



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

DYLAN DA SILVA SANTOS

DESCRIÇÃO DE ALGUNS FATORES RESPONSÁVEIS PELA GERAÇÃO DE
ENERGIA EÓLICA: REGIME DOS VENTOS, ENERGIA DOS VENTOS,
AEROGERADOR E PÁS

FORTALEZA

2022

DYLAN DA SILVA SANTOS

**DESCRIÇÃO DE ALGUNS FATORES RESPONSÁVEIS PELA GERAÇÃO DE
ENERGIA EÓLICA: REGIME DOS VENTOS, ENERGIA DOS VENTOS,
AEROGERADOR E PÁS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Igor Frota de Vasconcelos

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S234d Santos, Dylan da Silva.
Descrição de alguns fatores responsáveis pela geração de energia eólica : regime dos ventos, energia dos ventos, aerogerador e pás / Dylan da Silva Santos. – 2022.
47 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Igor Frota de Vasconcelos.

1. Ventos . 2. Energia . 3. Aerogerador . 4. Pás . 5. Defeitos. I. Título.

CDD 669

**DESCRIÇÃO DE ALGUNS FATORES RESPONSÁVEIS PELA GERAÇÃO DE
ENERGIA EÓLICA: REGIME DOS VENTOS, ENERGIA DOS VENTOS,
AEROGERADOR E PÁS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: 16/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Igor Frota de Vasconcelos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Estadual do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Viviane e Jerfersson.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Viviane Santos e Jerfersson Santos, por me darem a vida e poder desfrutar de um mundo tão incrível quanto esse.

Agradeço aos meus amigos Joel Lima, Francisco Carlos, Francisco Willian, Vitor Dantas, Breno Lucena, Victória Barroso, Vitória Lima por terem me acompanhado nessa graduação e compartilhado comigo todos os conhecimentos e experiências de vida. Cada um de vocês me ajudou a se tornar quem sou hoje e quem irei ser futuramente. Todos vocês são fontes de inspiração para mim e ainda continuam sendo.

Agradeço a minha futura esposa Ravenna de Freitas por todo o companheirismo ao longo de toda a graduação e por me dar forças nos momentos que mais precisei.

Agradeço ao Elizeu Canuto por sempre me motivar nas aulas do cursinho, ao Elvis Marreira por ser uma grande referência profissional, ao Érico Carlos por me ajudar desde o ensino médio, ao André Valadares por ser uma grande referência como gestor e ao Rafael Medeiros por ser um exemplo de crescimento profissional.

Ao Prof. Dr. Igor Frota de Vasconcelos, pela excelente orientação. Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira e Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

“Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos gigantes.” (Isaac Newton).

RESUMO

O crescente avanço na mudança da matriz energética pelo mundo, trouxe a energia eólica como um dos principais meios dessa transformação. A energia eólica, por estar presente no mundo inteiro tanto em terra firme quanto no mar, ganha espaço e mercado para ser uma das melhores opções na geração de energia. Na busca da utilização dessa energia alguns fatores como a formação dos ventos, regime dos ventos, energia potencial dos ventos, aerogerador e pás são importantes para viabilizar seu uso. Esse presente trabalho visa descrever cada um desses fatores de modo sucinto, trazendo pontos-chave relevantes para a escolha de possíveis localizações para a instalação de parques eólicos, descrever o modelo matemático utilizado para encontrar a equação da energia potencial dos ventos, evidenciar o atual cenário do Brasil com relação à utilização de energia eólica, descrever os principais componentes de um aerogerador, explicar como é produzida uma pá eólica e os principais defeitos de fabricação, encontradas nas mesmas em campo. Para a descrição dos principais defeitos encontrados em parques foi utilizada uma base de dados cedida por uma empresa que realiza auditorias em pás eólicas antes de sua montagem nas torres e até mesmo após anos de funcionamento. Foram avaliados dados de 13 parques eólicos espalhados pelo Brasil. Ao todo foram avaliados mais de 17300 defeitos em mais de 1400 pás. Foram identificados os cinco defeitos mais frequentes encontrados em pás eólicas em parques. Além disso, foi identificado também os defeitos de maior frequência, com o potencial de causar um colapso nas torres devido falhas na fabricação das pás.

Palavras-chave: Ventos, Energia, Aerogerador, Pás, Defeitos.

ABSTRACT

The growing advance in the change of the energy matrix around the world has brought wind energy as one of the main means of this transformation. Wind energy, for being present all over the world both on firm land and sea, is gaining space and market to be one of the best options in energy generation. In the search for the use of this energy some factors such as wind formation, wind regime, wind potential energy, wind turbine and blades are important to make its use viable. This paper aims to describe each of these factors briefly, bringing relevant key points for the choice of possible locations for the installation of wind farms, describe the mathematical model used to find the equation of potential wind energy, highlight the current scenario in Brazil regarding the use of wind energy, describe the main components of a wind turbine, explain how a wind blade is produced and the main manufacturing defects found in them in the field. For the description of the main defects found in wind farms we used a database provided by a company that audits wind blades before they are mounted on towers and even after years of operation. Data from 13 wind farms scattered around Brazil were evaluated. In all, more than 17300 defects in more than 1400 blades were evaluated. The five most frequent defects found in wind turbine blades in wind farms were identified. In addition, we also identified the most frequent defects with the potential to cause a collapse of the towers due to flaws in the blade manufacturing.

Keywords: Wind, Energy, Wind turbine, Blades, Defects.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | OBJETIVOS | 15 |
| 2.1 | Objetivo principal | 15 |
| 2.2 | Objetivo secundário | 15 |
| 3 | FORMAÇÃO DOS VENTOS | 16 |
| 4 | FATORES DE INFLUÊNCIA NO REGIME DOS VENTOS | 17 |
| 4.1 | Influência da altura na velocidade dos ventos | 17 |
| 4.2 | Rugosidade do terreno | 18 |
| 4.3 | Obstáculo do terreno | 19 |
| 4.4 | Efeito Colina | 19 |
| 4.5 | Condições marítimas | 20 |
| 5 | ENERGIA DOS VENTOS | 20 |
| 6 | DADOS DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL | 25 |
| 7 | AEROGERADOR | 28 |
| 7.1 | Torre | 29 |
| 7.2 | Nacele | 30 |
| 7.3 | Pás | 30 |
| 7.4 | Rotor | 32 |
| 8 | MATERIAL COMPÓSITO | 33 |
| 8.1 | Matrizes poliméricas | 34 |
| 8.2 | Reforços | 35 |
| 8.2.1 | <i>Fibras de vidro</i> | 35 |
| 9 | ESTRUTURA DE UMA PÁ EÓLICA | 36 |
| 9.1 | Pré-fabricados | 35 |
| 9.1.1 | <i>Almas</i> | 36 |
| 9.1.2 | <i>Raízes</i> | 38 |
| 9.1.3 | <i>Spar Caps</i> | 39 |
| 9.2 | Cascas | 40 |
| 9.3 | Processo de fabricação | 41 |
| 9.4 | Defeitos de fabricação | 43 |
| 10 | CONCLUSÃO | 49 |
| 11 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 50 |

1 INTRODUÇÃO

O mercado eólico é um mercado em expansão no mundo inteiro devido ser uma forma de produzir energia de forma limpa e sustentável. No Brasil essa tendência tem ganhado espaço cada vez mais. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) desde 2005 quando a representação da energia eólica era de apenas 22,1 MW o Brasil tem acompanhado o crescente no desenvolvimento e uso dessa forma de geração de energia até os dias atuais em que a representação dessa forma de energia chega aos patamares de 21.576,8 MW.

As pás para o aerogerador são componentes fundamentais para a geração dessa forma de energia. A sua forma, tamanho, perfil aerodinâmico, peso e momento são de grande relevância para que uma torre tenha maior capacidade de aproveitamento da energia presente no movimento dos ventos.

Entendendo o quão fundamental é uma pá eólica para um aerogerador, esse trabalho tem como objetivo avaliar os tipos de defeitos que são encontrados nelas quando chegam ao seu destino, o parque eólico. Entender as condições de como esses componentes se encontram quando estão momentos antes de serem montados é de fundamental importância para ter compreensão da vida útil do aerogerador além de prevenir possíveis colapsos durante seu funcionamento.

Ao longo dos anos as pás estão aumentando de tamanho, a fim de poderem gerar uma maior quantidade de energia. Assim, faz-se ainda mais necessário entender as condições desses componentes, por terem maior possibilidade de apresentarem defeitos espalhados ao longo de toda a sua extensão.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

- Descrever os fatores responsáveis pela geração de energia eólica.

2.2 Objetivos secundários

- Explicar a formação dos ventos e os fatores que o influenciam;
- Exibir o cenário eólico no Brasil;
- Descrever os componentes de um aerogerador;
- Explicar o processo de produção de pás;
- Demonstrar algumas estatísticas de defeitos encontrados em campo nas pás.

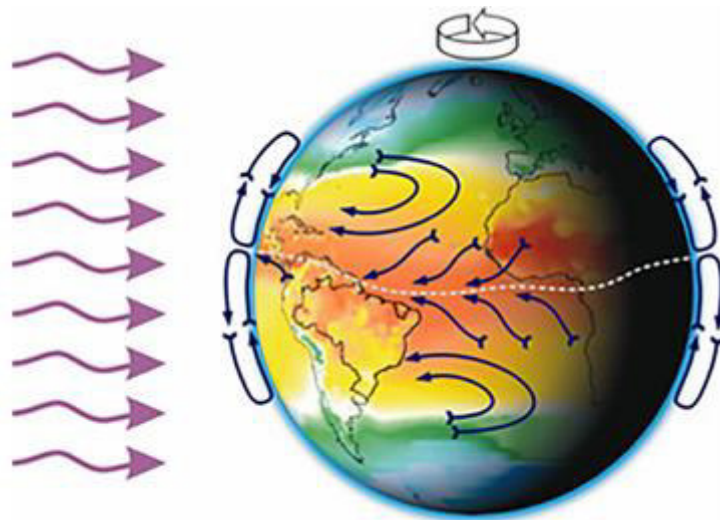
3 FORMAÇÃO DOS VENTOS

A energia eólica é influenciada diretamente pela energia solar. A geração do vento ocorre por meio de um aquecimento irregular da atmosfera pela influência do sol. A atmosfera sofre aquecimento desigual porque os raios solares incidentes se distribuem de forma não uniforme sobre a superfície terrestre e devido ao movimento de rotação do planeta (NEVES et al., 2009).

