



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

FRANCISCO CARLOS GOMES DA SILVA JUNIOR

ANÁLISE DA CORROSÃO EM TORRES DE SUSTENTAÇÃO
DE AEROGERADORES: CAUSAS E MITIGAÇÃO

FORTALEZA

2022

FRANCISCO CARLOS GOMES DA SILVA JUNIOR

ANÁLISE DA CORROSÃO EM TORRES DE SUSTENTAÇÃO
DE AEROGERADORES: CAUSAS E MITIGAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Metalúrgica do
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais da Universidade Federal do Ceará.

Orientador: Prof. Dr. Walney Silva Araujo

FORTALEZA

2022

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

- S58a Silva Júnior, Francisco Carlos Gomes da.
Análise da corrosão em torres de sustentação de aerogeradores: causas e mitigação / Francisco Carlos Gomes da Silva Júnior. – 2022.
42 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. Walney Silva Araujo.
1. Aerogerador. 2. Corrosão. 3. Torre eólica. I. Título.

CDD 669

FRANCISCO CARLOS GOMES DA SILVA JUNIOR

ANÁLISE DA CORROSÃO EM TORRES DE SUSTENTAÇÃO
DE AEROGERADORES: CAUSAS E MITIGAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Metalúrgica do
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais da Universidade Federal do Ceará.

Aprovada em: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Walney Silva Araujo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Janaina Goncalves Maria Da Silva Machado
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Elineudo Pinho De Moura
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho à minha família, amigos e educadores.

AGRADECIMENTOS

À Instituição Universidade Federal do Ceará, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. Walney Silva Araújo, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Janaína Machado e Elineudo Moura pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A minha família por todo o apoio dado nesse período da minha vida.

Tenho certeza que não caberia nessa folha se eu fosse agradecer de forma detalhada a todos que contribuíram na minha trajetória nesses 5 anos do curso de engenharia metalúrgica. Portanto, desde já, agradeço a cada um que cruzou pelo meu caminho e contribuiu com meu crescimento pessoal e profissional. Tenho um agradecimento especial aos amigos Dylan Santos, Francisco Willian, Vitor Dantas e Breno Lucena por terem estado ao lado em todos momentos de dificuldade nessa trajetória, foi uma prova clara de que a união faz a força.

Não posso deixar de citar a importância do Programa de Educação Tutorial (PET) na minha evolução pessoal e profissional. Esse programa, de responsabilidade da Tutora Janaína Machado, me proporcionou experiências com pesquisa, ensino e extensão que me fizeram criar habilidades que a faculdade não proporciona somente na sala de aula.

“Seja cortês com todos, sociável com muitos, íntimo de poucos, amigo de um e inimigo de nenhum” (Benjamin Franklin, 1765).

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo apresentar alguns conceitos voltados aos aerogeradores e, em especial, entender o processo de corrosão que ocorre nas torres de sustentação. Energia eólica é um mercado que, ao longo dos anos, cresce cada vez mais em cunho mundial e o Brasil tem um enorme território propício para a utilização de energia eólica. Entender o funcionamento de um aerogerador, de suas partes metálicas, seu processo de produção e as formas de protegê-lo contra a corrosão atmosférica é um papel importante para a engenharia. Dessa forma, estudar casos de corrosão em torres eólicas, saber quais aços são utilizadas nelas, como o processo de oxidação surge, quais são as formas de proteger tais metais será ressaltado neste trabalho. Aços carbono como o A36 e o S355 são os mais frequentes nessas torres e, com a presença da alta umidade e teores elevados de cloretos encontrada em regiões litorâneas (áreas comuns para parques eólicos), é normal surgir várias formas de corrosão nessas estruturas. A principal forma de proteção das estruturas de sustentação é a utilização de revestimentos orgânicos (tintas) de proteção anticorrosiva. Especificamente, neste tipo de aplicação, é utilizada uma tinta de fundo (em contato com o metal) à base de resina epóxi e uma tinta de acabamento poliuretânica (PU), sendo que o acabamento em PU, garante além da proteção à corrosão uma grande estabilidade à luz.

Palavras-chave: corrosão; aerogerador; torre eólica

ABSTRACT

This paper aims to present some concepts related to wind turbines and, in particular, to understand the process of corrosion that occurs in the support towers. Wind energy is a market that, over the years, has been growing more and more worldwide, and Brazil has a considerable territory suitable for the use of wind energy. Understanding the operation of a wind turbine, its metal parts, its production process and ways to protect it against atmospheric corrosion is an important role for engineering. Thus, studying cases of corrosion in wind towers, knowing which steels are used in them, how the oxidation process arises, and what are the ways to protect such metals will be highlighted in this paper. Carbon steels such as A36 and S355 are the most common in these towers. With the high humidity and high chloride content found in coastal regions (common areas for wind farms), it is normal for various forms of corrosion to appear on these structures. The main form of protection for the support structures is using organic coatings (paints) for anti-corrosion protection. Specifically, epoxy-based bottom paint (in contact with the metal) and polyurethane (PU) finish paint are used in this type of application. In addition to providing corrosion protection, the PU finish ensures excellent stability to light.

Keywords: corrosion; wind turbine; wind tower

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Simulação da evolução da capacidade instalada de energia de 2010 a 2020 -----	17
Figura 2: Capacidade eólica acumulada instalada global (1996 a 2012) -----	17
Figura 3: Curvas de coeficiente de potência em relação a velocidade e de aerogeradores -----	18
Figura 4: Esquemático das partes principais de um aerogerador -----	19
Figura 5: Dispositivos internos de uma Nacele -----	20
Figura 6: Sistema de transmissão da Nacele -----	21
Figura 7: Processo de infusão em uma casca da pá eólica -----	22
Figura 8: Procedimento de fabricação e transporte da pá -----	23
Figura 9: Fluxograma da fabricação de uma pá eólica -----	24
Figura 10: Crescimento da potência dos aerogeradores nos últimos anos -----	25
Figura 11: a) Tubular de aço; b) Betão (concreto); c) Treliçada; d) Tríplice; e) Atirantada -----	25
Figura 12: Desenho esquemático das principais etapas da fabricação de um tramo metálico para torres eólicas -----	26
Figura 13: Ciclo dos metais -----	28
Figura 14: Reações anódicas e catódicas a partir da corrosão atmosférica em um aço -----	29
Figura 15: Torre em testes de montagem antes da preparação superficial -----	29
Figura 16: Principais formas de corrosão -----	30
Figura 17: Tipos de exposição marinha -----	31
Figura 18: Principais íons do Oceano Atlântico -----	32
Figura 19: Representação esquemática das tintas que, em geral, servem para proteção -----	37
Figura 20: Tipos de resinas e solventes apropriados -----	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GW	Gigawatts
ProInfa	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
MW	Megawatts
Cp	Coefficiente de potência
UR	Umidade relativa
Reimpr.	Reimpressão

LISTA DE SÍMBOLOS

\$	Dólar
%	Porcentagem
λ	Lambda
Δ	Delta
ΔG	Energia Livre de Gibbs

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVO	15
2.1	Objetivo principal	15
2.2	Objetivos secundários	15
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
3.1	Energia eólica	16
3.2	Aerogeradores	18
3.2.1	<i>Nacele</i>	20
3.2.2	<i>Pá</i>	21
3.2.3	<i>Torre</i>	24
3.3	Corrosão em Aerogeradores	27
3.3.1	Corrosão em aço carbono	27
3.3.2	Corrosão atmosférica	31
3.3.2.1	<i>Umidade relativa</i>	33
3.3.2.2	<i>Temperatura</i>	34
3.3.2.3	<i>Direção e velocidade dos ventos</i>	34
3.3.2.4	<i>Teor de cloretos</i>	35
3.4	Tintas de proteção anticorrosiva	36
4	CONCLUSÃO	39
5	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Esse trabalho de conclusão de curso tem como proposta o estudo da corrosão que ocorre nas torres estruturais de um aerogerador. Fenômeno que se intensifica ainda mais quando o parque eólico se encontra em regiões com muita maresia. O que é comum, pois muitos são localizados próximos ao litoral brasileiro.

Foi ressaltado o funcionamento de um aerogerador, tendo em vista os materiais que compõem ele. A pesquisa enfoca em dois tipos de materiais, aço e concreto armado, comumente utilizados na construção de aerogeradores.

Sobre as energias renováveis, são formas de atender a demanda populacional utilizando de fenômenos da natureza sem precisar da influência direta do homem. Alguns exemplos de energia renovável são: hídrica (água), solar (sol), eólica (vento), de biomassa (matéria orgânica), maremotriz (marés e ondas) e geotérmica (interior da terra)

Vale citar sobre o crescimento da energia eólica no Brasil e no mundo. Também será apresentado um comparativo entre os demais tipos de energias utilizadas na atualidade.

Alguns fatores podem influenciar negativamente no transporte e instalação dessas torres. Um deles é a grande presença de cloretos que prejudica o aço que se encontra no concreto armado devido penetrabilidade, difusão e corrosão das armaduras (ROMERO, 2014).

Quando se refere a torres de aerogeradores feitas 100% de aço, deve ter uma atenção redobrada no possível surgimento de corrosão generalizada. Essas torres são montadas com aços carbonos e os dois principais utilizados são o A36 e o EN 10025-4 S355m. Isso pode se dar por inúmeros motivos, alguns deles seriam a não utilização de uma tinta protetora adequada para a região ou até a utilização de um aço com baixa resistência à corrosão por ser mais barato, porém pode gerar retrabalhos futuros na estrutura metálica e, conseqüentemente, custos. Fatores como cloretos e corrosão atmosférica são os que mais impactam nesse cenário.

Por fim, o uso de tintas protetores e um bom estudo de clima, velocidades dos ventos temperaturas, levando a utilização do aço coerente para cada região são ações eficientes para evitar problemas com corrosão.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

- Análise da corrosão em torres metálicas de aerogeradores.

2.1 Objetivos secundários

- Mostrar o panorama do Brasil e do mundo no que se refere a energia eólica.
- Expor como funciona um aerogerador, quais seus componentes e funções.
- Dar ênfase na torre que faz parte da estrutura (em especial, às de aço)
- Mostrar os casos de corrosão nessas torres, bem como as suas possíveis causas.
- Relatar possíveis soluções para essas causas.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

3.1 Energia Eólica

A produção de componentes utilizados na construção de Aerogeradores cresce a cada ano. A fabricação de turbinas eólicas teve início na Europa e, até a atualidade responde por grande parte da capacidade instalada mundial. Alemanha e Espanha são os principais fabricantes de pás eólicas.

