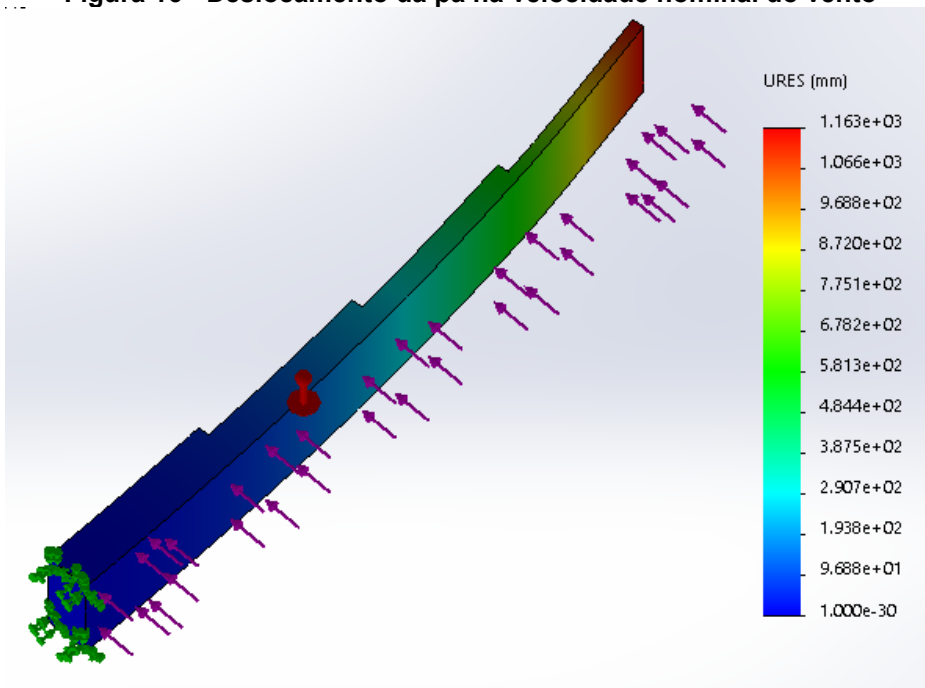
O deslocamento máximo da pá também foi analisado. Na velocidade mínima, a deformação máxima foi de 0,856 mm, enquanto na velocidade nominal atingiu 148,3 mm, sendo ambas registradas no nó 139 (Figuras 15 e 16), o que sugere que a pá se desloca da mesma forma em ambas as solicitações. Esse aumento expressivo no deslocamento demonstra que a estrutura está submetida a flexões significativas em condições de operação normal, exigindo um design robusto para evitar instabilidades ou falhas.

Figura 15 - Deslocamento com vento na velocidade mínima



Fonte: Autoria própria

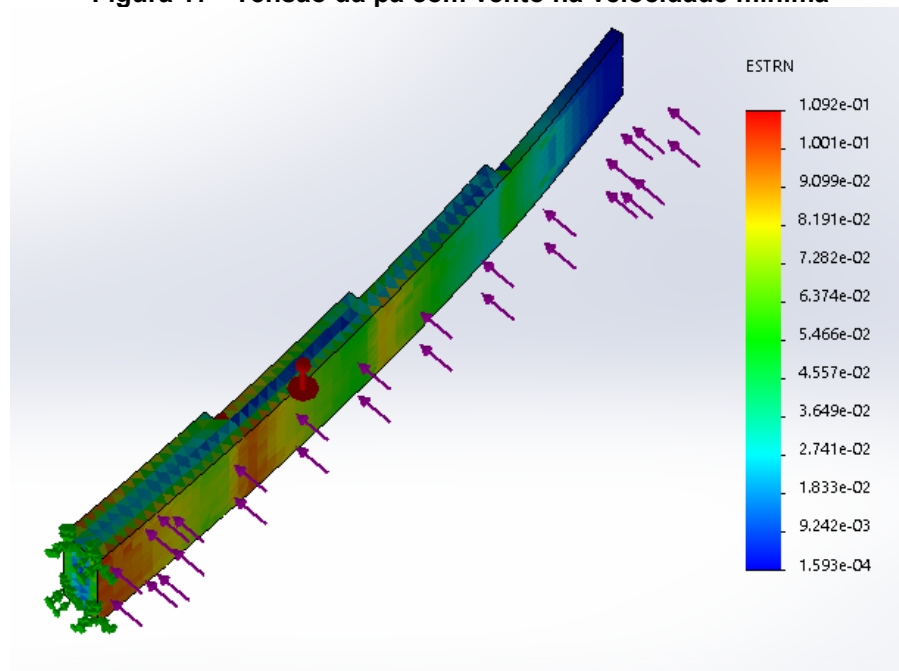
Figura 16 - Deslocamento da pá na velocidade nominal do vento