Devido ao formato esférico do planeta, as regiões tropicais recebem quase que de forma perpendicular a radiação incidente o que torna essas regiões mais aquecidas que as regiões polares (DUTRA, 2008). O aquecimento do ar nessas regiões tropicais o torna mais leve, permitindo a ascensão desse ar para camadas superiores. Com isso o espaço deixado é ocupado logo em seguida por frentes de ar menos aquecidas. Esse deslocamento é o que caracteriza a formação dos ventos (AMARANTE et al., 2001). O processo descrito também é conhecido como convecção térmica, em que a energia térmica é transmitida pelo transporte de matéria.

A Figura 1, representa os mecanismos de aquecimento e formação dos ventos no planeta.

Figura 1 – Mecanismo de formação dos ventos.



Fonte: AMARANTE et al. (2001)

O vento possui muitas variações ao redor do mundo, alguns locais apresenta maior presença de ventos do que outros. Essas diferenças são explicadas em grande parte devido à

latitude, que afeta diretamente a quantidade de insolação na superfície terrestre. Em qualquer região climática existe uma grande variação em menor escala que é determinada pela geografia física da região. Essa variação depende da proporção entre terra e o mar, o tamanho das massas de terra e a influência de montanhas e planícies. Além disso, a vegetação também pode influenciar devido à absorção e reflexão da radiação solar o que acaba por esfriar a superfície (BORTON et al., 2001).

4 FATORES DE INFLUÊNCIA NO REGIME DOS VENTOS

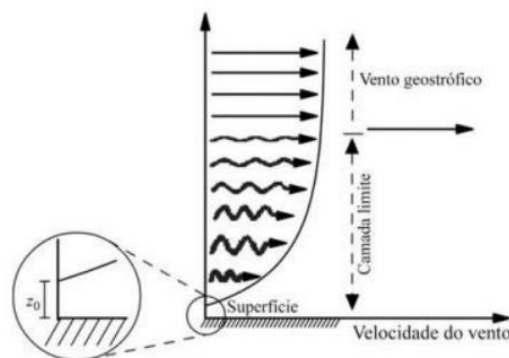
Alguns fatores têm ação direta no que diz respeito à velocidade do vento em determinadas regiões. Fatores como altura, rugosidade do terreno, obstáculos do terreno, efeito colina e condições marítimas são os principais agentes de influência sobre os ventos.

4.1 Influência da altura na velocidade dos ventos

O compartimento dos ventos pode ser visto como o de um fluido e para fluidos, a velocidade aumenta à medida que se afastam de obstáculos que o delimitam. Com isso, a velocidade do vento é intensificada com a variação da altura em relação à superfície da Terra, de modo que depende também da rugosidade do terreno que é determinada pelo grau de irregularidade do terreno (PESTANA, 2016).

Na relação entre força dos ventos e altura, a mesma pode ser dividida em três regiões, a superfície, camada limite e o vento geostrófico. A Figura 2, demonstra a relação da velocidade com a altura.

Figura 2 – Relação da velocidade do vento com a altura.



Fonte: HENRIQUES (2012).

As turbinas eólicas são instaladas com altura dentro da camada limite. A camada limite apresenta ventos com escoamento turbulento e é influenciada por fatores distintos como, velocidade do escoamento, massa específica do flúido, viscosidade do fluido, acabamento da superfície (rugosidade), a forma da superfície (presença de curvaturas e obstáculos).

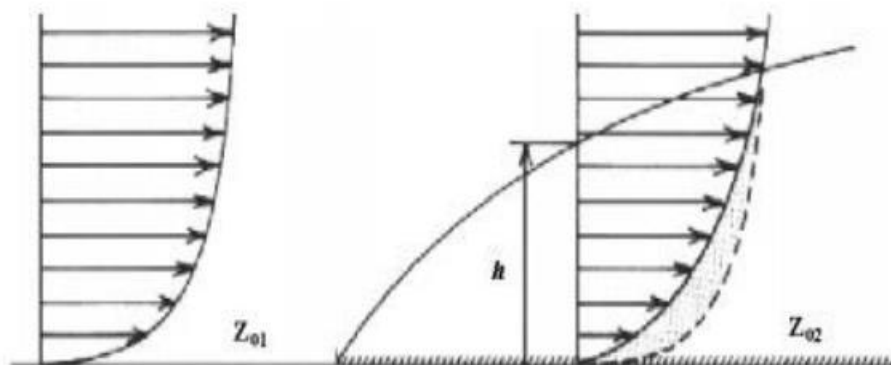
4.2 Rugosidade do terreno

A rugosidade do terreno causa a diminuição da velocidade do vento devido à dissipação de energia pela fricção ou obstáculos que se opõem ao seu movimento. De modo geral, quanto menores são esses fatores de rugosidade, maior será a energia do vento disponível na região (PESTANA, 2016).

Uma região com um bosque denso ou mesmo região com uma grande quantidade de prédios são fatores que podem causar o aumento da rugosidade e conseqüente abrandamento dos ventos, isso representa uma classe de rugosidade de 3 a 4. Para termos de comparação, o mar representa um grau de rugosidade nula, um aeroporto ou planícies representam um grau de rugosidade de 0,5 a 1 (PESTANA, 2016).

A Figura 3, representa a influência da rugosidade na superfície Z_{01} e Z_{02} , onde a rugosidade em $Z_{01} < Z_{02}$ e como isso altera a velocidade do vento. A altura h é a representação da camada limite que varia com a distância x .

Figura 3 – Relação da velocidade do vento com a rugosidade.



Fonte: SILVA (1999).

4.3 Obstáculo do terreno

Os tipos de obstáculos mais comuns que alteram a velocidade dos ventos são, edifícios, árvores e formações rochosas. Quando o vento colide com esses obstáculos formam-se turbulências ao seu redor. Grande parte dessas turbulências encontram-se após ultrapassar o obstáculo e podem ser propagadas em até 3 vezes o tamanho do obstáculo. Por conta disso é procurado evitar esses tipos de obstáculos em regiões de possível instalação de parques eólicos (PESTANA, 2016).

Para efeitos de comparações, os obstáculos são caracterizados como “caixas” de seção transversal retangular. Para entender a influência de um obstáculo no perfil de velocidade do vento deve ser considerada a posição relativa do obstáculo ao ponto de interesse, suas dimensões e por fim sua porosidade. A porosidade pode ser definida como a relação entre a área livre e a área total do obstáculo, que pode ser determinada de acordo com a tabela 1 (SILVA, 1999).

Tabela 1 – Porosidade dos obstáculos.

| Descrição | Porosidade |
|---|-------------------|
| Edifícios | 0.00 |
| Fila de edifícios separados de 1/3 do comprimento | 0.33 |
| Árvores | 0.50 |
| Quebra-ventos muito densos | ≤ 0.35 |
| Quebra-ventos densos | 0.35 – 0.50 |
| Quebra ventos abertos | ≥ 0.50 |

Fonte: SILVA (1999).

4.4 Efeito Colina

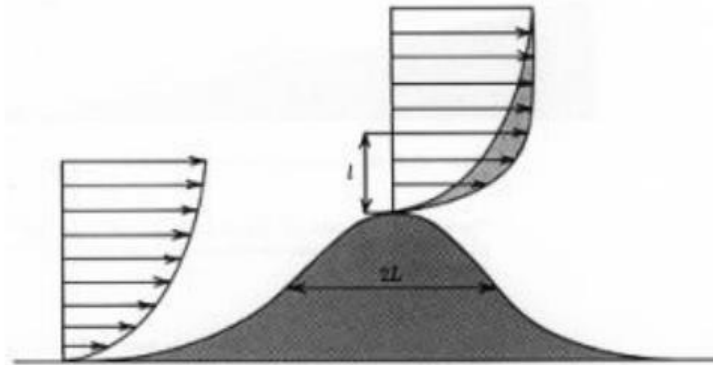
A colocação de um aerogerador no pico de uma colina fornece uma maior eficiência para a produção de energia pois em locais como esse a velocidade do vento é maior. Isso acontece porque nessas regiões existem poucas interferências de obstáculos prevalecendo assim uma maior energia potencial dos ventos.

Para colinas que apresentam uma superfície muito irregular a geração de turbulência é inevitável, que por sua vez prejudica a eficiência energética da região.

A figura 4 mostra como o vento se propaga em regiões que apresentam colinas.

Nela pode-se observar que à medida que o vento se aproxima do pico a velocidade do vento aumenta, porém ocorre muita variação de velocidade. No pico além da velocidade do vento ser maior ocorre pouca variação de velocidade pela ausência de obstáculos.

Figura 4 – Variação da velocidade do vento com a altura de uma colina.



Fonte: SILVAS (1999).

4.5 Condições marítimas

Como mencionado anteriormente, em regiões marítimas a rugosidade é praticamente nula por não apresentar obstáculos à passagem dos ventos. Nessas regiões ainda é possível ter obstáculos devido a geração de ondulações na superfície da água devido ação dos ventos, porém a camada limite formada tem uma altura mínima, que convencionamos a rugosidade zero para essas regiões.

A consequência da baixa rugosidade é a possibilidade de ventos com velocidades mais estáveis, não dependendo diretamente da altura. Isso possibilita a construção de torres mais baixas, com cerca de 0,75 o diâmetro do rotor (PESTANA, 2016).

Devido baixas turbulências nessas regiões, a expectativa de vida das torres é aumentada com relação a aerogeradores localizados em terra firme.

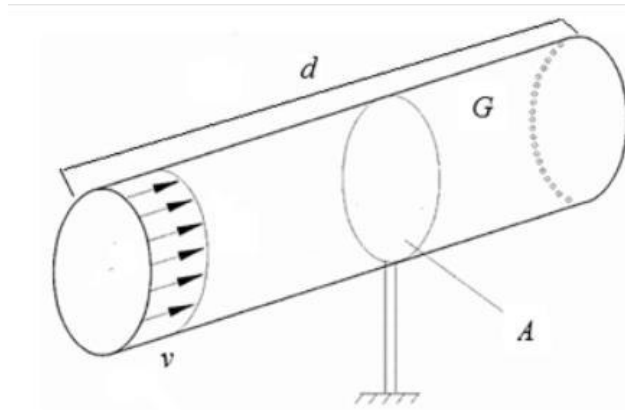
5 ENERGIA DOS VENTOS

A energia eólica que é transformada pelos aerogeradores depende da velocidade dos ventos, que por sua vez é representada pela energia cinética E dada por:

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

Na equação 1, temos que m é a massa da coluna de vento e v é a velocidade do vento. Considerando a figura 5, ela representa a passagem do vento por um aerogerador. A geometria G equivale a um cilindro de área transversal A , e comprimento d .

Figura 5 – Geometria G atravessada por um fluido de velocidade v .



Fonte: PICOLE; RÜHLER; RAMPINELLI (2014).