Nos últimos anos, houve um enorme avanço de instalações de parque eólicos em países como China, Estados Unidos e a Índia, atingindo 75,6 GW; 60,0 GW; 18,4 GW de potência instalada, respectivamente em 2012.

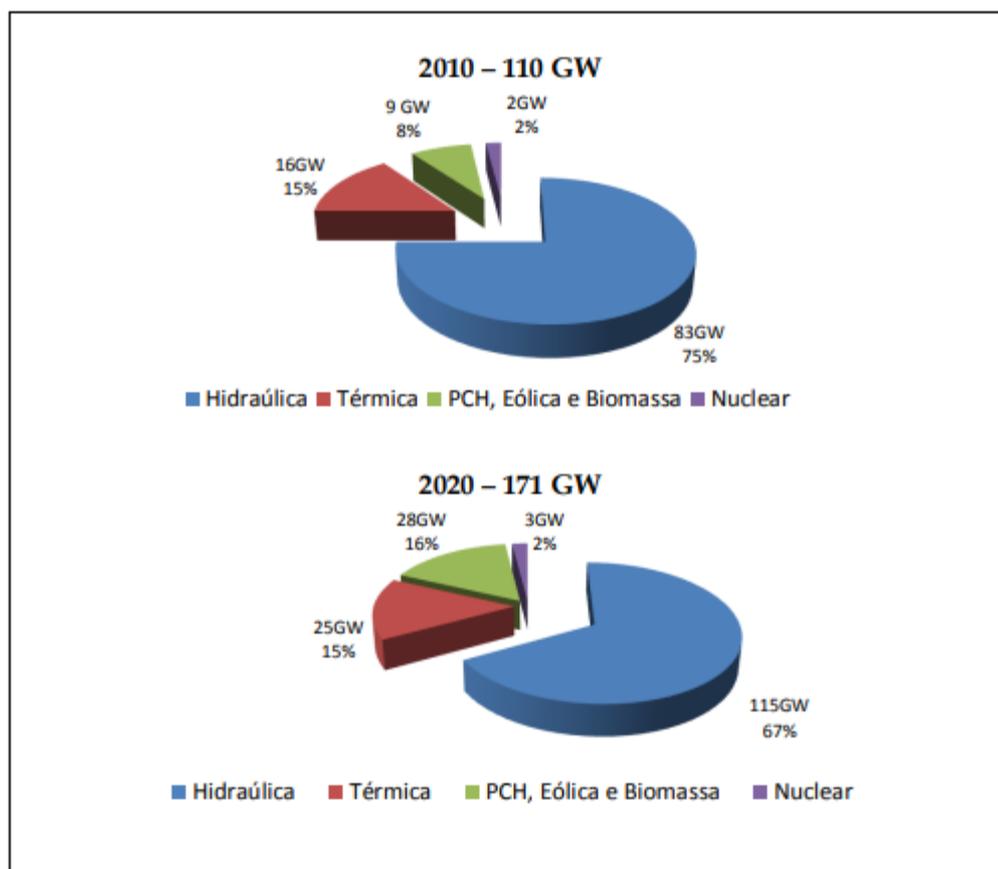
Ao analisar a capacidade do Brasil, é possível citar que ele é um país com uma capacidade de instalação enorme (aproximadamente 143 GW), porém ainda há uma baixa participação dele no ramo eólico mundial. Houve um acréscimo nesse cenário quando foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (ProInfa) na qual colocou metas e meios para a participação dessas fontes no sistema interligado nacional (LAGE, 2013).

No cenário do crescimento da inclusão de novas fontes energéticas, há dois fatores estratégicos: a busca de novos meios para suprir a necessidade energética da população mundial, que está em constante crescimento; e a discussão política dos países na busca de meios de diminuir as emissões de dióxido de carbono na atmosfera.

É bastante observado nas literaturas sobre o custo para obter essas energias, por não ser de tão acessível investimento, porém isso também vem se revertendo nos últimos anos. Por exemplo: em 2005, o preço de acesso à energia eólica era por volta de 300 R\$/MW, em 2011, foi comprada nos leilões ao preço médio de 99 R\$/MW e 105 R\$/MW (TOLMASQUIM, 2012)

Para complementar o raciocínio, buscando ilustrar a tendência de crescimento da energia eólica no cenário mundial, a Figura 1 mostra a mudança do cenário energético após 10 anos de investimentos no território brasileiro, com dados até 2012 e ilustra a tendência de crescimento da energia eólica no cenário mundial.

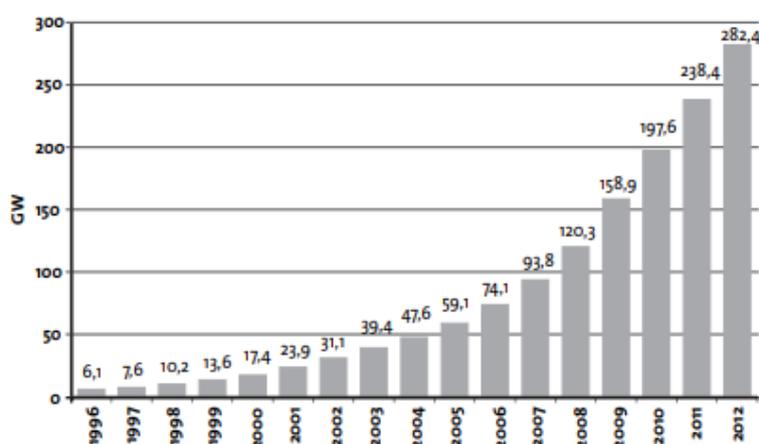
Figura 1: Simulação da evolução da capacidade instalada de energia de 2010 a 2020



Fonte: TOLMASQUIM, 2012, p. 254

Na Figura 2 é possível observar que o nicho que engloba a energia eólica basicamente dobra sua capacidade produtiva nesse intervalo indicando a tendência de alta nesse mercado.

Figura 2: Capacidade eólica acumulada instalada global (1996 a 2012)



Fonte: GWEC, 2013.

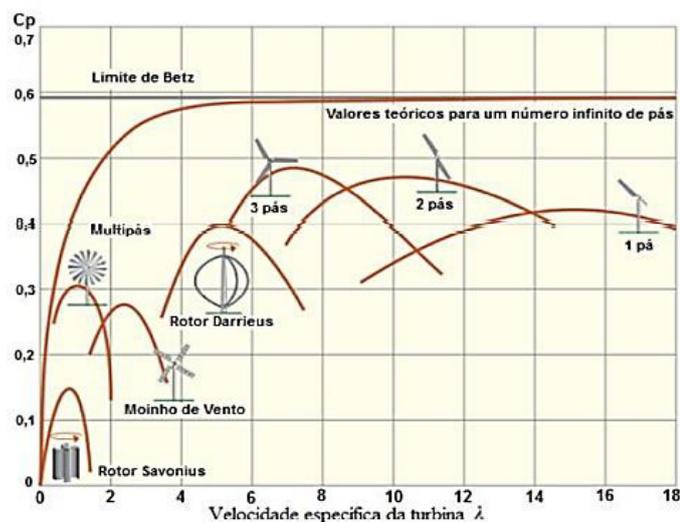
3.2 Aeroeradores

Nesse t3pico ser3 apresentado, em linhas gerais, como ocorre a produ33o de energia a partir do aeroerador e, principalmente, quais os seus componentes e o funcionamento de cada um deles.

Primeiro ponto importante a ser ressaltado 3 que para ser poss3vel a instala33o de um parque e3lico em uma determinada regi3o, deve-se realizar um estudo de clima para calcular se aquele local 3 prop3cio a ventos fortes e constantes. Gera-se um fator chamado coeficiente de pot3ncia (C_p) que quantifica a pot3ncia e3lica que ser3 gerada a partir da energia cin3tica do vento que gira o rotor da turbina e 3 convertida em energia mec3nica. Esse coeficiente pode ser citado como a efici3ncia do aeroerador (DUTRA, 2008).

Outro c3lculo que tem que ser levado em considera33o 3 a velocidade tangencial da ponta da p3 em rela33o a velocidade do vento incidente. A partir de uma f3rmula, gera-se o “*tip speed ratio*” dado pelo s3mbolo λ (HAU, 2006). A raz3o de velocidade espec3fica na ponta da p3, λ , (Tip Speed Ratio – TSR), pode ser escrita como: $\lambda = \omega R / U$. Sendo R o raio da p3, ω , a velocidade angular e U , a velocidade do ar. Quando essas duas grandezas, λ e C_p s3o postas em um gr3fico, 3 poss3vel observar na Figura 3 qual a melhor configura33o de formato de aeroerador a partir do objetivo que voc3 queira atingir.

