

**FAMIG – FACULDADE MINAS GERAIS
SANDRO MITCHEL DE ANDRADE**

MANUTENÇÃO EM PARQUES EÓLICOS

**Belo Horizonte
2024**

SANDRO MITCHEL DE ANDRADE

MANUTENÇÃO EM PARQUES EÓLICOS

Projeto de Pesquisa apresentado ao Prof.º
Diego Rosa Queiroz de Jesus, como requisito
parcial para aprovação na Disciplina Trabalho
de Conclusão de Curso

Belo Horizonte

2024

AGRADECIMENTOS

A Deus pela sabedoria, força, paciência e por me proporcionar o direito de ser chamado de Engenheiro de Produção. A Ele seja a glória para sempre. Amém!

A minha esposa Ana Flávia e meus filhos Pedro Emanuel e Benjamim pela atenção, carinho e compreensão em meus momentos de ausências.

Ao professor Diego Rosa Queiroz de Jesus, meu orientador, pela competência e apoio no decorrer deste trabalho.

Muito obrigado!

Resumo

A geração de energia renovável tem um papel fundamental nos dias atuais face a transição energética de forma global. Este cenário não é diferente no Brasil. O país tem investido esforços no sentido de acompanhar este processo gerando energia de uma forma mais sustentável. Dentro deste contexto temos a geração de energia eólica, que através da força dos ventos produz energia limpa, sustentável à custos menores. Para que este processo ocorra de forma assertiva e adequada é necessário um componente fundamental nesta equação que são parques eólicos, e por sua vez turbinas eólicas que operem com alta disponibilidade e confiabilidade. Porém, este cenário somente será possível através da implementação de um plano de manutenção adequado e aderente aos respectivos parques eólicos. Desta forma, este trabalho tem por objetivo trazer diretrizes de orientação para o desenvolvimento deste plano de manutenção, levando em consideração não só os aspectos técnicos das turbinas eólica mas também nuances como local de instalação, recursos a serem utilizados, tipos de manutenções a serem aplicadas e aderência ao negócio.

Palavras-chave: geração de energia; renovável; plano de manutenção; turbina eólica; confiabilidade.

Abstract

The Renewable power generation plays a fundamental role today in a face of the global energy transition. This scenario is not different in Brazil. The country has invested efforts to follow this process by generating energy in a more sustainable way. Within this context we have the generation of wind energy, which through the strength of the winds produces clean, sustainable energy at lower costs. For this process to occur assertively and appropriately, a fundamental component is necessary in this equation, which are wind farms, and in turn wind turbines that operate with high availability and reliability. However, this scenario will only be possible through the implementation of an adequate maintenance plan that adheres to the respective wind farms. Therefore, this study aims to provide guidelines for the development of this maintenance plan, considering not only the technical aspects of wind turbines but also nuances such as installation location, resources to be used, types of maintenance to be applied, and adherence to the business.

Keywords: power generation; renewable; maintenance plan; wind turbine; reliability.

LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 1 - Subida e instalação de um conjunto de pás.....	04
FIGURA 2 - Mariz energética brasileira e capacidade eólica	07
FIGURA 3 - Como funciona um aerogerador	11
FIGURA 4 - Principais componentes de um aerogerador.....	13
FIGURA 5 - O tamanho da indústria eólica no Brasil	17
FIGURA 6 - Tela de um Sistema CMMS de Manutenção	25
FIGURA 7 - Descrição dos componentes de uma pá	27
FIGURA 8 - Reparo Externo de pá de um aerogerador	29
FIGURA 9 - Visão Externa de uma Gear Box	30
FIGURA 10 - Substituição de uma Gear Box.....	33
FIGURA 11 - Modelos e Tipos de Rolamento Principal.....	34
FIGURA 12 - Componentes de um rolamento	34
FIGURA 13 - Modelos e Tipos de Rolamento Principal	37
FIGURA 14 - Rolamento Típico da pá.....	39
FIGURA 15 - Sistema Típico de giro da Turbina	42
FIGURA 16 - Gerador conectado a uma caixa de engrenagem	46
FIGURA 17 - Slip Ring de Potência com porta escovas.....	47
FIGURA 18 - Troca Gerador Elétrico em Turbina Eólica	49
FIGURA 19 - Gráfico Manutenção Corretiva Não Planejada.....	54
FIGURA 20 - Gráfico Manutenção Preventiva.....	54
FIGURA 21 - Gráfico Manutenção Preditiva.....	55

LISTAS DE TABELAS

TABELA 01 - Custo Total Manutenção pelo faturamento bruto segmento.....	51
TABELA 02 - Custo Total Manutenção pelo faturamento bruto.....	52
TABELA 03 - Características das formas de atuação de manutenção.....	53
TABELA 04 - Indicadores de manutenção do parque eólico.....	56
TABELA 05 - Falhas Crônicas e Críticas identificadas no parque eólica.....	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	03
1.1 Apresentação do tema.....	03
1.2 Contexto do Problema.....	03
1.3 Problema de Pesquisa.....	05
1.4 Objetivos.....	05
1.4.1 <i>Objetivo Geral</i>	05
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	06
1.5 Justificativa.....	06
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	07
2.1 Princípio da Geração de Energia Eólica.....	09
2.2 Principais Componentes de um Aerogerador.....	11
2.3 O Papel da Manutenção em Parques Eólicos.....	13
3 METODOLOGIA.....	15
3.1 Tipo de Pesquisa.....	15
3.2 Limitação da Pesquisa.....	16
3.3 Forma de coleta de Dados.....	17
3.4 Forma de análise de Dados.....	18
4 GESTÃO DA MANUTENÇÃO.....	18
4.1 Manutenção em Parques Eólicos.....	19
4.2 Plano de Manutenção.....	20
4.3 Tipos de Manutenção.....	22
4.3.1 <i>Manutenção Corretiva</i>	22
4.3.2 <i>Manutenção Preventiva</i>	23
4.3.3 <i>Manutenção Preditiva</i>	23
4.4 Desenvolvendo um Plano de Manutenção.....	24
4.4.1 <i>Visão Geral</i>	24
4.4.2 <i>Planos de Manutenção do Principais Componentes</i>	26
<u>4.4.2.1 Pás.....</u>	<u>26</u>
<u>4.4.2.2 Caixa Multiplicadora.....</u>	<u>30</u>
<u>4.4.2.3 Rolamento Principal.....</u>	<u>33</u>
<u>4.4.2.4 Sistema de Pich.....</u>	<u>37</u>