Fonte: Autoria própria

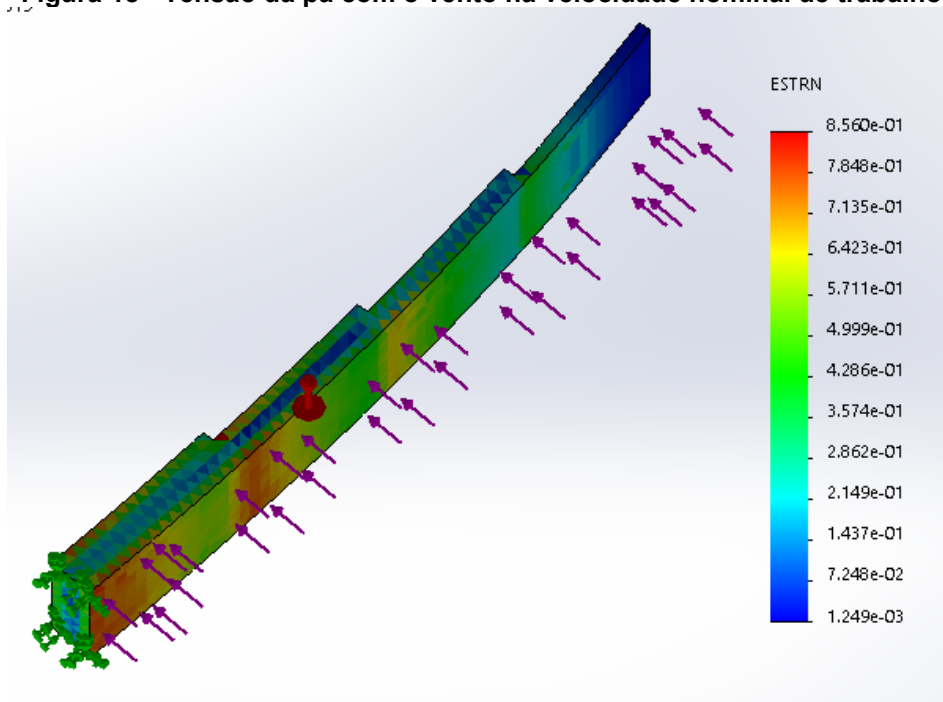
Por fim, a análise da tensão-deformação confirmou essa tendência: na velocidade mínima do vento pode-se notar a deformação de $1,09 \times 10^{-1}$ (nó 4660), enquanto na velocidade nominal chegou a $8,56 \times 10^{-1}$ (nó 4085), ilustrado nas Figuras 17 e 18, devido as diferentes deformações sofridas pela pá nas diferentes velocidades do vento.

Figura 17 - Tensão da pá com vento na velocidade mínima



Fonte: Autoria própria

Figura 18 - Tensão da pá com o vento na velocidade nominal de trabalho



Fonte: Autoria própria

Os valores apresentados indicam que a pá está submetida a tensões e deslocamentos consideráveis durante a operação do aerogerador, com a maior concentração de tensões na base da pá, onde as forças resultantes são mais intensas devido à fixação do rotor, que pode ser um ponto de atenção no decorrer do projeto da mesma para reforços estruturais

Analisando as tensões de Von Mises encontradas, na mínima ($1,41 \times 10^{10}$ N/m²) e na máxima ($1,11 \times 10^{11}$ N/m²), são preocupantemente maiores em comparação com a tensão de escoamento do material, 1500000000 N/m², indicando um possível risco de falha estrutural no projeto, o que vai de acordo com a norma IEC 61400-23, que define requisitos para a análise estrutural de pás de aerogeradores, especificando limites de desempenho e estabelecendo que a estrutura da pá deve ser projetada de forma a resistir às tensões máximas que ocorrem nas condições extremas de carga.