Figura 3: Curvas de coeficiente de pot3ncia em rela33o a velocidade e tipo de aeroeradores

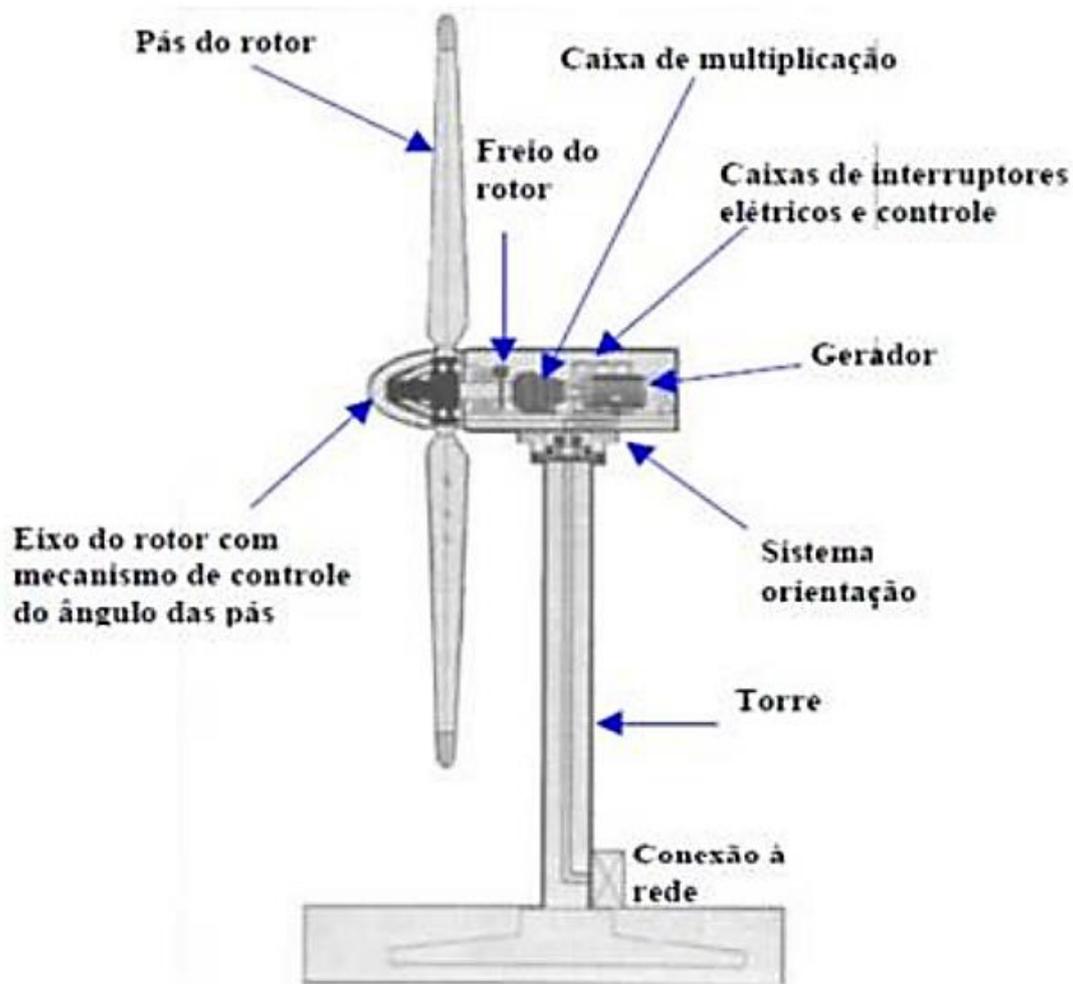


Fonte: HAU, 2006, p.101

O sistema de aerogeradores de 3 pás eólicas, vem passando, ano após ano, por mudanças de tamanhos, tanto das pás como das torres, bem como os seus materiais e métodos de fabricação. Em meados de 1995, as pás tinham por volta de 25 metros de comprimento. Na atualidade, é possível fabricar pás de 85 metros ou mais. Isso influencia diretamente na capacidade de captar a energia cinética dos ventos.

A análise dos componentes de um aerogerador, a figura a seguir ilustra eles. É possível observar Rotor; Sistema de Transmissão Mecânico; Nacele; Controle de Turbina; Torre. Estruturas essas mostradas na Figura 4.

Figura 4: Esquemático das partes principais de um aerogerador



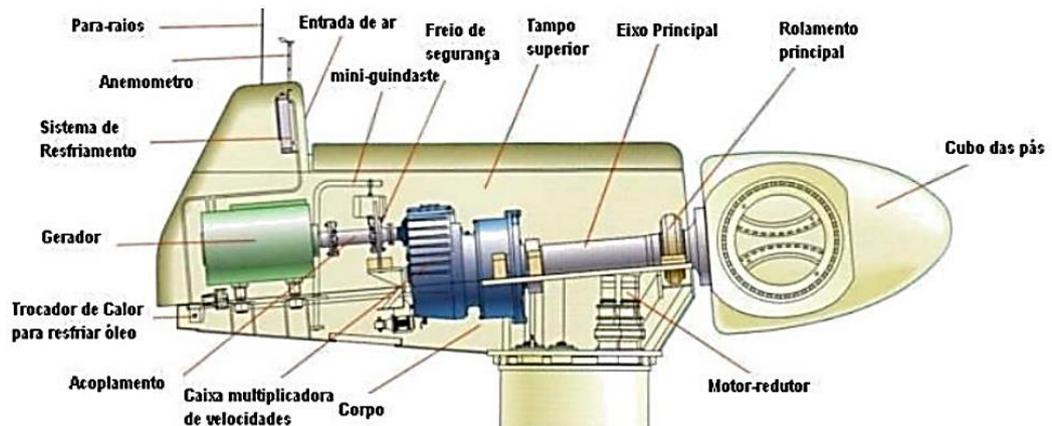
Fonte: MACEDO, 2002.

A seguir serão mostradas as principais informações sobre as três principais partes: Nacele, pás e, por fim, torre que, nesse momento, terá um foco maior devido ser o principal ponto para essa dissertação.

3.2.1 Nacele

Para a análise dos componentes de um aerogerador, inicialmente será apresentada a nacele. A Figura 5 mostra os dispositivos internos de uma nacele.

Figura 5: Dispositivos internos de uma nacele



Fonte: MACEDO, 2002.

Dentro da nacele é possível observar logo a direita da figura 5, o eixo principal que é acoplado no rotor que une as pás eólicas na estrutura do aerogerador. Esse rotor, a partir de todo o sistema de geração de eletricidade composto por diversos componentes, conseguirá converter grande parte da energia mecânica dos ventos em energia elétrica (MACEDO, 2002).

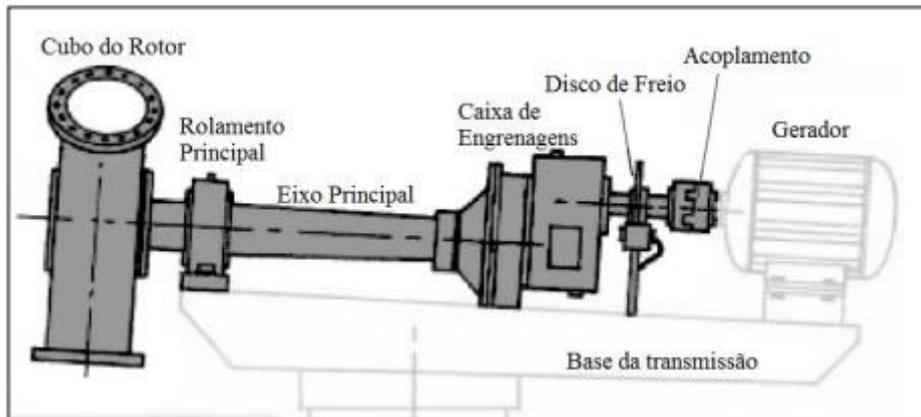
Toda a organização, tamanhos de engrenagens, diâmetro dos cilindros e material metálico usado nas peças tem que ser estudado por engenheiros, pois dependerá da região na qual aquele parque eólico está instalado, o tamanho, peso e quantas (normalmente são três) pás serão instaladas no aerogerador.

Quando se realiza o estudo de campo para a instalação das turbinas eólicas, é calculada a velocidade ideal de rotação das pás para atingir a quantidade máxima de energia. Para isso, existe todo um sistema de frenagem dentro da nacele que serve tanto para manter essa velocidade ideal, como para repousar a turbina em períodos de manutenção ou quando o parque estiver fora de operação. Tendo isso em vista, é possível afirmar que o aço utilizado nessa operação deve ter uma boa resistência a fricção para se adequar a sua função.

A maior parte dos problemas, no corpo da nacele, ocorre na caixa de engrenagens dentro do sistema de transmissão. Essa caixa de engrenagens é montada em contato com o eixo principal, esse eixo de aço transfere a rotação de toda a estrutura do aerogerador para o eixo do

gerador elétrico (VITORINO, 2012). Nessa transição de engrenagens (Figura 6) para o segundo eixo, deve-se ter muito cuidado com a fricção que ocorrerá entre as estruturas e, por isso, é necessário um aço um tratamento que eleve sua dureza como uma têmpera superficial por indução.

Figura 6: Sistema de transmissão da Nacele.



Fonte: PEETERS, 2006.

3.2.2 *Pá*

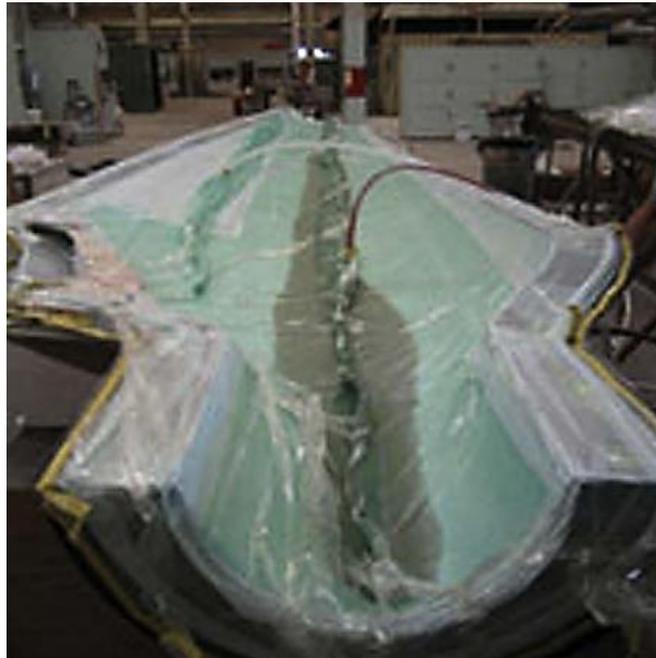
Sobre a fabricação da pá, poucos são os seus componentes metálicos. A base de formação de uma pá eólica é resina epóxi e fibra de vidro. Isso é o que as torna cerca de 6 vezes mais leve do que se fossem feitas de aço. São estruturas extremamente resistentes e, devido seu peso, tal material consegue funcionar perfeitamente para a finalidade de geração de energia eólica.

O processo de fabricação se inicia com dois moldes no formato e tamanho da pá, cada um compondo uma metade. Esse molde deve ser bem limpo, removendo todo tipo de poeira que esteja presente. Depois é aplicado um reagente desmoldante que ajuda a manter a integridade do molde após a remoção da pá, sem gerar trincas nele. Posteriormente, tem-se mais um reagente em forma de gel no qual auxilia na remoção da pá.