O volume do cilindro é dado como o produto da área transversal A pela distância d . Considerando que esse cilindro está sendo atravessado por um fluido de velocidade v , então a distância d pode ser escrita como a velocidade desse fluido em função do tempo.

$$V = A \cdot d = A \cdot v \cdot t \quad (2)$$

Derivando em função do tempo a equação 2 é obtido a vazão desse fluido ao longo de toda a geometria G .

$$Q = \frac{dV}{dt} = A \cdot v \quad (3)$$

Considerando um regime de escoamento permanente e incompressível, o fluxo de massa que percorre a geometria G pode ser dada por:

$$\Phi m = \frac{dm}{dt} = \rho \cdot v \cdot A \quad (4)$$

Onde Φm representa o fluxo de massa e ρ a massa específica do ar. A partir das equações acima a energia cinética E pode ser reescrita da seguinte forma:

$$E = \frac{1}{2}\rho.V.v^2 = \frac{1}{2}\rho.A.v.t.v^2 = \frac{1}{2}\rho.A.t.v^3 \quad (5)$$

Como a potência é a taxa de variação da energia em função do tempo, a equação 5 pode ser derivada em função do tempo para a obtenção da potência do vento.

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}\rho.A.v^3 \quad (6)$$

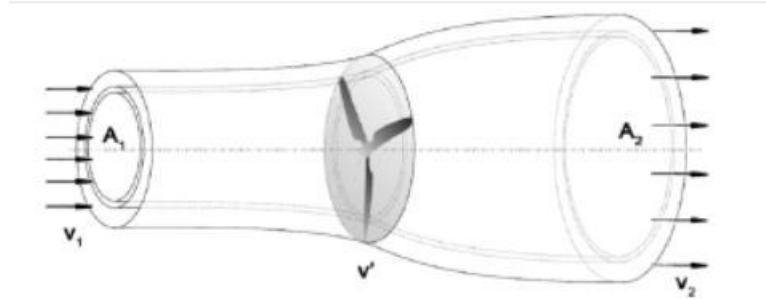
A equação 6 representa a potência do vento disponível em uma dada região. Nela é observada a forte dependência dos ventos de forma que a potência é proporcional ao cubo da velocidade v e a área A varrida pelas pás do aerogerador. Por esse motivo é importante a escolha de uma região que apresente velocidades constantes de vento para a instalação de parques eólicos.

Mesmo que a equação 6 represente a potência total disponível do vento, essa potência não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador. O físico alemão Albert Benz em 1919 demonstrou de forma científica o fator de potência máxima que poderia ser aproveitado de um aerogerador (REBELO; SILVA, 2009).

Albert Benz entendia que uma corrente de ar ao passar pelo rotor do aerogerador, parte de sua energia cinética seria transformada e a outra parte seguiria com o vento. Com isso, considerando um fluxo de massa inalterada a velocidade de escoamento após o conversor geraria uma velocidade menor do vento. Essa redução de velocidade poderia também ser vista como um aumento da secção transversal para a passagem de um mesmo fluxo de massa. Dessa forma ele observou as condições antes e após o aerogerador (HAU, 2006).

O fluxo de ar forma um tubo circular de corrente entre a passagem pelo aerogerador. O ar antes da passagem forma um tubo de diâmetro menor que aumenta logo após passar pelo rotor. Na figura 6, é apresentado esse princípio de forma que são percebidas as diferenças de velocidades antes e após a passagem pelo rotor, onde a velocidade v_1 é maior que v_2 .

Figura 6 – Representação do fluxo de ar passando pelo rotor.



Fonte: PICOLO; RÜHLER; RAMPINELLI (2014)

Com isso a energia potencial extraída pode ser representada como a diferença da energia antes e depois da passagem de ar pelo rotor.

$$P = \frac{1}{2}\rho \cdot A_1 \cdot v_1^3 - \frac{1}{2}\rho \cdot A_2 \cdot v_2^3 \quad (7)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho(A_1 \cdot v_1^3 - A_2 \cdot v_2^3) \quad (8)$$

Considerando um regime permanente e incompressível, pela equação da continuidade para manter o fluxo de massa deve haver uma mudança de velocidade.

$$\rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (9)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 \cdot v_1(v_1^2 - v_2^2) \quad (10)$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_2^2) \quad (11)$$

Analisando os termos entre parênteses da equação 10, Albert Betz identificou uma relação numérica entre v_1 e v_2 . Ele imaginou que se a velocidade v_2 for igual a zero, isso significaria a potência máxima, porém esse valor não é fisicamente aplicável já que com a velocidade v_2 igual a zero, significa dizer que a partícula de ar repousa após a passagem pelo aerogerador. Então sabe-se que a velocidade máxima de potencial extraível é um valor entre a

razão de v_1 e v_2 . Isto requer outra equação que expresse a potência mecânica do conversor. Usando a lei da conservação do momento, a força que o ar exerce sobre o conversor pode ser expresso como: (HAU, 2006).

$$F = \dot{m} (v_1 - v_2) \quad (11)$$

De acordo com o princípio de "ação igual a reação", esta força, o impulso, deve ser neutralizado por uma força igual exercida pelo conversor sobre o fluxo de ar. O impulso, por assim dizer, empurra a massa de ar à velocidade do ar v' , presente no plano de fluxo do conversor. A potência necessária para tal é (HAU, 2006):

$$P = Fv' = \dot{m} (v_1 - v_2)v' \quad (12)$$

Assim, a potência mecânica extraída do fluxo de ar pode ser derivada da diferença de energia ou potência antes e depois do conversor, por um lado, e, por outro lado, do impulso e da velocidade do fluxo. Equacionando estas duas expressões, obtém-se a relação para a velocidade do fluxo v' (HAU, 2006):

$$\dot{m} (v_1 - v_2)v' = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (13)$$

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (14)$$

O fluxo de massa torna-se assim (HAU, 2006):

$$\dot{m} = \rho A v' = \frac{1}{2} \rho A (v_1 + v_2) \quad (15)$$

Substituindo a equação 15 na 11 tem-se (HAU, 2006):

$$P = \frac{1}{4} \rho A_1 \cdot (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) \quad (16)$$

A equação 16 representa a energia captada pelo aerogerador atrelada a um fator entre parênteses que representa a energia disponível no sistema pela alteração da velocidade dos ventos. Fazendo a razão entre a equação 16 e a equação 6, que fornece toda a energia disponível anteriormente à passagem do vento sobre o rotor, então (HAU, 2006):

$$C_P = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4}\rho A_1 \cdot (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{4}\rho A_1 v_1^3} \quad (17)$$

$$C_P = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right] \quad (18)$$

O resultado dessa razão é o coeficiente máximo de potência extraída pelo conversor, que também é chamado de fator de Betz, em homenagem ao físico Albert Betz por ter sido o primeiro a descobrir essa relação. Esse coeficiente tem seu valor máximo quando a relação entre $\frac{v_2}{v_1}$ atinge o valor de $\frac{1}{3}$ (HAU, 2006).

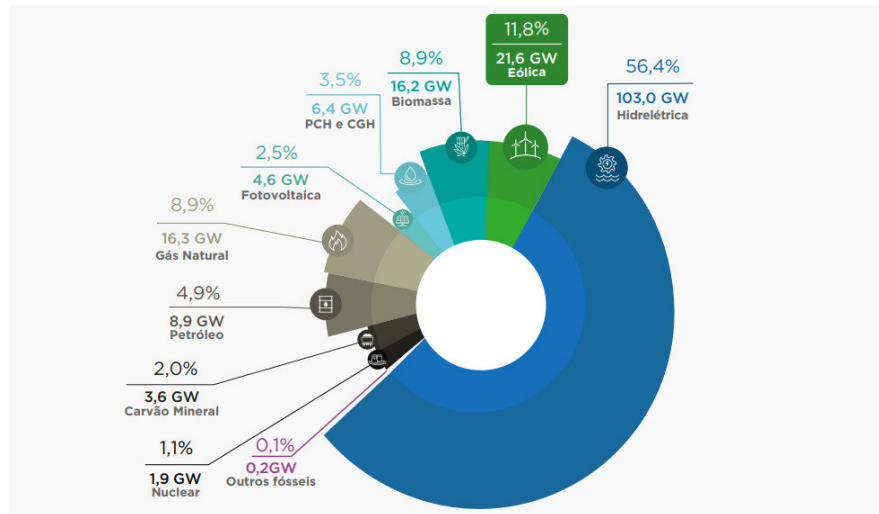
$$C_{pm\acute{a}x} = 0,593 \quad (19)$$

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 C_{pm\acute{a}x} \quad (20)$$

6 DADOS DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

A energia eólica vem ganhando cada vez mais espaço dentro das matrizes energéticas no mundo inteiro. No Brasil, em 2021, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (ABEEólica) a energia eólica representa 11,8% da geração de energia total produzida no país.

Gráfico 1 – Representação da matriz energética brasileira



Fonte: ANEEL/ABEEólica (2021)

No ano de 2021, de acordo com o boletim anual disponibilizado pela ABEEólica os estados que mais geraram energia através da energia eólica foram Rio Grande do Norte com 21,23 TWh, Bahia com 21,15 TWh, Piauí com 9,10 TWh, Ceará com 7,91 TWh e Rio Grande do Sul com 5,63 TWh.

Tabela 1 – Representação da geração de energia eólica ao longo do ano de 2021 por estado em TWh.