Já para fins de comparação da deformação encontrada, a norma supracitada não fornece um número exato para o deslocamento máximo em termos absolutos, mas é clara que o mesmo não deve afetar negativamente a performance aerodinâmica ou estrutural do aerogerador, logo uma deformação de 148,3 mm na velocidade nominal pode ser uma preocupação dependendo do design da pá.

Destacando assim a importância da escolha de materiais e da otimização do design para garantir a integridade, o aumento da sua vida útil e reduzindo custos com manutenção e falhas prematuras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho se propôs a avaliar o comportamento estático da pá de um aerogerador horizontal, quantificando parâmetros como deslocamentos, tensões, esforços internos e reações de apoio por meio da análise por elementos finitos. A metodologia aplicada permitiu compreender como a pá se comporta sob diferentes condições de carregamento, informações fundamentais para a garantia que seu design e estrutura seja capaz de resistir aos esforços aos quais será submetida.

Fica claro que as tensões e deslocamentos aumentam com a elevação da velocidade do vento, evidenciando a necessidade de um projeto estrutural robusto a fim de resistir a este esforço variável. A aplicação do MEF possibilitou visualizar a distribuição das tensões ao longo da pá, permitindo identificar regiões que demandam maior atenção no processo de dimensionamento e fabricação. Tais análises contribuem para um planejamento estrutural que pode minimizar custos com manutenção e evitando falhas prematuras.

A análise das tensões de Von Mises indicou que os valores obtidos ultrapassam os limites admissíveis do material, sugerindo um risco potencial de falha estrutural. A análise dos deslocamentos demonstrou que, em velocidades nominais do vento, a pá apresenta uma deformação significativa, o que pode comprometer sua eficiência aerodinâmica. Além disso, a distribuição das tensões revelou uma alta concentração de esforços na base da pá, evidenciando a necessidade de reforço estrutural. Diante desses fatores, conclui-se que ajustes no design, otimização de materiais e a realização de uma análise de fadiga são essenciais para garantir a conformidade com a norma IEC 61400-23:2001 e a segurança estrutural da pá

Com isso, podemos a partir dos resultados entender pontos de melhorias para os projetos e estudos futuros, como por exemplo:

- Reavaliar a seleção do material, considerando compósitos de maior resistência ou reforços estruturais na base da pá.
- Otimizar a geometria da pá, reduzindo deslocamentos e redistribuindo esforços para evitar falhas localizadas.
- Análise dinâmica necessária, principalmente para analisar a fadiga, simulando ciclos de carregamento ao longo da vida útil da pá para garantir sua confiabilidade.

Assim, este trabalho contribui para a compreensão do comportamento estrutural de uma pá eólica e destaca a importância da engenharia mecânica na busca por soluções mais sustentáveis e inovadoras no setor de geração de energia. Estudos futuros podem aprofundar a investigação considerando análises dinâmicas, fadiga estrutural e otimização de materiais para aprimorar ainda mais o desempenho das pás de aerogeradores.

REFERÊNCIAS

ABREU, J. F. A. C. *Estudo computacional via ANSYS de vigas, arcos e anéis com restrições de contato impostas por bases elásticas*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. **Disponível em:** http://www.propec.ufop.br/uploads/propec_2016/teses/arquivos/dissertacao-joao-felipe-a-c-de-abreu-rev6.pdf. **Acesso em:** 05 jun. 2022.

ALEXANDRE, J. A. *Física para Engenharia*. 2. ed. São Paulo: XYZ, 2020.

ALMEIDA, M. S. *Implementação computacional para desenvolvimento de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. **Disponível em:** <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/4765>. **Acesso em:** 05 jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). *Anuário de Energia Eólica 2022*. 2023. **Disponível em:** <https://www.abeeolica.org.br>. **Acesso em:** 08 set. 2024.