O processo segue com a acomodação das camadas de fibra de vidro (“layup”) que são organizadas em encaixes de pedaços menores no decorrer do molde seguindo especificações do projeto. Em seguida, são adicionadas peças estruturais de materiais diversos para ajudar na sustentação e resistência das pás chamados de “core”, materiais esses podem ser madeiras, espumas, carbono ou até outras estruturas pré-fabricadas de resina epóxi e tecido também

(SCHUBEL, 2010). Após a acomodação de todas as camadas e dos componentes que vão gerar o fluxo correto de resina, o molde é todo coberto por um plástico que vai ser vedado para o encaixe das mangueiras e para início ao processo de infusão (injeção) da resina. Na Figura 7 é possível observar no molde que o plástico já está puxado e acomodado e a infusão da resina está se iniciando.

Figura 7: Processo de infusão em uma casca da pá eólica.

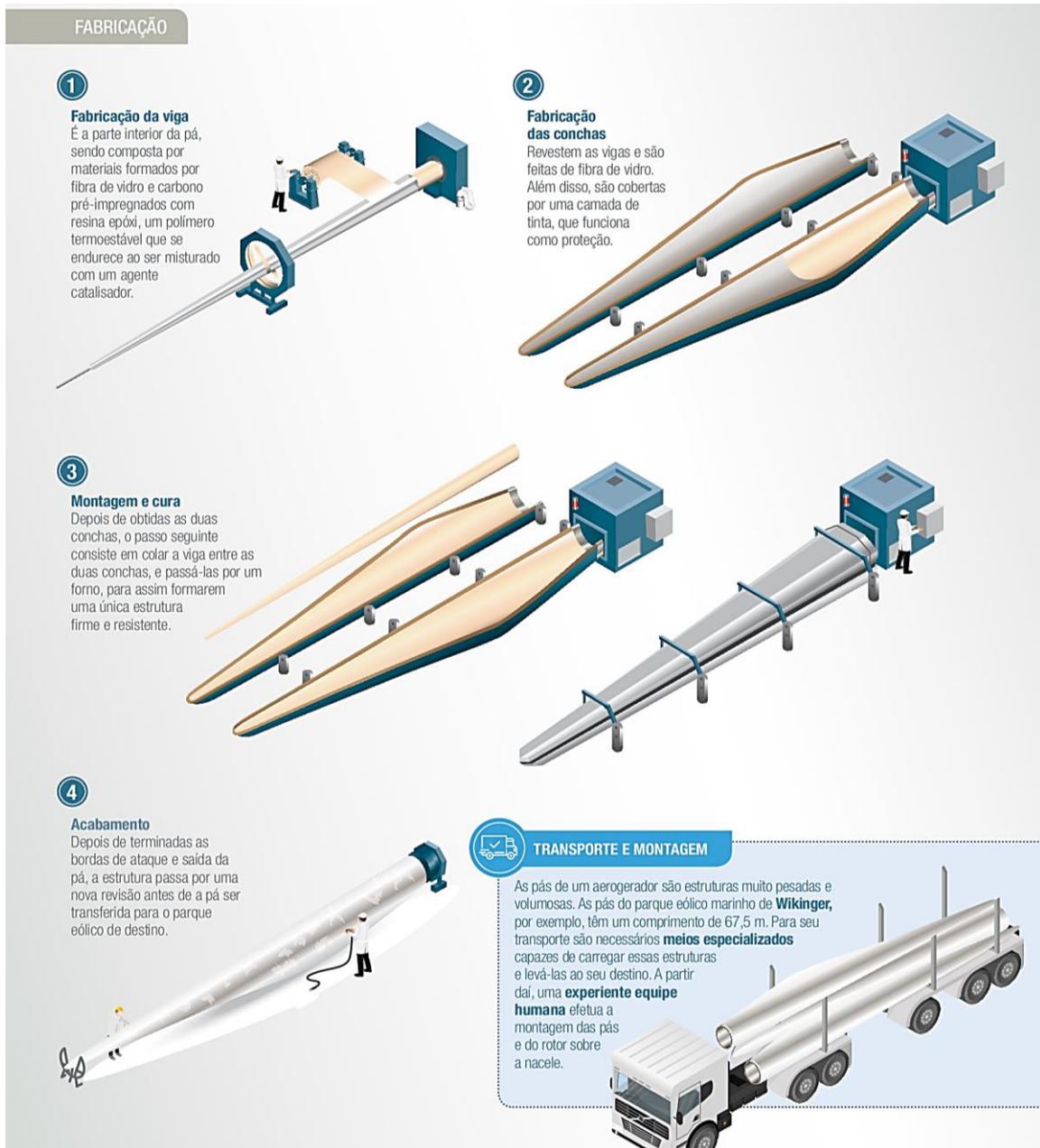


Fonte: SCHUBEL, 2010.

Após essa infusão, o próximo processo será a remoção desse plástico. Posteriormente é colada uma ou duas estruturas chamadas vigas ou “*shear webs*” ou “almas” (na Figura 8 é possível observá-las sendo posicionadas na etapa 3). Essas estruturas darão, mais sustentação, firmeza e resistência às pás. Elas são de extrema importância principalmente em pás de grande porte que irão receber ventos de 80km/h ou, em casos, até mais.

Por fim, ocorre a cura da massa que colou as almas ou “*shear webs*” e é aplicada mais uma camada de massa agora nas laterais e na região que irá receber a outra extremidade das almas no outro molde. E, então, o molde é fechado um com o outro por meio de braços mecânicos. É esperado o tempo e temperatura para essa massa curar e, finalmente, o molde é aberto, a pá é retirada para ser pintada e transportada. Segue um fluxograma do processo de fabricação de pá na Figura 9.

Figura 8: Procedimento de fabricação e transporte da pá



Fonte: IBERDROLA. 2022

Figura 9: Fluxograma da fabricação de uma pá eólica



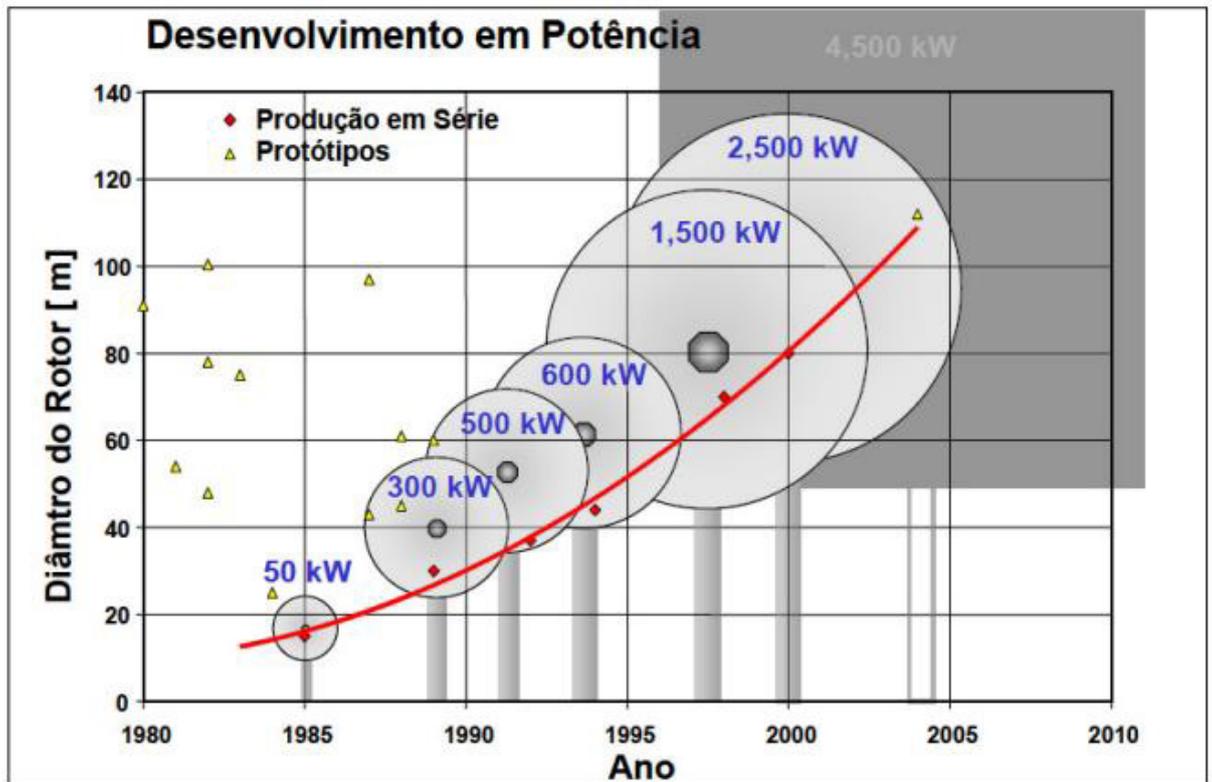
Fonte: PRÓPRIO AUTOR, 2021.

3.2.3 Torre

Sobre as torres de sustentação da nacela e do rotor dos aerogeradores, o primeiro ponto a se citar é a respeito da sua altura. No decorrer dos anos a altura das torres vem crescendo, tendo em vista que para os ventos, quanto maior a altitude da região, maior será a velocidade deles e, com isso, maior será a geração de energia.

O primeiro aerogerador criado tinha por volta de 20 metros (MOLLY. 2001) de altura, enquanto, na atualidade é possível observar que esse número já está quase na faixa dos 200 metros, tendo aumentado em quase 10 vezes. Na Figura 10 é possível observar o crescimento da potência dos aerogeradores nos últimos anos em função do diâmetro do rotor.