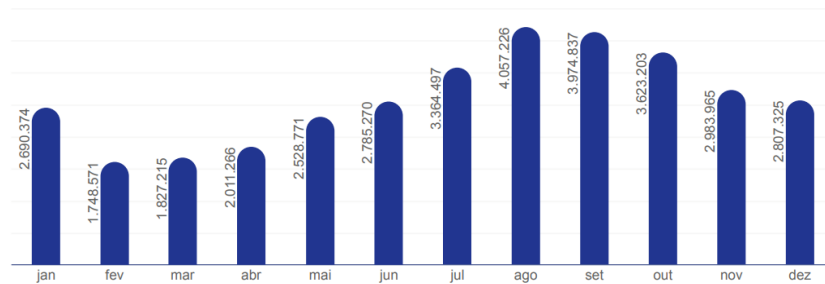
| REGIÃO | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| RN | 2.153,7 | 1.703,5 | 1.454,7 | 1.678,1 | 1.810,4 | 2.112,5 | 2.777,0 | 3.404,2 | 3.207,4 | 2.906,9 | 2.906,9 | 2.906,9 |
| BA | 2.115,3 | 1.272,1 | 1.831,7 | 1.948,5 | 2.398,0 | 2.589,2 | 2.957,9 | 3.175,5 | 2.993,1 | 2.533,2 | 2.533,2 | 2.533,2 |
| PI | 767,0 | 408,5 | 482,0 | 760,1 | 1.185,3 | 1.287,1 | 1.514,0 | 1.513,4 | 1.364,3 | 1.045,2 | 1.045,2 | 1.045,2 |
| RS | 609,9 | 544,1 | 489,3 | 641,1 | 595,8 | 724,2 | 608,6 | 597,8 | 736,3 | 722,0 | 722,0 | 722,0 |
| CE | 936,6 | 725,5 | 454,8 | 574,5 | 485,5 | 642,4 | 946,5 | 1.163,2 | 1.272,1 | 1.206,7 | 1.206,7 | 1.206,7 |
| PE | 377,5 | 306,5 | 277,0 | 238,3 | 271,8 | 244,6 | 338,4 | 388,9 | 376,3 | 398,3 | 398,3 | 398,3 |
| MA | 231,4 | 175,5 | 105,4 | 130,1 | 71,2 | 117,0 | 140,4 | 245,8 | 314,7 | 294,4 | 294,4 | 294,4 |
| PB | 62,2 | 45,5 | 44,7 | 48,8 | 57,5 | 59,8 | 75,8 | 93,5 | 153,7 | 154,6 | 154,6 | 154,6 |
| SC | 66,4 | 48,2 | 46,6 | 50,4 | 58,4 | 68,3 | 82,1 | 86,3 | 75,8 | 62,2 | 62,2 | 62,2 |
| SE | 7,4 | 7,9 | 6,4 | 4,0 | 4,7 | 4,3 | 5,2 | 8,1 | 7,7 | 8,1 | 8,1 | 8,1 |
| RJ | 13,3 | 7,0 | 5,1 | 3,0 | 2,8 | 4,0 | 4,4 | 8,4 | 8,7 | 6,7 | 6,7 | 6,7 |
| PR | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |

Fonte: CCEE/ABEEólica (2021)

Ao longo do ano de 2021, com o uso da energia gerada por parques eólicos foi possível evitar uma grande quantidade de emissão de CO₂ na atmosfera. De acordo com a ABEEólica, um montante de 34,4 milhões de toneladas de CO₂ foram evitados de serem lançados na atmosfera através da geração de energia.

O gráfico 2 apresenta a quantidade evitada de emissão de CO₂ ao longo dos meses do ano de 2021 em toneladas.

Gráfico 2 – Emissão de CO₂ evitada por mês no ano de 2021 em toneladas.



Fonte: ANEEL/EPE/ABEEólica (2021)

Devido as grandes vantagens apresentadas, a mudança na matriz energética através da produção de energia pelo setor eólico é maior a cada ano no Brasil. Em 2005 a energia gerada por parques eólicos era de apenas 22,1 MW (ABEEólica, 2021). Ao longo dos anos o potencial energético do Brasil vem cada vez mais sendo explorado. O gráfico 3 abaixo mostra o crescimento da quantidade de energia gerada de forma a utilizar a força dos ventos.

Gráfico 3 – Evolução da capacidade instalada (MW)



Fonte: ANEEL/ABEEólica (2021)

De acordo com o gráfico 3, vemos que de 2005 até o ano de 2021 a capacidade instalada cresceu 976,32%. E isso mostra o espaço que essa forma de geração de energia vem

ganhando ao longo dos anos no Brasil.

Com relação ao mundo, de acordo com o relatório anual disponibilizado pela ABEEólica, o Brasil ocupa atualmente a sexta posição entre todos os países que fazem uso da energia eólica para compor sua matriz energética com 21,5GW de capacidade instalada em todo o território nacional.

Tabela 2 – Ranking capacidade total instalada onshore.

| POSIÇÃO | PAÍS | Capacidade total instalada onshore (GW) |
|----------|---------------|---|
| 1 | China | 310,6 |
| 2 | EUA | 134,3 |
| 3 | Alemanha | 56,8 |
| 4 | Índia | 40,0 |
| 5 | Espanha | 28,3 |
| 6 | Brasil | 21,5 |
| 7 | França | 19,1 |
| 8 | Canadá | 14,2 |
| 9 | Reino Unido | 14,0 |
| 10 | Suécia | 10,0 |

Fonte: ABEEólica (2021)

7 AEROGERADOR

Para a obtenção da energia elétrica através do potencial eólico são utilizados aerogeradores com a função de transformar uma porção da energia potencial dos ventos em energia elétrica logo após o vento incidir sobre as pás, isso faz com que o rotor transfira essa energia cinética de rotação para o gerador que faz enfim a conversão em energia elétrica (PINTO, 2012). Um aerogerador é composto por quatro componentes básicos que são:

- a) Torre;
- b) Nacele;
- c) Pás;
- d) Rotor.

Existem também duas formas distintas de localização dos aerogeradores. Eles podem ser categorizados como Onshore quando eles se encontram em terra firme e Offshore quando são instaladas em alto mar ou próximo à costa

Figura 7 – Aerogeradores Onshore e Offshore



Fonte: RIBEIRO; JUNIOR (2018).

7.1 Torre

A torre eólica pode ser fabricada em vários tipos de material e de formas distintas. As dimensões mais comuns das seções variam de 20-30 metros de comprimento. As mais comuns são as torres tubulares com formato cônico feitas em aço, em que a base se apresenta com diâmetro maior e no topo o diâmetro é menor, aumentando sua firmeza na base onde é o local de maiores tensões (VERITAS, 2002).

Figura 8 – Representação de uma torre tubular em aço.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

As seções das torres são ligadas através de parafusos metálicos que se encontram em flanges de cada seção. A torre tem a função de comportar a nacele que é o dispositivo de armazenamento dos componentes responsáveis pela transformação de energia.

Figura 9 – Constituintes de uma torre tubular



Componentes da torre

b) Flange metálica

c) parafusos de ligação

Fonte: ENGSTRÖM et al. (2010).

Na tabela 3 é possível observar algumas características mais comuns das torres tubulares como o seu diâmetro de base, altura, peso e espessura de chapa.

Tabela 3 – Características das torres.

| | | |
|---------------------------------|-----|-----|
| Altura do <i>Hub</i> (m) | 150 | 150 |
| Diâmetro da base (m) | 4,5 | 5,8 |
| Espessura da chapa na base (mm) | 75 | 43 |
| Peso (ton) | 610 | 551 |

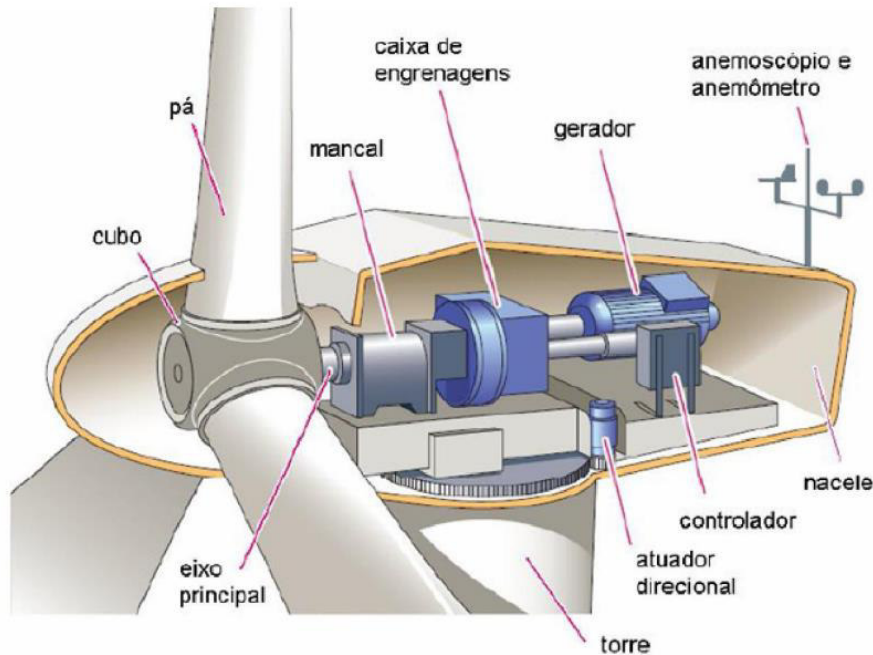
Fonte: J. Henriques (2012)

7.2 Nacele

A nacele é o componente que comporta os principais dispositivos que transformam a energia cinética em elétrica. Ela tem a função de proteger esses dispositivos contra intempéries

como chuva, vento, poeira e radiação solar. Sua construção é feita em aço, porém o seu topo geralmente é feito com fibra de vidro e o seu tamanho comporta além dos equipamentos uma pessoa para eventuais manutenções.

Figura 10 – Componentes de uma nacela



Fonte: WEKKEN; WIEN (2006)

7.3 Pás

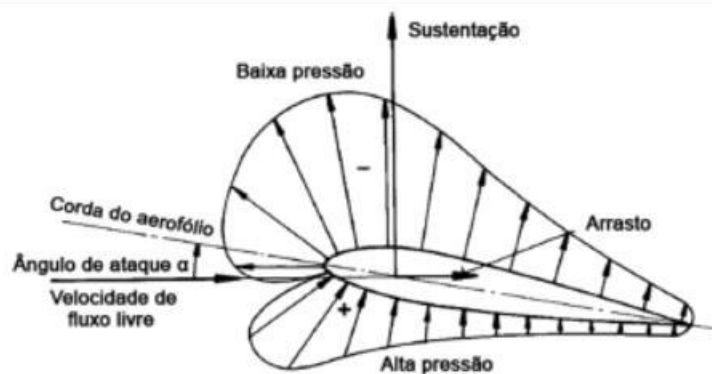
As pás são responsáveis pela interação do vento com o rotor. O rotor após o seu giro transfere essa energia de rotação para o gerador (FADIGAS, 2011).

A aerodinâmica da pá tem fundamental importância na eficiência de um aerogerador. Elas apresentam perfil assimétrico, tendo no início um diâmetro maior e diminuindo gradativamente até a sua ponta. Sua aerodinâmica é medida em modelos de túnel de ventos. Os coeficientes de sustentação e arrasto são medidos em função do ângulo de ataque. O ângulo de ataque é definido como o ângulo formado pela direção da velocidade do vento com a linha que une os bordos de entrada e saída do vento (PINTO, 2012).