BORESI, A. P.; CHONG, K. P. *Elasticity in Engineering Mechanics*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

BOUJLEBEN, A.; IBRAHIMBEGOVIC, A.; LEFRANÇOIS, E. An efficient computational model for fluid-structure interaction in application to large overall motion of wind turbine with flexible blades. *Elsevier Inc.*, v. 77, p. 392-407, jan. 2020.

CPFL ENERGIA. *Projeto de P&D: Panorama e Análise Comparativa da Tarifa de Energia Elétrica do Brasil com Tarifas Praticadas em Países Selecionados, Considerando a Influência do Modelo Institucional Vigente*. Relatório V – Formação de Custos e Preços de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 2015.

Disponível em:

<https://www.cpfl.com.br/energiasustentaveis/inovacao/projetos/Documents/PB3002/formacao-de-custos-e-precos-de-geracao-etransmissao.pdf>. **Acesso em:** 28 out. 2024.

CUNNINGHAM, J. A.; DYER, J. P. *Composite Materials: Science and Engineering*. 1. ed. New York: Springer, 2009.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. *Um Primeiro Curso em Elementos Finitos*. Grupo GEN, 2009. ISBN 978-85-216-1941-3. **Disponível em:**

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1941-3/>. **Acesso em:** 06 jun. 2022.

GUTIERREZ, F.; CARVALHO, A. *Energia Eólica: Tecnologia e Aplicações*. Belo Horizonte: UFMG, 2021.

JONKMAN, S. et al. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. *National Renewable Energy Laboratory*, Technical Report, NREL/TP-500-3800, fev. 2009. **Disponível em:**

<https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/38060.pdf>. **Acesso em:** 05 jun. 2022.

- LOPES, R. A.** *Energia eólica*. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2012.
- MALHOTRA, A. C.; YADAV, S. P.** *Fibra de vidro: propriedades, aplicações e tecnologia de fabricação*. São Paulo: Blucher, 2018.
- MASE, G. T.; MASE, G. E.** *Continuum Mechanics for Engineers*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- MOURA, A. S.** *Avaliação de metodologias de projeto de fundações superficiais de aerogeradores assentes em areia de duna*. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília.
- MOURA, J. D. F.** Aumento da eficácia na geração de energia elétrica proveniente dos parques eólicos em decorrência da crise hídrica no Brasil. *Revista Valore*, v. 7, p. 111-120, mar. 2022. ISSN 2526-043X. **Disponível em:** <https://revistavalore.emnuvens.com.br/valore/article/view/1084/839>. **Acesso em:** 04 jun. 2022.
- NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL).** *The Design and Performance of the NREL 5-MW Wind Turbine: The Design, Manufacturing, and Testing of the NREL 5-MW Wind Turbine Blade*. Golden: NREL, 2010. **Disponível em:** <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47434.pdf>. **Acesso em:** 14 ago. 2024.
- PINTO, M. O.** *Energia Eólica - Princípios e Operação*. São Paulo: Saraiva, 2019. ISBN 978-85-365-3222-6. p. 151-179. **Disponível em:** <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-365-3222-6/>. **Acesso em:** 06 jun. 2022.
- POPOV, E. P.** *Engineering Mechanics of Solids*. 2. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1999.
- RADE, D. A.** *Método dos elementos finitos aplicados à engenharia mecânica*. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- RIBEIRO, J. C.; SANTOS, M. C.** *Energias renováveis: um caminho para a sustentabilidade*. São Paulo: Atlas, 2020.
- SILVA, J. A.; PEREIRA, L. B.** *Custos de operação e manutenção em parques eólicos*. São Paulo: Manole, 2021.
- SIMIU, E.; SCANLAN, R. H.** *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design*. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- TOLMASQUIM, M. T.** *Energia renovável no Brasil: análise e perspectivas*. Rio de Janeiro: Sinergia, 2020.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC).** *IEC 61400-23:2001 – Wind turbine generator systems – Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades*. Genebra: IEC, 2001.