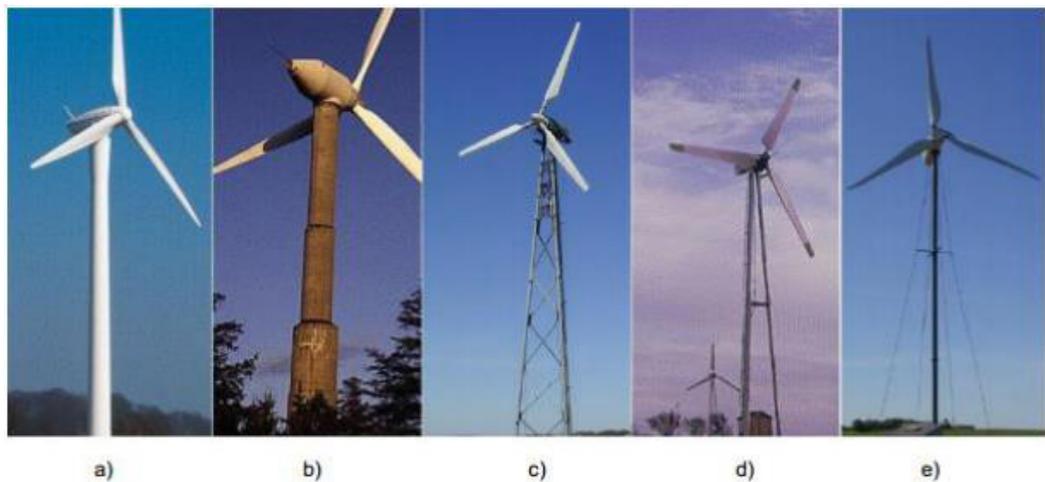
Figura 10: Crescimento da potência dos aerogeradores nos últimos anos



Fonte: MOLLY. 2001

Sobre o formato dessas torres, é possível citar o formato tubular, o treliçado, atirantada. Na Figura 11 é possível ver alguns tipos.

Figura 11: a) Tubular de aço; b) Betão (concreto); c) Treliçada; d) Tríplice; e) Atirantada



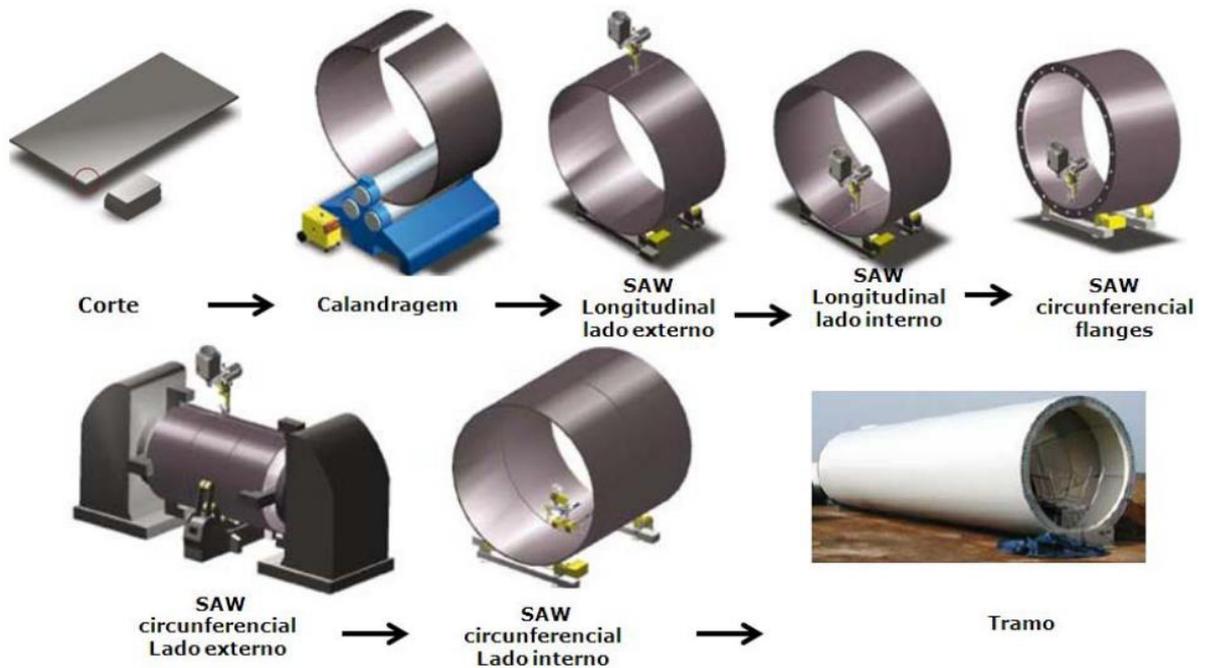
Fonte: PESTANA, D. (2016)

Existem alguns exemplos de materiais que podem ser usados nas torres de aerogeradores. Dentre eles: Cascas de aço soldado, cascas de aço junto por fricção, betão (concreto), mistas (concreto mais aço) e, em menor quantidade, madeira.

Tais materiais influenciam diretamente na resistência dessas torres, nos seus custos e na sua durabilidade. Dessa forma, as torres eólicas feitas de aço tem boa durabilidade, seu investimento é melhor que a de concreto, tem bastante resistência principalmente quando comparadas às demais.

Na fabricação da torre do aerogerador mostrado na Figura 12, o processo se inicia com uma chapa de aço carbono que é cortada e dobrada mecanicamente para formar o cilindro oco para a soldagem das outras peças. Essas chapas dobradas são soldadas ou parafusadas de forma a primeira ficar mais grosseira e a última, já próxima a nacelle é a mais fina. Dentro da estrutura pode ser encontrado escadas ou até elevadores para facilitar a locomoção para subir na área do motor.

Figura 12: Desenho esquemático das principais etapas da fabricação de um tramo metálico para torres eólicas.



Fonte: OLIVEIRA, L. 2014

Por fim, dando foco às torres eólicas de aço, nos próximos tópicos serão apresentados a importância do estudo de corrosão no aço carbono usados nessas torres. Principalmente, na atualidade onde recursos estão sendo investidos em parques aerogeradores “OffShore” (dentro do mar), e é ainda mais relevante sabermos as formas corretas de utilizar

proteção adequada nos aerogeradores. Isso tudo para evitar anomalias futuras como trincas geradas por corrosão generalizada devido a um mau planejamento da defesa contra corrosão ao aço carbono.

3.3 Corrosão em Aerogeradores

O processo de corrosão compromete a integridade mecânica e pode gerar danos permanentes em equipamentos elétricos e estruturas de sustentação. Segundo um estudo do Centro de Pesquisa da Eletrobrás (CEPEL), os custos com essa ocorrência no Brasil, considerando todos os setores produtivos, giram em torno de 3,5 % a 4% do PIB anual (SERRA, 2014). Embora não haja estudos detalhados, estima-se que os gastos causados pela corrosão, no setor elétrico, sejam da ordem de US\$ 1 bilhão.

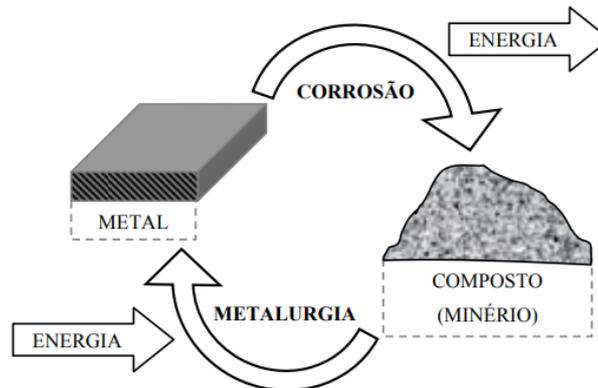
A utilização de técnicas no combate à corrosão pode gerar uma economia de cerca de 20% do custo anual. De acordo com a equipe de Corrosão do Cepel, foi constatado que 22% dos gastos com corrosão poderiam ser evitados se a proteção anticorrosiva fosse adequadamente implantada utilizada no projeto das estruturas e equipamentos (SERRA, 2014).

Assim, serão apresentados nos tópicos a seguir alguns fundamentos sobre a corrosão que podem ocorrer em aerogeradores, causas e processo de mitigação.

3.3.1 Corrosão em aço carbono

A corrosão é um processo espontâneo. A metalurgia consiste em adicionar energia no composto mineral de ferro e carbono em meio a vários processos e gerar o aço. Já quando esse aço entra em contato com a natureza, principalmente em ambientes corrosivos (por exemplo com umidade elevado e alto índice de impurezas), tende a liberar energia para o meio ambiente e esse aço volta ao seu estado de composto mineral. No processo de corrosão ocorre uma diminuição da energia de Gibbs (ΔG) do sistema garantindo que o estado mais espontâneo da matéria será atingido. A Figura 13 ilustra bem essa definição.

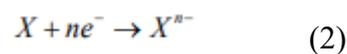
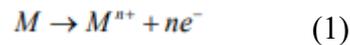
Figura 13: Ciclo dos metais



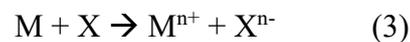
Fonte: SICA, Y. C. 2006

Para a oxidação do aço carbono nas torres eólicas ocorrer, tem que primeiramente, o metal entrar em contato com o eletrólito, que neste caso é uma fina camada de água entre o metal e o meio ambiente. Isso não é difícil de imaginar quando observamos que as torres ficam em contato com a atmosfera recebendo a umidade do ar (SICA. 2006).

O fundamento eletroquímico para a corrosão ocorrer consiste, em linhas gerais, em duas reações na Figura 14, uma anódica (1) (perda de elétrons) e outra catódica (2) (ganho de elétrons)



Quando o metal M entra em contato com um meio eletrolítico, inicia-se o processo eletroquímico e a região do substrato que tiver maior potencial de oxidação irá ser o agente redutor e, portanto, sofrerá o processo de oxidação. Enquanto o outro irá sofrer o processo de redução e a reação global (3) fica da seguinte forma:



Corrosão em placas atinge determinadas regiões da chapa metálica.

Corrosão alveolar produz sulcos de fundo arredondado onde a profundidade é menor que o seu diâmetro.

Corrosão puntiforme (também chamada de corrosão por pite) se concentra em pontos de pequena área, porém de grande profundidade.

Corrosão filiforme gera finos filamentos em diferentes direções.

Corrosão em torno do cordão de solda ocorre devido a concentração energética que fica na área que foi realizada a solda. Esse caso de corrosão deve ser dado como crítico no caso das torres que possuem suas uniões dos segmentos soldados.