Quando o ar entra em contato com as pás ele se divide parte percorre o caminho da face superior que é mais curvada e parte caminha pela face inferior que é mais reta. Devido os caminhos percorridos serem diferentes, a parte superior apresenta velocidade maior que na inferior e isso gera uma diferença de pressão no aerofólio. O resultado disso é uma força

perpendicular para cima, que também é chamada de força de sustentação. Essa força está relacionada diretamente com a diferença de velocidade do ar entre as faces do aerofólio, em que quanto maior a diferença entre as velocidades, maior será a diferença de pressão o que conseqüentemente gera uma maior força de sustentação. Quanto maior a velocidade de um fluido sobre uma superfície, menor será a pressão que ele exerce (BRUNETTI, 2008).

Figura11 – Representação das forças que atuam em uma pá eólica.



Fonte: HAU, 2006.

7.4 Rotor

O rotor é o conjunto das pás, cubo e os mecanismos até antes do gerador. O rotor ao ser girado devido o movimento de rotação das pás, transfere essa energia de movimento para o gerador. Os rotores são dimensionados de acordo com o tamanho das pás, sua aerodinâmica e estrutura. O comprimento das pás e a área varrida por elas ao girarem em torno do eixo do cubo são responsáveis pela potência e velocidade nominal da turbina (FADIGAS, 2011).

Como visto na equação 16, a potência eólica é diretamente proporcional a área de captação dos ventos. Devido ao fato da existência do fator de Benz as empresas que vendem parques eólicos optaram por aumentar a potência nominal de um aerogerador não mais modificando a aerodinâmica das pás por ser um processo que demanda bastante tempo e detém um custo elevado. Atualmente essas empresas estão indo pelo caminho de manipulação da área varrida que também altera o fator de potência e nesse caso a área nada mais é do que a área de uma circunferência que é dada por:

$$A = \pi R^2 \quad (17)$$

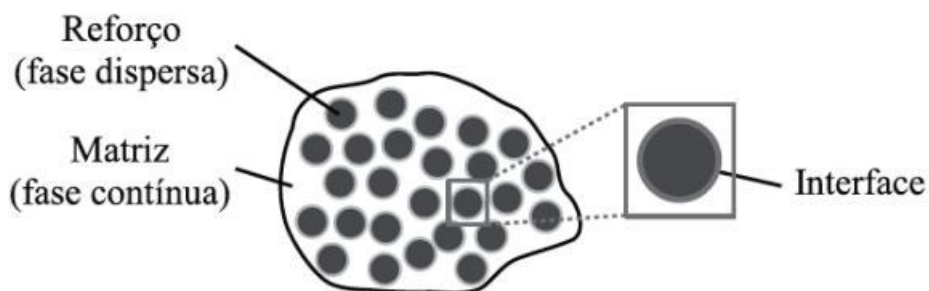
Em que R representa o tamanho das pás. Então ao aumentar o tamanho das pás e mantendo o perfil aerodinâmico já elaborado em projetos de pás menores, as empresas notaram uma saída com custo e tempo menor que a abordagem anterior.

Um rotor também apresenta uma relação com a área total das pás e a área varrida por elas. Essa relação também é chamada de *solidity*, que é a razão entre as duas áreas citadas. Um rotor com alta solidez apresenta desvantagem devido forças excessivas causadas por fortes ventos. As turbinas modernas são projetadas para diminuir essa solidez através da produção de pás mais finas e alongadas. Isso ajuda a conter a ação dos ventos excessivos e amplia sua eficiência (RISO, 2002).

8 MATERIAL COMPÓSITO

Os materiais compósitos são definidos como estruturas de duas ou mais fases macroscópicas, que quando juntas apresentam melhores propriedades mecânicas do que se forem avaliadas isoladamente. Nos materiais compósitos existe a matriz e o reforço. A matriz é uma fase contínua e o reforço é a fase descontínua e pode assumir uma fase filamentar, particulada ou fibrosa (MAZUMDAR; SANJAY, 2002).

Figura 12 – Fases de um material compósito.



Fonte: Angélico (2009, com adaptações)

A função da matriz é transmitir e distribuir para o material de reforço a tensão aplicada sendo apenas uma pequena parcela suportada pela matriz. Ela também protege as fibras ou partículas individuais contra os danos superficiais devido a abrasão mecânica ou reação química com o ambiente. Ela separa os elementos de reforço e isso faz com que seja uma

barreira contra a propagação de trincas. Vale ressaltar que o módulo de elasticidade do reforço deve ser maior do que a da matriz (CALLISTER JUNIOR, 2008). Algumas vantagens dos materiais compostos com relação aos materiais tradicionais são a ótima relação de rigidez/peso, alta resistência a corrosão, facilidade de manutenção, alta durabilidade, bom comportamento à fadiga e a possibilidade de projetar o reforço em relação a quantidade, geometria e orientação, para atender as solicitações (MAZUMDAR; SANJAY, 2002).

8.1 Matrizes poliméricas

As matrizes dos compósitos podem ser metálicas, cerâmicas ou poliméricas. Devido à capacidade das matrizes poliméricas serem processadas em baixas temperaturas e pressões elas são utilizadas em larga escala pelas indústrias.

Os polímeros podem ser classificados em três diferentes tipos que são:

- termoplásticos: são rígidos em baixas temperaturas e amolecem em altas temperaturas, além de poderem ser aquecidos mais de uma vez;
- termo endurecíveis: ao serem expostos a altas temperaturas se tornam endurecidos devido as ligações cruzadas covalente formada entre as cadeias moleculares adjacentes, o que torna a cadeia resistente aos movimentos vibracionais;

elastômeros: são polímeros com alta elasticidade devido o processo de vulcanização, em que um composto de enxofre é adicionado ao polímero, formando ligações cruzadas (CALLISTER JUNIOR, 2008).

As matrizes poliméricas também conhecidas como resinas são constituídas pelas resinas termorrígidas e as termoplásticas. As termorrígidas são resinas que curam de forma irreversível por apresentar uma estrutura molecular tridimensional que não se refunde na presença de altas temperaturas. Em altas temperaturas essa resina sofre um processo de degradação. As termoplásticas são resinas que tem o processo de endurecimento ocorrendo por secagem física, ou seja, evaporação de solvente. Essa resina quando entra em contato com o solvente se solubiliza. Ela tem uma grande vantagem de poder ser curvada em diferentes formatos mesmo após fabricada (LEVY NETO; PARDINE, 2006).

Tratando-se de indústria é preferível a utilização das resinas termoendurecíveis e as termoplásticas devido suas vastas possibilidades de aplicações. Para pás eólicas, a resina termoendurecível é utilizada pois após o processo de cura, que é a reticulação das cadeias moleculares através do aumento da temperatura, é obtido um produto rígido e infusível. Além

disso, as resinas termoendurecíveis apresentam menor viscosidade do que as termoplásticas, viscosidade essa que quanto menor, maior a facilidade de impregnar em reforços de fibras longas no processo de infusão o que conseqüentemente diminui a probabilidade de defeitos (JOHNSON, 2020).

8.2 Reforços

Os materiais compósitos apresentam reforços na forma de fibras ou partículas. Comercialmente esses reforços são mais apresentados em forma de fibras, podendo estas serem descontínuas (fibras curtas) ou contínuas (fibras longas), que são filamentos de pequeno diâmetro e grande comprimento, que favorece uma maior rigidez e resistência mecânica (ALMACO, 2020). As fibras mais utilizadas para o processo de fabricação de uma pá eólica são as fibras de vidro e fibras de carbono.

8.2.1 Fibras de vidro

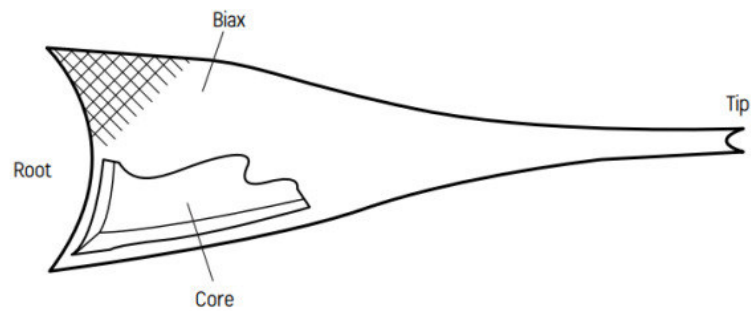
As fibras de vidro são obtidas através da fusão da massa de vidro e sua posterior extrusão na filamentação. Em seguida, agentes como silanos são adicionados à matriz orgânica a fim de promover aderência. Essas fibras são comercializadas no setor eólico da seguinte forma (ALMACO, 2020):

- Roving: fios contínuos enrolados em formato de bobinas;
- Mantas: fios picotados e unidos quimicamente;
- Tecidos: fios trançados em diferentes angulações e gramaturas, cuja angulação depende da necessidade estrutural.

Os tipos de tecidos utilizados no processo de produção de uma pá eólica são os seguintes:

- UD: tecido trançado de forma unidirecional, formando um ângulo de 0° entre si. Esse tipo de tecido é utilizado em pás eólicas porque ele tem a capacidade de ser resistente a esforços de tração;
- BIAX: tecido trançado de forma bidimensional, formando um ângulo de $\pm 45^\circ$ entre si. Esse tipo de tecido é utilizado em pás eólicas porque tem a capacidade de ser resistente a esforços de cisalhamento e torções;

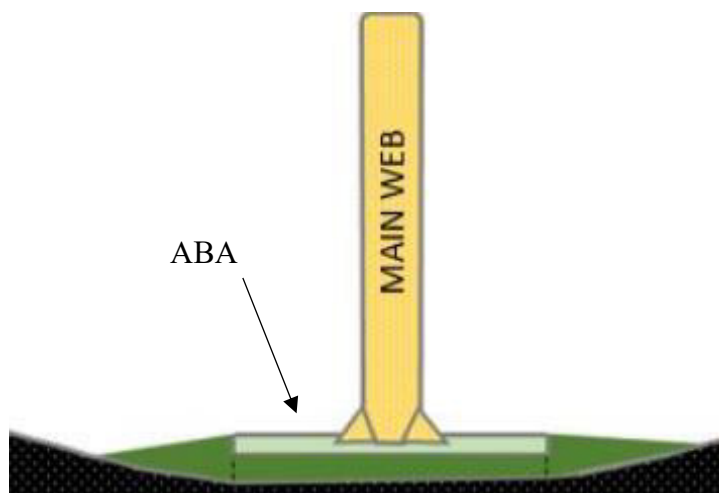
Figura 14 – Representação de um pré-fabricado de alma.



Fonte: CORTIR (2019).

A alma é fixada entre as cascas através do processo de colagem da pá que é um dos processos com maior dificuldade de execução devido ao seu nível de criticidade para a geração de defeitos de falha de colagem. Ela é posicionada em cima da *spar cap* que já se encontra infundida nas cascas. Em seguida ela é colada com uma resina epóxi de alta densidade, comumente chamada de massa de colagem. Para facilitar a colagem da alma sobre a casca, são criadas abas na superfície inferior e superior dela, o que favorece o aumento da área de colagem e gera uma adesão maior entre os materiais (STIESDAL, 1999).

Figura 15 – Representação da aba adicionada a alma.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

9.1.2 Raízes

A raiz é a região inicial da pá, é nela que ocorre a conexão de toda a estrutura pá com a torre, por esse motivo a raiz é a região que sofre maiores esforços da pá. Ela é responsável por receber todo o momento fletor de forma mais uniforme. Essa região geralmente é constituída com fibras de UD, BX e TRIAX, em torno de 45 camadas compõem essa região, o que a torna a mais espessa com relação a todo o resto da pá. Além disso, também são colocados insertos metálicos nessa região para fazer a conexão com o cubo e distribuir toda a carga pela estrutura da torre (CORTIR, 2019).

Figura 16 –Raiz de uma pá eólica com insertos metálicos.

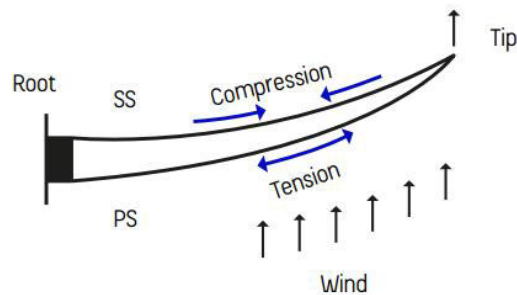


Fonte: elaborada pelo próprio autor.

9.1.3 Spar Caps

As *spar caps* são estruturas feitas com fibras de UD ou carbono (pultrudado). Elas têm a função de suportar cargas de deflexão contra a torre devido a ação do vento sobre a pá. Vale ressaltar que a orientação da fibra de UD oferece alta resistência longitudinal, porém tem baixa resistência transversal (MOURA; MORAES; MAGALHÃES, 2011). A figura 17 apresenta os tipos de esforços suportados pelas *spar caps*.

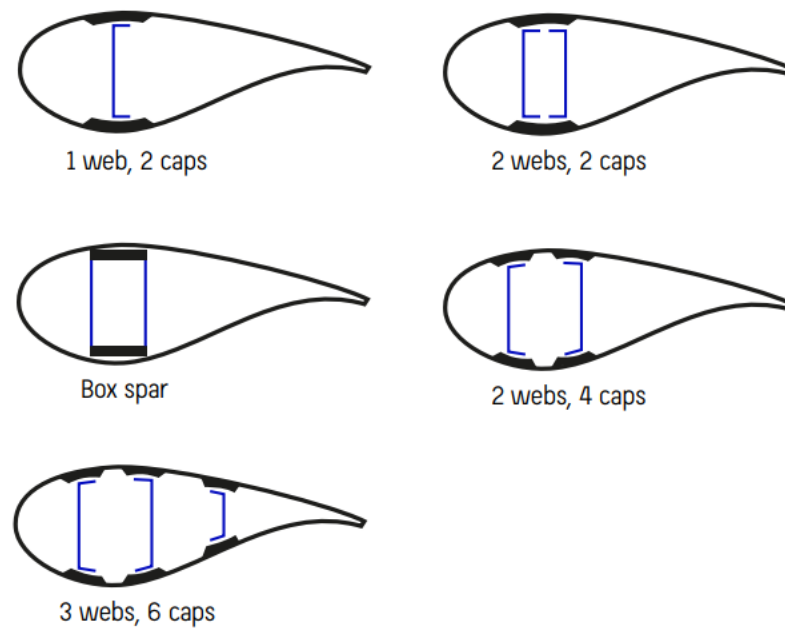
Figura 17 – Representação dos esforços suportados pelas *spar caps*.



Fonte: CORTIR (2019).

Na figura 18, é observada a união que ocorre entre as *spar caps* e alma. Após unidas essas estruturas formam uma representação em “T”. Esse tipo de formato é usado comumente em estruturas de engenharia. As *spar caps* podem estar presentes nas estruturas das pás em conjunto com as almas em diversas formas diferentes, algumas dessas formas estão representadas na figura 18. Conjuntos com uma alma e duas *spar caps*, duas almas e duas *spar caps*, duas almas e 4 *spar caps* e entre outros formatos.

Figura 18 – Representação dos conjuntos de almas e *spar caps*.

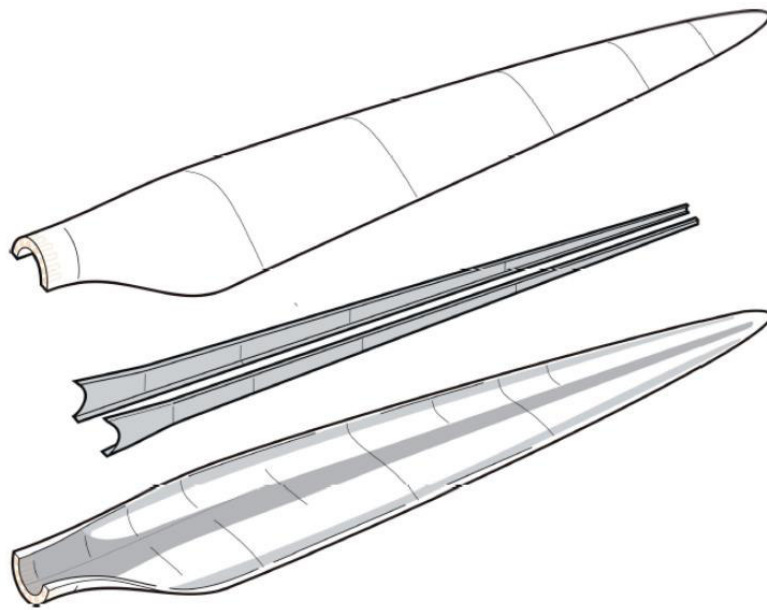


Fonte: CORTIR (2019).

9.2 Cascas

As cascas são comumente produzidas em duas partes, a casca pressão (PS) e a casca sucção (SS) e coladas através da aplicação de massa de colagem na região dos bordos. Elas são constituídas de fibras de vidro e material de núcleo (*core*). As camadas de fibra de vidro variam de até duas camadas na ponta e até 52 na raiz.

Figura 19 – Representação das cascas de uma pá eólica.



Fonte: MISHNAEVSKY JUNIOR et al. (2017).

As cascas representam a parte mais importante do aerogerador no quesito captação de energia, pois são nelas que estão o perfil aerodinâmico que é um dos principais focos de estudos pelos engenheiros projetistas (THOMAZ JUNIOR, 2012).

9.3 Processo de fabricação

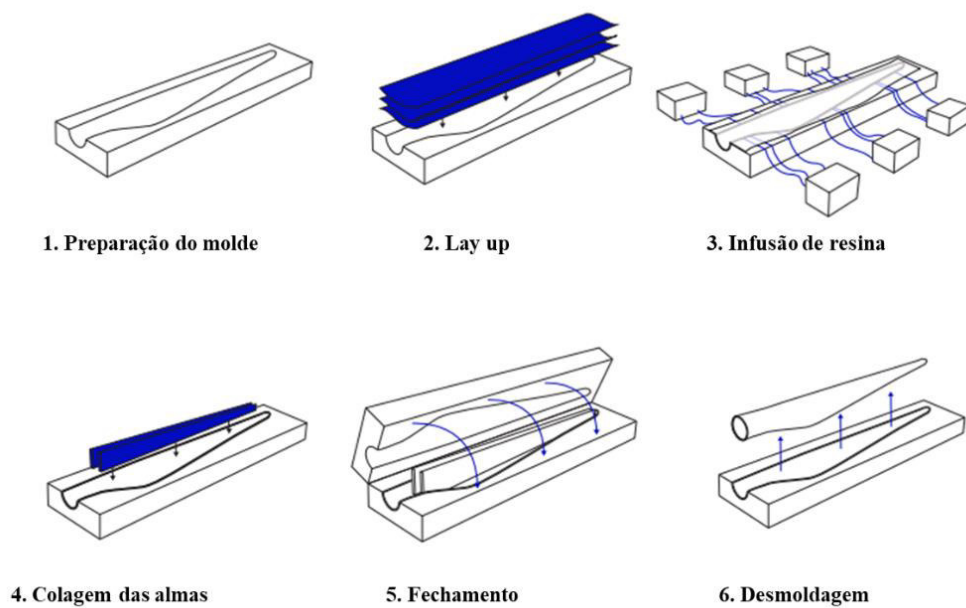
De acordo com Cortir (2019), o processo de fabricação de uma pá eólica é dividido em 6 etapas sendo elas as seguintes:

- preparação do molde: nessa etapa é aplicado gel desmoldante no molde a fim de evitar problemas durante a desmoldagem da peça após o processo, além disso gel *coat* é aplicado para dar mais uniformidade a superfície da peça o que facilitará o escoamento do vento;
- *lay-up*: é o processo de acomodação dos materiais que irão compor as cascas. Esse processo é visto como sanduiche porque após a colocação das *spar caps* o processo se repete de modo a finalizar com a acomodação das camadas de vidro. A sequência de colocação dos materiais é regida de modo que é primeiro acomodada as camadas de fibra de vidro em seguida material de núcleo e colocação da *spar caps*. Após isso o processo se repete como dito anteriormente;
- infusão de resina: é o processo de molhar com resina todo o material posto na etapa

anterior. Esse processo se inicia com a montagem do plano de infusão que objetiva facilitar um fluxo de resina sobre o material disposto na etapa anterior. Em seguida é montada a bolsa de vácuo e é iniciado o vácuo com o auxílio de bombas. Por fim o processo de infusão é iniciado através da diferença de pressão gerada pelas bombas de vácuo e o fluxo de resina ocorre sobre a peça. Após finalizado o processo ocorre a cura do laminado pelo aquecimento do molde;

- colagem das almas: é o processo de colagem do pré-fabricado de alma sobre as cascas infundidas utilizando resina de colagem;
- fechamento: é o processo de aplicação de massa de colagem no bordo de ataque e fuga das cascas e na superfície não colada das almas para a junção das duas cascas com a alma já colada em outra casca anteriormente. Em seguida uma turbina de ar quente é posicionada na raiz da pá para fornecer o calor necessário para a cura da massa de colagem;
- desmoldagem: é o processo de abertura do molde e posterior remoção da pá com auxílio de pontes rolantes e carros de transporte.

Figura 21 – Representação dos processos de fabricação de uma pá eólica.



Fonte: Cortir (2019, com adaptações).