Figura 16: Principais formas de corrosão

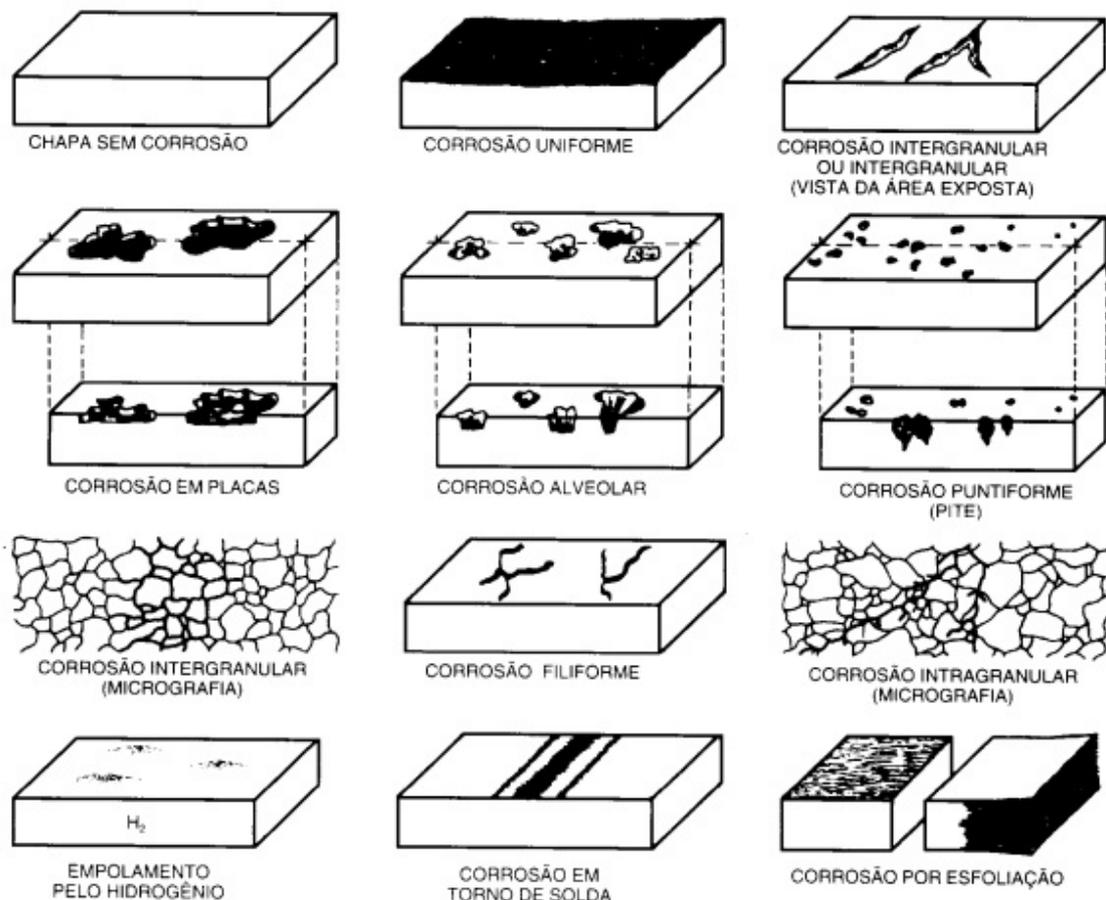


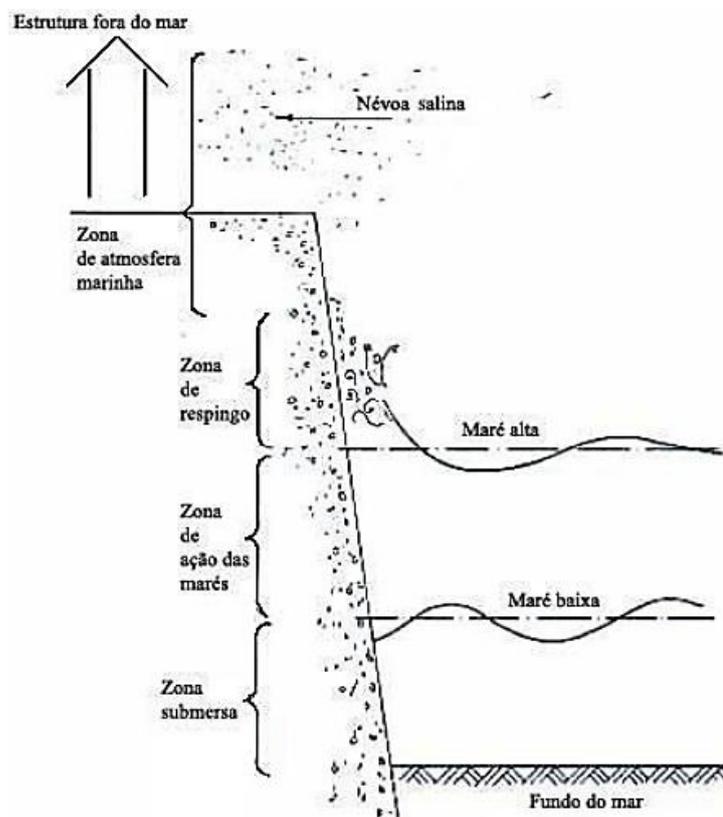
Figura 16: GENTIL, 2011

3.3.2 Corrosão atmosférica

Todo material metálico que esteja exposto aos agentes agressivos presentes na atmosfera, sofrerá corrosão. Seguindo o nosso estudo das torres eólicas, com esse material não será diferente. Deve ser analisado as condições e as causas dessa corrosão para poder ser montada a estrutura da torre da forma mais segura e perene possível. Para isso, são feitos estudos em laboratórios para simular as condições ambientais na região e como o aço que será utilizado naquela atividade irá se comportar.

A velocidade da corrosão em áreas de atmosfera marítima é 30 a 40 vezes mais rápida do que em atmosfera rural (HELENE, 1981). Outro detalhe é em qual zona o aço em específico se encontra. Tomando como base os aerogeradores instalados nos mares (*OffShore*), eles têm em sua estrutura uma zona da torre que esta totalmente submersa na água, uma zona de névoa, uma zona da variação da maré e uma zona de respingo da maré. Foi concluído que a área de respingo é a mais agressiva de todas. Já a área totalmente submersa na água é a que sofre menor taxa de corrosão (BURY e DOMONE, 1974; NEVILLE, 1982; TAYLOR, 1992; MEHTA e MONTEIRO, 1994). A Figura 17 a seguir ilustra essas zonas

Figura 17: Tipos de exposição marinha



Fonte: CEB-FIP, BULLETIN, 1992

A água das chuvas, a umidade do ar, a radiação solar, os agentes contaminantes presentes no ar como SO_2 , SO_3 , SO_4 , H_2S , NO_x , íons cloretos, entre outros são agentes causadores do processo de corrosão atmosférica em determinada região, saber o grau de presença deles no ambiente é um ponto crítico para tomada de decisão na escolha do material que será utilizado (SICA. 2006).

Quando se cita sobre um ambiente de maresia, que é o mais comum para a instalação de parques eólico o teor médio de sais é na faixa de 3,5% (35 g/L) (MEHTA e MONTEIRO. 1994). As águas marítimas têm uma composição química uniforme que pode ser descrita pelos valores mostrados na Figura 18 conforme a norma DIN 4030 (1991).

Figura 18: Principais íons do Oceano Atlântico

Íons	Quantidade de íons (mg/L)
SO_4^-	2.800
Mg^{++}	1.300
Ca^{++}	400
Cl^-	19.900
Na^+	11.000
K^+	400
pH	> 8

Fonte: NORMUNG, 1991.

É possível observar que 52% da composição dos mares são de íons cloreto. Nas torres de concreto armado com aço no seu interior, ao presenciarem regiões com um teor muito alto de cloretos sofreram corrosão devido ele ser o agente mais agressivo (HELENE, 1986).

Por isso, deve ter cuidado com respeito a sua interferência na corrosão. Dando mais detalhes sobre a influência da umidade relativa, da temperatura, da velocidade e direção dos ventos e do teor de cloretos, o próximo tópico englobará cada um.

3.3.2.1 Umidade relativa

A umidade relativa é a porcentagem de vapor de água em relação a quantidade de ar no sistema. O aumento da taxa de corrosão a partir da umidade relativa crítica está relacionado com a formação de uma camada de água na superfície do metal. A superfície isenta de impurezas, mesmo com o aumento da umidade, apresenta uma baixa taxa de corrosão. Em atmosferas contaminadas e superfície (parcial ou totalmente cobertas) contendo impurezas, o comportamento pode ser bastante diferente. O cálculo da Umidade Relativa (UR) é realizado pela seguinte Equação (4) na qual P é a pressão parcial do vapor existente à temperatura média da região em estudo e P_s é a pressão de saturação a essa mesma temperatura (PONTES, 2006)

$$UR = \frac{P}{P_s} \times 100 \quad (4)$$

A umidade é importante no estudo da corrosão atmosférica pois, em níveis de 60 a 80%, dependendo dos aços, ela pode ser insignificante por não ter uma quantidade suficiente para formar uma película de formação do eletrólito para as trocas iônicas.

Em um ar com contaminantes, esse valor limite de UR para o surgimento ou não de uma corrosão já cai para 50% devido ao fator dos poluentes industriais e sais marítimas serem passíveis de trocas metálicas. Em atmosferas ricas em cloretos esse número pode cair para 40%. (SICA, 2006).

Em torres de concreto armado quando são atingidos níveis de umidade relativa de 95% ou mais, a corrosão aumenta até a sua taxa máxima (TUUTTI, 1982). Outro detalhe é que, por o concreto armado ter uma alta capacidade de absorver água, intensifica ainda mais os teores de corrosão no sistema (FIGUEIREDO e HELENE, 1994)

A corrosão se intensifica quando aquele aço presente na torre passa por ciclos de “seco e molhado” (MENDOZA e CORVO, 1999). Isso ocorre devido a região superficial do aço fica em contato com a atmosfera (no caso, o oxigênio atua como agente oxidante) e as gotas de água que ficarão na superfície do aço atua como o eletrólito do sistema.

Todos os fatores que interferem na corrosão atmosférica em um aço devem ser analisados em conjunto. Uma influência no resultado do outro o próximo tópico mostrará que a temperatura é diretamente proporcional a umidade relativa em muitos dos casos das instalações de parques eólicos em regiões litorâneas.

3.3.2.2 Temperatura

Com a uma grande incidência dos raios solares, ocorre um aumento da temperatura da região. Isso, combinado a altas taxas de umidade relativa e contaminantes no local, faz com que a temperatura atue como catalisadora da reação, deixando o processo de corrosão atmosférica mais severo.