9.4 Defeitos de fabricação

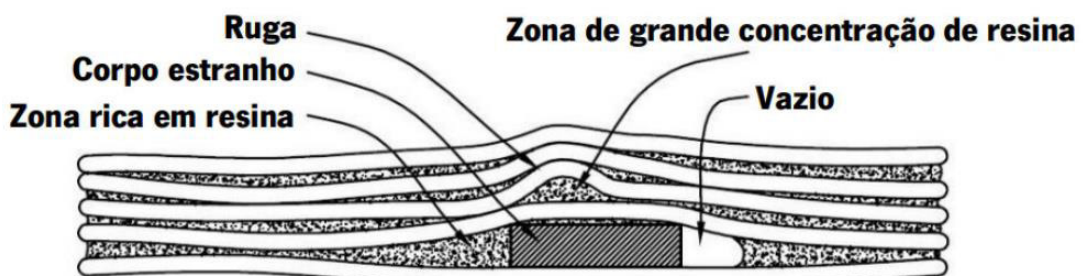
A estrutura dos laminados está sujeita a muitos defeitos ou danos devido à complexidade dos critérios de fabricação e design, muitas vezes muito rígidos (CAMPOS, 2013).

Defeitos que podem ser causados pela inexperiência das pessoas envolvidas na fabricação das peças, como contaminação de tecido, preparação inadequada do molde ou a realização de um processo fora do padrão estabelecido. Os defeitos mais comuns, são os vazios, porosidades, rugas, corpo estranho, tecido semi-seco e seco, trinca, delaminação, gap entre núcleos, overbite, ausência de massa de colagem, etc (MCGOWAN, ROGERS, 2009).

Os vazios e porosidades recebem nomes diferentes dependendo do tamanho e da quantidade. Vazios esporádicos são denominados bolhas ou microbolhas, ao passo que a porosidade costuma ser distribuída de maneira uniforme e é comumente denominada no meio fabril como aerado. Esses defeitos são geralmente formados por compostos voláteis liberados pela resina durante o processo de cura, ou que permanecem enclausurados entre as camadas de reforço. Na literatura, as principais causas previstas são: vazamento na bolsa de vácuo, ar 32 dissolvido no interior da resina e liberação de compostos voláteis devido à exotermia (CAMPOS, 2013).

As rugas são caracterizadas por ondulações no laminado. Isso ocorre normalmente porque certas regiões são difíceis de acomodar as camadas e, uma vez que uma camada possui alguma saliência, as próximas também terão. Esse defeito geralmente provoca outro defeito denominado excesso de resina, e, juntos, originam uma zona de concentração de tensão, prejudicando propriedades como resistência à fadiga (c, 1999). A Figura 22, ilustra a forma dos defeitos no laminado de vidro.

Figura 22 – Representação dos defeitos no laminado de vidro.



Fonte: Unnthórsson, Jonsson, Runarsson (2014, com adaptações).

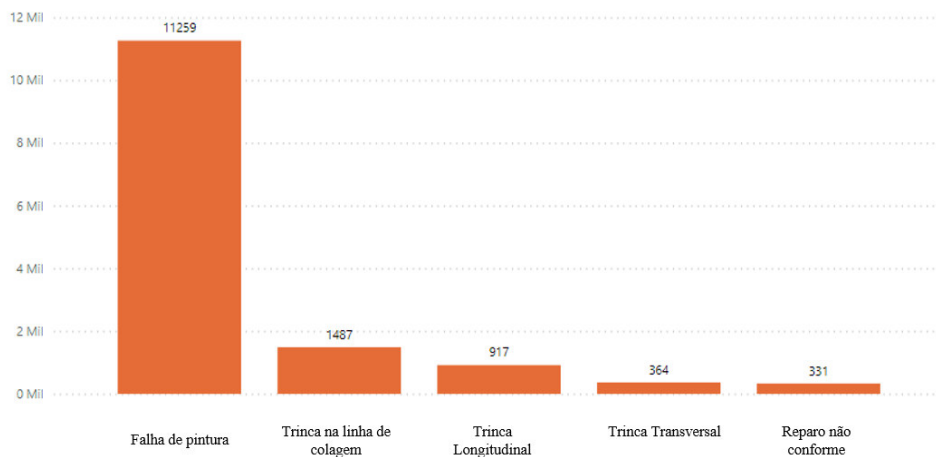
Para a identificação dos defeitos pontuados em parques eólicos foi utilizado uma base de dados cedidos por uma empresa do ramo eólico no setor da qualidade. Os dados fazem referência as inspeções de recebimento realizada pelos inspetores de campo da empresa em questão. Essa inspeção é realizada nas pás quando elas são entregues para o parque eólico.

Os dados são baseados em 13 parques eólicos espalhados pelo Brasil. O primeiro passo deste trabalho foi filtrar todos os defeitos registrados apenas como ponto de melhorias que no caso são defeitos que não são críticos apenas ajustes que devem ser feitos antes das montagens das pás. Esses defeitos podem ser do tipo pequenos poros na pintura, ajuste de pintura em uma pequena área ou adição de mais uma camada de tinta na região, pois geralmente as pás são pintadas com 3 demãos de tinta.

Após a filtragem desses tipos de defeitos a base de dados contém apenas defeitos que de fato precisam de reparos para correção. Foram inspecionadas cerca de 1420 pás e dentre essas pás foram registrados mais de 17300 não conformidade nessas pás, isso representa em média 12 defeitos por pá.

No gráfico 4, é apresentado os 5 defeitos mais recorrentes nas pás em parques eólicos.

Gráfico 4 – Cinco defeitos mais recorrentes.

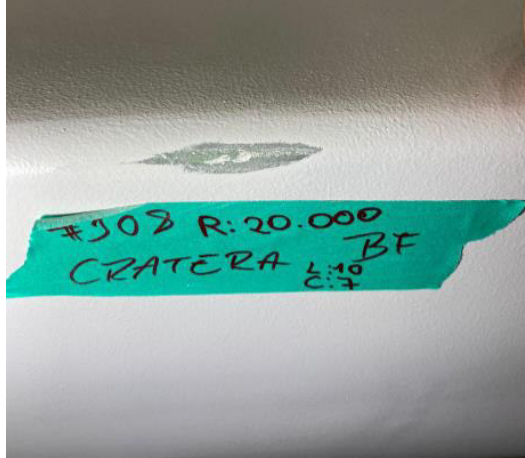


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No gráfico 4, vemos que o defeito falha de pintura é expressivamente mais recorrente do que os outros defeitos pontuados, com cerca de 65% do total de defeitos. Esse é um defeito que diz respeito à pintura da pá. Existem diversos motivos para a ocorrência desse defeito, a justificativa mais relatada nos parques é que esse defeito ocorre durante o transporte das pás até o parque eólico, devido as pás serem transportadas por um longo caminho até seu

destino elas passam por diversos ambientes que podem ocasionar esses danos na pintura.

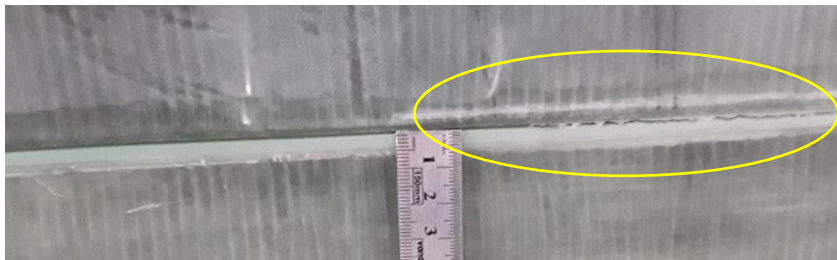
Figura 23 – Exemplo de um defeito de pintura.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O segundo defeito mais recorrente nas pás é trinca na linha de colagem, esse é um defeito que está presente nos bordos da pá, em região de colagem. Esse tipo de defeito ocorre devido um esforço excessivo na pá que pode ser devido o transporte onde estradas com superfície esburacadas ou irregulares podem gerar esforços na região da embalagem da pá onde ficam as regiões de colagem.

Figura 24 – Exemplo de uma trinca na linha de colagem.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O terceiro e o quarto defeito são bem semelhantes a diferença entre eles é apenas o sentido de propagação do defeito. O defeito *crack in the laminate longitudinal or transversal*, é um defeito que pode ser ocasionado por um excesso de resina em alguma região da pá. Como o laminado de vidro tem alta resistência comparada apenas à resina. Esse é um defeito crítico que se não for descoberto com antecedência poderá fazer uma torre entrar em colapso caso a trinca se propague durante a operação.

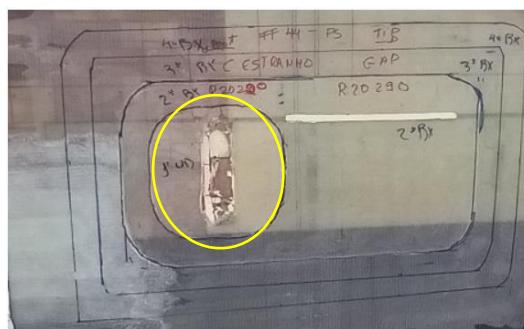
Figura 25 – Exemplo de trinca no laminado.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O quinto defeito mais recorrente é o reparo não conforme, esse é um defeito causado exclusivamente pelo fornecedor de pás. Durante o processo produtivo reparos no laminado são recorrentes e já fazem parte do processo produtivo, porém em algumas pás existe uma grande quantidade de reparos de modo que alguns deles podem acabar não sendo feitos de forma conforme. Os auditores de qualidade dos parques podem identificar a não conformidade e condenar o reparo, necessitando assim de um novo reparo.

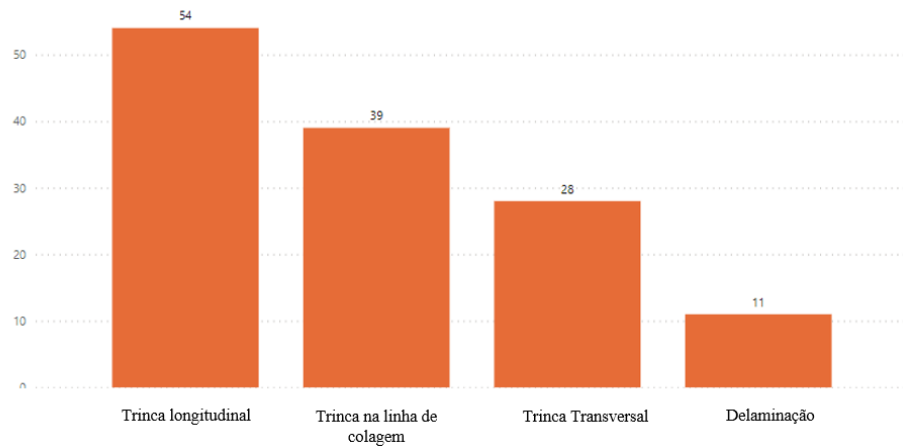
Figura 26 – Exemplo de reparo não conforme.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O gráfico 5 mostra os cinco tipos de defeitos mais recorrente com grau de severidade 5 que foram registrados. Defeitos de grau 5 de acordo com a empresa que cedeu os dados são defeitos com potencial máximo para colapso da pá. Quando esse tipo de defeito é encontrado, é feita uma análise e é aconselhado o reparo imediato do defeito.