Vale ressaltar que para a temperatura ganhar mais relevância, ela deve se manter elevado durante longos períodos (SICA, 2006). Isso é possível em regiões do Nordeste por exemplo. Em uma grande época do ano estados como o Ceará mantém-se em altas temperaturas e, com isso, vale um cuidado redobrado nos parques eólicos desses locais.

Em determinados casos, a temperatura influencia na condensação da água que tiver próxima ao metal no qual está sendo analisado. Temperaturas baixas causa um aumento na umidade relativa que, ao ultrapassar o nível crítico, potencializa as taxas de corrosão (GNECCO, 2017). Já se a temperatura for alta, vai diminuir a condensação do vapor de água da superfície metálica, reduzindo a velocidade de corrosão devido a retirada do eletrólito do sistema.

A temperatura também tem influência quando relacionada ao cloreto. Com o seu aumento, facilita a penetração dos íons cloretos no sistema (GOÑI e ANDRADE, 1990). Foi observado por Tuutti (1982) que ao fazer testes em aços a temperaturas de -20°C os resultados foram que a taxa de corrosão reduz em 10 vezes a cada diminuição de temperatura de 20 graus abaixo de 0°C .

3.3.2.3 Direção e velocidade dos ventos

Dentro os principais motivos para os ventos influenciarem nas taxas de corrosão atmosférica em determinada região são: trazer particulados contaminantes de áreas industriais e que ventos muito fortes podem gerar a corrosão por “abrasão eólica” no sentido no qual está direcionado (GNECCO, 2017).

Em casos de tempestades, podem aumentar os teores de sais da região, mesmo que em pequenas quantidades, mas irão, em longo prazo, acelerar o processo corrosivo. É possível afirmar que, ao aumentar a velocidade dos ventos de 5 para 20m/s causa uma taxa de crescimento da quantidade de partículas maiores de $0,5\ \mu\text{m}$ duas vezes superior as partículas entre $0,01$ e $0,045\ \mu\text{m}$. (PIAZZOLA e DESPIAU, 1997). Ou seja, ventos mais velozes trazem partículas maiores. A relação velocidade dos ventos e a concentração de particulado na

atmosfera é uma relação exponencial segundo Woodcook (1953 apud PONTES, 2006), Lovett (1978), Taylor e Wu (1992), Gusstafsson e Franzén (1996) e Meira (2004).

Há uma relação direta da velocidade dos ventos com a tempo de atuação dos íons cloretos no aço (MORCILLO, 1998).

Foram determinadas velocidades críticas para os ventos tornarem o processo mais agressivo possível. Esses valores variam entre 7 e 11m/s (SPIEL e LEEUW, 1996). Já há estudos que indicam o valor de 5m/s (PIAZZOLA e DESPIAU, 1997). Também foi visto que com 3m/s em regiões com altos teores de contaminantes, já torna o processo crítico (MORCILLO, 1998).

3.3.2.4 Teor de cloretos

Os íons cloreto (Cl^-) que estiverem presentes na umidade do ar em regiões próximas a orla marítima geram uma elevação na condutividade do eletrólito presente na superfície do metal em análise e tende, ainda, a destruir o filme passivante que fica nessa superfície.

Quanto mais próximo da orla, maior a concentração desses íons provenientes do NaCl que surgem após o processo de maresia. Após esse espalhamento dos íons na atmosfera, os mais finos são levados pelos aerossóis por até centenas de quilômetros. Porém para esses íons gerarem um grande efeito de corrosão no aço, as partículas devem ter menos de 10 μm de diâmetro e essa só conseguem percorrer até cem metros, a partir dessa distância já se torna mais seguro para a instalação do produto metálico. Para o caso dos aerogeradores em alto mar esses estão extremamente suscetíveis a tais íons. (GNECCO, 2017).

Como foi mostrado anteriormente, a maioria dos parques eólicos encontram-se em regiões litorânea. Para comprovar que quanto mais próximo do litoral, maiores os teores de clores e, conseqüentemente, mais agressiva é a atmosfera, Castro, De Rincón e Pazini (1999) fizeram ensaios em amostras a 50m, 100m e 780m e observou-se uma grande diminuição da intensidade de penetração desses íons de 50 para 780m. Dessa forma, a manutenção das torres de aerogeradores mais próximas ao mar devem ser realizadas com maior rigorosidade devido aos impactos da corrosão atmosférica.

Há concentrações específicas de íons cloreto que devem ser superadas no sistema para iniciar a corrosão no aço. Steinour et al. (1964 apud PONTES, 2006) afirma, após diversos ensaios, que teores de apenas 0,25 de cloreto de cálcio já torna o meio mais agressivo. Já Helene (1993) comprova que essa concentração é de 0,3% e Andrade (1992) 0,4% para que os íons cloretos se tornem críticos.

3.4 Proteção Anticorrosiva dos Aeroogeradores

Para a fabricação dos aeroogeradores, em especial na torre, usa-se aços carbonos como o A36 e o EN 10025-4 S355m. Dessa forma, estão suscetíveis a corrosão atmosférica. Em busca de proteger a superfície de tais metais, existem vários métodos a serem utilizados. Porém, na indústria eólica o mais comum é o uso de tintas com propriedades anticorrosivas.

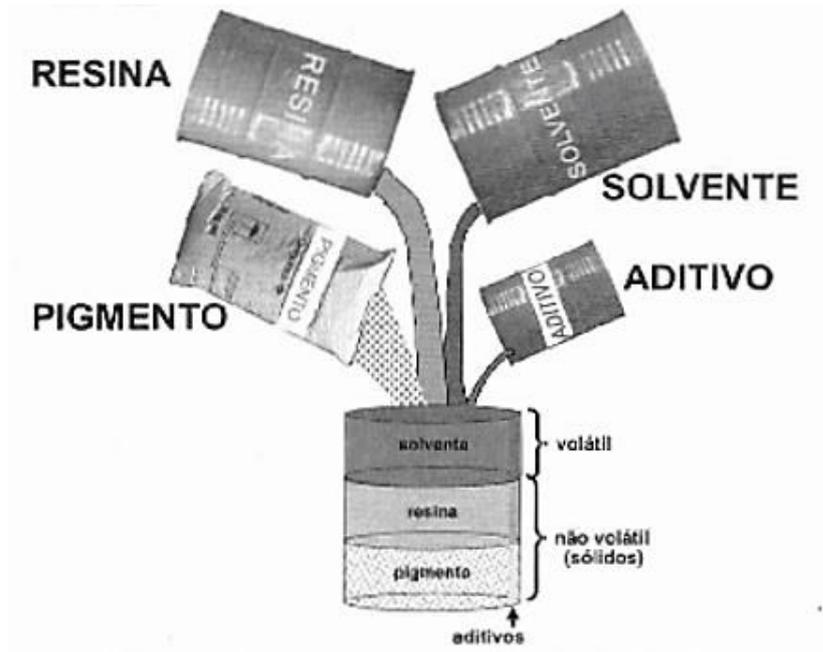
No que se refere as tintas de proteção anticorrosiva, muitas são as suas vantagens. Pode ser citada a facilidade de aplicação e manutenção, custo-benefício benéfico aos compradores, baixa rugosidade, impermeabilidade, dentre outras funções.

É importante salientar que antes da aplicação da tinta anticorrosiva, preparar a superfície é uma etapa muito importante na eficiência da tinta na proteção contra corrosão.

O preparo da superfície tem dois objetivos. Primeiramente, realizar uma limpeza superficial, onde ocorre uma remoção das impurezas sobre a superfície do aço que podem impedir o contato direto da tinta com o aço, tais como pós diversos, gorduras, óleos, combustíveis, graxas, ferrugem etc. Em segundo lugar, aumentar a rugosidade superficial do aço, que proporciona um aumento da área de contato entre o metal e a tinta, aumentando assim, a aderência da tinta (GNECCO, 2017).

Tinta é um material químico que, ao ser aplicado à superfície passa por um processo de cura ou secagem e transforma-se em um filme sólido, aderente, impermeável e flexível. No caso do aço em específico, a tinta utilizada tem a função protetiva. Em sua composição contém resina, solvente, pigmento e aditivos que formulam a proteção necessário ao aço, como mostra na Figura 19. Também vem sendo desenvolvidas fórmulas cada vez menos agressivas ao meio ambiente, por exemplo, diminuindo a quantidade de compostos orgânicos voláteis, os chamados VOC (FAZENDA, 2005). As tintas utilizadas em torres de aeroogeradores devem possuir boa resistência a abrasão, proteção por barreira e radiação ultravioleta

Figura 19: Representação esquemática das tintas que, em geral, servem para proteção



Fonte: GNECCO, 2017.

O solvente tem a função de dissolver a resina e é um composto 100% orgânico. Alguns exemplos de solventes utilizados são glicóis (etil glicol, butil glicol, acetato de etil glicol), cetonas (metil etil cetona-MEK, ciclohexanona) e álcoois (álcool isopropílico e álcool butílico) (GNECCO, 2017). A resina tem função de ser ligante e responsável pela propriedade adesiva, impermeabilidade e flexibilidade. Para aços, algumas resinas utilizadas são as acrílicas, epoxídicas, poliuretânicas e silicone. Na Figura 20 é possível observar que, para cada tipo de resina utilizada na tinta existe um tipo de solvente mais usado para realizar a mistura.

Figura 20: Tipos de resinas e solventes apropriados

Tipo de resina	Tipo de solvente mais usado
Alquídica	Aguarrás ou xileno ou misturas destes
Acrílica	Misturas de acetatos, xileno, cetonas e álcoois cíclicos
Epóxi	Misturas de MEK e MIBK com xileno e álcool butílico
Poliuretano	Acetato de etila, acetato de butila e misturas de MEK e
Etil silicato de zinco	Álcool isopropílico e álcool butílico
Silicone	Xileno e tolueno

Fonte: GNECCO, 2017.

Outro componente a ser analisado é o pigmento. Ele é um pó fino que pode ser colorido, branco, preto, metálico, anticorrosivo e inerte. Analisando em destaque os anticorrosivos, ele é capaz de proteger o aço utilizado nas torres dos aerogeradores. Já um inerte, não tem essa propriedade anticorrosiva, mas tem boa resistência a abrasão e fosqueamento das tintas e o pigmento age somente como uma barreira (PANNONI, 2007)

Dando destaque ao pigmento anticorrosivo, sua importância surge devido ao fato de que a resina é um material permeável e, por isso, gases, vapores, umidade entram em contato com a camada de aço. Tal pigmento promove a neutralização de reações agressivas ao aço, alcalinizando ele. Em meio alcalino, o aço se torna praticamente livre de corrosão. Os pigmentos mais utilizados nos aços carbonos são: Fosfato de zinco, Silicato de cálcio, Zinco metálico, entre outros.

Especificamente para o setor elétrico, incluindo as torres de aerogeradores, uma das tecnologias que pode ser aplicada é a tinta pigmentada com zinco aplicada a rolo e trincha, que pode ser utilizada em condições que apresentam dificuldade de aplicação, condição bem comum nos serviços de manutenção do setor elétrico. O zinco pode atuar como ânodo de sacrifício e no caso de um dano na pintura, pode impedir o avanço do processo corrosivo, protegendo o metal por tempo prolongado (CANALENERGIA, 2019)

Com relação às resinas, recomenda-se uma tinta de fundo (em contato com o metal) à base de resina epóxi e uma tinta de acabamento poliuretânica (PU), sendo que o acabamento em PU, garante além da proteção à corrosão uma grande estabilidade à radiação UV (FRAGATA, 2010).

4 CONCLUSÃO

Os aerogeradores são ferramentas importantes para o abastecimento energético do Brasil e do mundo. Vale ressaltar que o Brasil tem uma vasta capacidade de instalação, cerca de 143 GW, maior do que muitos países Europeus.

O funcionamento de um aerogerador é composto por três principais estruturas: Nacele, Torre e Pá. Na Nacele, encontra-se todo o sistema e transmissão do rotor com as engrenagens e geradores necessários para transformar a energia cinética dos ventos em energia elétrica. A Pá é um compósito feito de fibra de vidro com resina epóxi em sua maioria e, por ser leve, é o material que rotaciona. Já a torre tem uma função estrutural de sustentar a Nacele e as Pás.

Em termos de morfologia, a torre dos aerogeradores sofre principalmente corrosão generalizada e localizada, sendo que a causa é a corrosão atmosférica.

Os principais agentes que aceleram o processo de corrosão contidos na atmosfera são: umidade, temperatura, velocidade dos ventos, cloretos etc.

O principal tipo de proteção utilizado nas torres dos aerogeradores são as tintas anticorrosivas, que agem como uma barreira entre o metal e os agentes agressivos. Normalmente, o sistema de pintura utilizado é composto de uma tinta de fundo epóxi e uma tinta de acabamento poliuretânica.

5 REFERÊNCIAS

- MACEDO, W N. **Estudo de Sistemas de Geração de Eletricidade Utilizando a Energia Solar, Fotovoltaica e Eólica**. 2002. 152 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Engenharia Elétrica). Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará
- P.J. Schubel. **Technical cost modelling for a generic 45-m wind turbine blade produced by vacuum infusion (VI)**. 2010. Division of Materials, Mechanics and Structures, Faculty of Engineering, University of Nottingham, ITRC Building, Room B07, University Park, Nottingham NG7 2RD, UK
- ROMERO, A. **Parque eólico no litoral cearense exige soluções especiais nas torres**. 2014. Revista Engenharia Civil Notícias, inovações e tecnologia.
- CINTRA, J. L. B. **Elaboração de uma atividade didática para compreensão do funcionamento de aerogeradores**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
- TOLMASQUIM, Maurício Tiomno. **Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil**. Estudos Avançados, São Paulo, 26 (74), p. 249–260, 2012
- LEITE, D. B. **Tendências do cenário energético brasileiro: a energia de fonte eólica e o “olhar” dos atingidos**. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 37 n.4 set-dez. 2015, p. 243-250 Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM ISSN impressa: 0100-8307 ISSN on-line: 2179-460X
- GWEC – **Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2011: Annual Market Update**. Bruxelas, 2012. Disponível em:http://gwec.net/wpcontent/uploads/2012/06/Annual_report_2011_
- PEETERS, J., 2006, **Simulation of Dynamic Drive Train Loads in a Wind Turbine**, Universidade Católica de Leuven – Bélgica
- HAU, Erich. **Wind Turbines**, 2nd ed. Springer, 2006.
- SICA, Y. C. **Mapeamento da corrosividade atmosférica de São Luís – MA e a correlação das variáveis ambientais que influenciaram na degradação dos materiais metálicos**. 2006 Trabalho do Curso de Pós-Graduação em Engenharia, Área de Concentração em Engenharia e Ciências dos Materiais, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná
- LAGE, E. S. **Panorama do setor de energia eólica**. Revista do BNDES 39, junho 2013
- OLIVEIRA, L. **Soldabilidade do aço estrutural EN 10025-4 S355m na fabricação de torres eólicas**. 2014. 69º Congresso anual da ABM - Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

MOLLY, J.P., et al, 2011, **Wind Energy in the World**, Wind Energy Seminar 2011, curso proferido pelo instituto Alemão de energia eólica – DEWI, Rio de Janeiro, 23-28 de setembro.

GENTIL, V. 2011, **Corrosão**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 6. Ed. – [Reimpr.] – Rio de Janeiro.

FRAUCHES-SANTOS, C. 2014 **A Corrosão e os Agentes Anticorrosivos**. Rev. Virtual Quim., 2014, 6 (2), 293-309. Data de publicação na Web: 20 de dezembro de 2013

LOUREIRO, M. A. F. **Dimensionamento de torre eólica de 90m**. 2014. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra Departamento de Engenharia Civil

GNECCO, C. **Tratamento de superfície e pintura**. 2017. Instituto Brasileiro de Siderurgia / Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro.

PESTANA, D. A. C. **Sistema estruturais para torres eólicas**. 2016. FCEE – Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia. Campus Universitário da Penteada. Portugal

IBERDROLA. **O que é uma turbina eólica e como funciona**. 2022. Los Ángeles, Espanha. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/pas-aerogeradores>. Acesso em: 16 de janeiro de 2022.

PANNONI F. D. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 2007. 4ª Edição. PERFIS Gerdau Açominas.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4030 Part. 1**. 1991. Assessment of water, soil and gases for their aggressiveness to concrete: principles and limiting values.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. Ed. São Paulo: Pini, 1994.

BICZOK, I. **Corrosion y proteccion del hormigon**. Tradução Emilio J. Dócon Asensi. Bilbao, Ediciones Urno, 1972.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini 1986.

PONTES, R. B. **Disseminação de íons cloreto na orla marítima do bairro de Boa Viagem, Recife-PE**. 2006. Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. 1983. 469 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Swedsh Cement and Concrete Research Institute, Stockolm, 1982.

FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. R. L. **Assim caminha a corrosão**. Técnica, São Paulo, v. 10, p. 28-33, maio/jun. 1994

MENDOZA, A. R.; CORVO, F. **Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel**. Corrosion Science, V. 41, p. 75-86, 1999

GOÑI, S.; ANDRADE, C. **Synthetic concrete purê solution chemistry and rebar corrosion rate in presence of chlorides.** Cement and concrete research, v. 20, p. 525-539.

PIAZZOLA, J.; DESPIAU, S. **Contribution of marine aerosol in the particle size distributions observed in Mediterranean coastal zone.** Atmospheric Environment, v. 18, p. 2991-3009, 1997.

WOODCOCK, A. H. **Salt nuclei in marine air as a function of altitude and Wind force.** Journal of Meteorology, v. 10, p. 362-371, 1953.

LOVETT, R. F. **Quantitative measurement of airborne sea-salt in the North Atlantic.** Tellus v. 30, P. 358-364, 1978.

TAYLOR, N. J.; WU, J. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. C5, p. 7355-7360, 1992.

GUSTAFSSON, M. E. R.; FRANZÉN, L. G. **Dry deposition and concentration of marine aerosol in a coastal área, SW Sweden.** Atmospheric Environment, n. 30, p. 977-989, June, 1996.

MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marina frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado.** 2004a. 346 f. Tese (Doutorado em engenharia civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MORCILLO, M. **Fundamentos de la corrosion atmosférica de metales. Mapas de corrosividad atmosférica.** In: Corrosion y Proteccion de Metales em Las Atmosferas de Iberoamerica – Proyecto Mycat – Madrid 1998

CASTRO, P.; DE RICON, O. T.; PAZINI, E. **Chloride penetrarion profiles in marini environments.** In: II International Conference on High-performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, 1999.

HELENE, P. R. L. **Corrosão das armaduras de concreto armado.** In: Aplicação da tecnologia do concreto, 4., p. 1-44, 1981, São Paulo. Anais. São Paulo: Simpatcon, 1981.

COMITÉ EURO – INTERNATIONAL DU BÉTON. **Durability of concrete structures-design guide.** Bulletin D' Informação 183. Lausanne: Thomas Telford, 1992

SERRA, E. T. **Corrosão e Proteção Anticorrosiva dos Metais no Solo.** Editora Interciência; 1ª, edição, 2014.

CANALENERGIA. **Medidas anticorrosivas podem gerar economia de 20% ao setor.** 2019. Bahia, Brasil. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53105304/medidas-anticorrosivas-podem-gerar-economia-de-20-ao-setor-diz-estudo>. Acesso em: 23 de janeiro de 2022.

STEINOUR, H. H. **Influence of the cement on the corrosion behavior of steel in concrete.** Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, Skokie, Illinois, May, 1964.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. 231 f. Tese (Livre docência em Engenharia Civil)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas e vernizes: ciência e tecnologia.** Edgard Blücher, 2005.

ANDRADE, M. C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** Tradução e adaptação Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: Pini, 1992.

FRAGATA, F. **Desempenho De Tintas De Acabamento Frente Às Radiações Ultravioleta, UVA e UVB, e condensação de umidade.** Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010

BORDA, T. M. D. **Avaliação da Soldabilidade do Aço Sincron EN 10025-4 S355M Aplicado na Fabricação de Torres Eólicas com Processo de Soldagem de Alta Deposição.** 2017. Usinas Siderurgicas de Minas Gerais S.A – USIMINAS, Centro de Pesquisa & Desenvolvimento, Ipatinga, MG, Brasil.