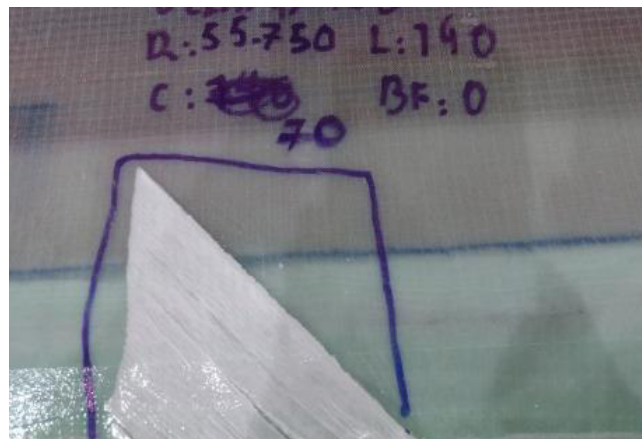
Gráfico 5 – Quatro defeitos mais recorrentes com grau 5.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os três primeiros defeitos apresentados no gráfico 5 foram descritos anteriormente. O defeito do tipo delaminado é ocasionado por algum tipo de colisão do laminado com outro material ou o mesmo durante os processos de produção. Ele é caracterizado como uma região esbranquiçada em que é possível observar diversas trincas ou delaminados representando a não uniformidade da região.

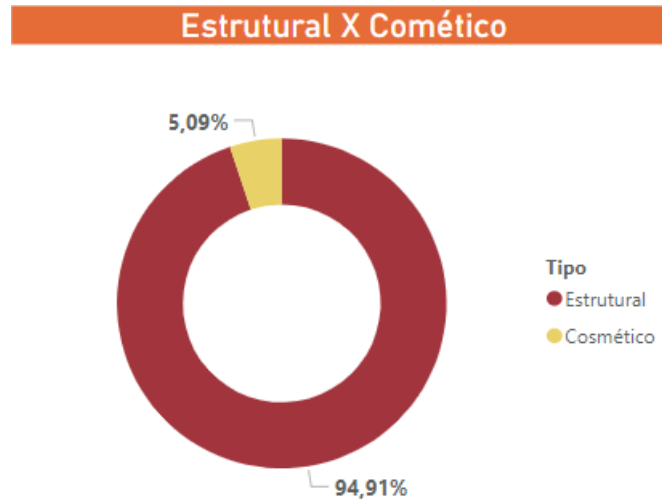
Figura27 – Exemplo de um delaminado.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O gráfico 6 representa a porcentagem entre os defeitos que são considerados cosméticos, quando não causam danos a estrutura interna da pá e estruturais, causam danos a estrutura interna da pá.

Gráfico 6 – Porcentagem defeito estrutural e cosmético.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

De acordo com o gráfico 6, os defeitos estruturais representam cerca de 94,9% dos defeitos encontrados nas pás eólicas no momento que chegam ao parque, enquanto os cosméticos representam 5,1% desse valor. Essas informações podem entrar em contradição quando avaliado o gráfico 4, que mostra que a grande maioria dos defeitos são falha de pintura. Mas esse fato pode ser explicado quando é sabido que defeitos de pintura também podem ser considerados estruturais quando a dimensão da falha se torna muito grande. O laminado exposto ao sol pode sofrer fragilização, ressecamento e mudança de coloração se ficar exposto por longos períodos. Além disso, nas regiões que contém balsa ou espuma, ao ser aquecida em altas temperatura pode queimar e perder as capacidades estruturais.

10 CONCLUSÃO

Os Aero geradores têm grande relevância na produção de energia no Brasil, com 11,6% de representatividade. O local de instalação do parque eólico leva em consideração a intensidade dos ventos, rugosidade do terreno, obstáculos aos arredores e existência de colinas na região. Os aerogeradores podem ser instalados em terra firme ou no mar (Onshore e Offshore).

A energia disponível nos ventos depende da área varrida pelas pás do aerogerador e a velocidade ao cubo do vento incidente. O fator de Albert Benz indica a capacidade máxima de aproveitamento de energia possível para um aerogerador. Um total de 59,3% é a energia que pode ser transformada do total fornecido pelo vento incidente.

Foi descrito que um aerogerador é composto pela torre, nacelle, pás e rotor e que as pás são fabricadas com tecido de vidro e resina epox.

Foi observado que a grande maioria dos defeitos registrados nas pás que chegam nos parques eólicos são defeitos de pintura, com cerca de 65% do total de defeitos sendo desse tipo. Essa é uma característica muito relacionada ao transporte das pás é feito por terra firme.

Defeitos do tipo trinca embora sejam defeitos críticos são recorrentes nas pás quando chegam ao parque. Esses defeitos representam cerca de 16% do total de defeitos registrados, mesmo que todos não sejam de grau 5, são defeitos que detém o potencial para se tornarem com essa severidade.

Com relação à severidade dos defeitos, foi identificado que dentre os defeitos mais recorrente 3 deles são do tipo trinca, que são defeitos com potencial de causar um colapso no aerogerador durante sua operação. A antecipação da detecção desses defeitos traz grandes benefícios para as empresas fornecedoras de energia através do parque eólico.

Avaliando a relação entre defeitos cosméticos e estruturais, os defeitos encontrados nos parques eólicos são de sua maioria do tipo estrutural com cerca de 94,9%, o que pode causar problemas precoces caso essas pás entrem em operação sem um reparo prévio desses defeitos. Os defeitos do tipo cosméticos representam cerca de 5,1% dos defeitos encontrados.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMACO. Compósitos 2: Tecnologia de Processos. 2º ed. 2020.
- AMARANTE, O.A.C.; BROWER, M.; ZACK, J. e SÁ, A. L., Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2001). Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico_brasil/atlas-web.htm. Acesso em 10/10/2022.
- BOLETIM ANUAL 2021. São Paulo. ABEEólica, 2021. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica>. Acesso em: 15/10/2022
- BRUNETTI, F., Mecânica dos Fluidos (Pearson, São Paulo, 2008), 2S ed.
- BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N. and BOSSANYI, E., Wind Energy Handbook (John Wiley & Sons, Ltd, England, 2001).
- CALLISTER JUNIOR., W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CAMPOS, Maxdavid Oliveira. Estudo Comparativo de pás para aerogeradores de grande porte fabricadas em materiais compósitos reforçada com fibra de carbono ou fibra de vidro. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12818>. Acesso em: 08/10/2022
- CORTIR. The Blade Handbook: A shared lingo for the future of wind. 2019. FAHR, A.; KANDEIL, A. Y. Ultrasonic C-Scan Inspection of Composite Materials. Engineering Journal of Qatar University. Vol. 5. 1992, p. 201-222.
- DUTRA, R. M., Energia Eólica: Princípios e Tecnologias (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, Rio de Janeiro, 2008).
- FADIGAS, Eliane A. Amaral. Energia Eólica. Manole, 2011. Disponível em: Acervo Minha Biblioteca Unisul. Acesso em: 15/10/2022.
- HAU, E., Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics (Springer, Berlin, 2006).
- HENRIQUES J., “Projecto de Torres Eólicas Reticuladas de Grande Altura,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Dissertação de Mestrado, Portugal, 2012.
- JOHNSON, Todd. Thermoplastic vs. Thermoset Resins. 2020. Disponível em: <http://thoughtco.com/thermoplastic-vs-thermoset-resins-820405>. Acesso em: 22/10/2022.
- LEVY NETO. F.; PARDINI, L. C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
- MAZUMDAR and SANJAY K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. Nova Iorque: CRC Press, 2002.

- MANWELL, James F.; MCGOWAN, Jon G.; ROGERS, Antony L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2° ed. Grã-Bretanha: Wiley, 2009.
- MARCHINI, Lodinei Roberto. *Disciplina 8D*. 2022. Disponível em: <http://lodineimarchini.no.comunidades.net/index.php?pagina=1365216015>. Acesso em: 22/10/2022
- MISHNAEVSKY JUNIOR, L.; BRANNER, K.; PETERSEN H. N.; BEAUSON J.; MCGUGAN M. and SØRENSEN B. F. *Materials for Wind Turbine Blades: An Overview*. MPDI, 2017
- MOURA, M. F. S. F. de; MORAIS, A. B. de; MAGALHÃES, A. G. de., *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2° ed. Publidisa, 2011.
- PESTANA, D. *Sistemas estruturais para torres eólicas*, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Portugal, 2016.
- PICOLO, A. P.; RÜHLER, A. J. e RAMPINELLI, G. A., Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. *Revista Brasileira de Ensino de Física* [online]. 2014, v. 36, n. 4. pp. 01-13. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000400007>. Acesso em 18/10/2022.
- REBELO, C. e SILVA, L.S., *Moinhos de vento do futuro*. Revista Rua Larga, Portugal, Universidade de Coimbra, 2009, disponível em <http://www.uc.pt/rualgarga/anteriores>. Acesso em 27/10/2022.
- RISO, D.N.V., *Guidelines for Design of Wind Turbines*. 2° Ed. Dinamarca: DNV/Riso Publication, 2002. Disponível em: http://www.cwpc.cn/cwpp/files/7313/9823/7381/Technology_Wind_Turbine_Design_Guidelines_for_Design_of_Wind_Turbines.pdf. Acesso em: 22/10/22.
- SILVA P., “Sistema para tratamento de dados, armazenamento e disseminação de dados de vento,” Universidade Federal do Rio de Janeiro - Dissertação de Mestrado, Brasil, 1999.
- STIESDAL, H. *The Wind turbine components and Operation*. Bonus Energy A/S, 1999.
- THOMAZ JUNIOR, C. R., *Desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas de eje vertical en función de temperatura de superficie de álabes*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil Mecânica) — Faculdade de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade do Chile, Santiago, 2012. Disponível em: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112558>. Acesso em: 21/10/2022.
- UNNTHÓRSSON, Rúnar; JONSSON, M. T.; RUNARSSON, T. P. *NDT Methods For Evaluating Carbon Fiber Composites*. 2014.
- VERITAS, D. N., “Guidelines for Design of Wind Turbines,” Copenhagen, 2002.