4.4.2.5 Sistema de Giro.....	41
4.4.2.6 Gerador.....	45
5 ANÁLISE E DISCUSSÕES.....	50
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
7 REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do tema

A área de manutenção tem papel fundamental no contexto da indústria, seja ela indústria de transformação, extrativa, produção de bens de consumo dentre outras. Cada uma destas indústrias possuem suas peculiaridades, e sendo assim, a área de manutenção precisa estar em linha com as necessidades e desafios a serem enfrentados por estas indústrias no sentido de otimizar sua performance, garantindo alto rendimento de suas atividades, com qualidade, segurança e custos alinhados as expectativas do negócio.

Na indústria de geração de energia este contexto não é diferente, seja geração através de termelétricas a gás natural, óleo diesel e até mesmo a carvão, passando por geração a vapor com aproveitamento de gases quentes de outros processos e chegando a geração renovável com turbinas eólicas, usinas hidráulicas e parques solares.

Este trabalho está focado nos parques eólicos, também chamados de fazendas eólicas ou “wind farms” em inglês. Será tratado todo cenário que envolve a produção de energia destas fazendas eólicas e dentro deste contexto, o papel fundamental da área de manutenção e sua gestão estratégica.

O assunto será desenvolvido, explicitando as especificidades da geração eólica, como a área de manutenção se interliga a área de operação e geração de energia, quais são os agentes internos e externos que impactam a gestão de manutenção, os desafios e estratégias implementar as melhores práticas de manutenção, bem diretrizes para implementação de um plano de manutenção assertivo, e quais as decisões a serem tomadas nos casos de manutenções corretivas.

1.2 – Contexto do Problema

Como foi explicitado anteriormente, a manutenção possui papel fundamental na indústria de geração de energia, sendo assim, é primordial que a área de

manutenção tenha um plano estratégico no gerenciamento das respectivas manutenções, sejam elas preventivas, preditivas, manutenções por oportunidade e até mesmo corretivas dentre outras.

O fato é que, em muitas indústrias na área de geração de energia, especialmente aquelas já consolidadas, e com anos de experiência neste cenário, já possuem bases sólidas dentro deste contexto. Porém, quando trata-se da geração de energia renovável através de turbinas eólicas, observa-se um cenário bastante diferente, onde a falta de experiência e conhecimento das tecnologias empregadas nas turbinas, os impactos relacionados ao clima e suas previsões, a falta de mão de obra especializada, o baixo conhecimento do comportamento das turbinas em climas tropicais, a dificuldade na logística de transporte de grandes peças para os parques eólicos, bem como a dificuldade na obtenção destes materiais e ferramentas importadas, tornam o processo de gestão de manutenção, e do desenvolvimento e implementação de um plano estratégico de manutenção bastante desafiador. Na figura 01 abaixo observa-se o complexo processo de subida e instalação de um conjunto de pás de um aerogerador.



Figura 01 – Subida e instalação de um conjunto de pás.
Fonte: BSM Engenharia S.A – Disponível em <https://bsm.com.br/inicio/eolica/>
Acesso em 16 de Março de 2024

Desta forma, o desenvolvimento de um plano de manutenção pouco aderente, que não contemple as diversas nuances no contexto da geração de energia eólica, poderá trazer uma série de retrabalhos e reprogramações de manutenção, atrasos no atendimento do plano, altos custos de manutenção, quebras não programadas, além da não geração de energia por turbinas paradas, o que neste contexto, é a pior das perdas mencionadas. É importante ter em mente que, diferentemente de uma produção de bens de consumo por exemplo, onde em alguns casos é possível recuperar um atraso na linha de produção, a geração de energia eólica não se recupera, pois o vento que passou em um determinado período de tempo onde as turbinas estavam paradas, não se recupera mais, e esta produção perdida de alguma forma impactará o resultado semanal, quinzenal e mensal de produção de uma turbina, um parque ou até mesmo de um cluster completo. Este é um dos grandes motivos pelos quais se faz necessário um plano de manutenção estratégico e assertivo contemplando cada cenário e cada oportunidade.

1.3 - Problema de Pesquisa

Como desenvolver através da gestão de manutenção, um plano estratégico de manutenção para uma turbina, e conseqüentemente para um parque eólico, contemplando os diversos tipos de manutenções a serem aplicadas, bem como os cenários que poderão ocorrer ao longo do ano e quais as estratégias aplicadas quando ocorrem eventuais atrasos no cumprimento dos planos, falta de peças e consumíveis, ferramentas ou até mesmo em manutenções corretivas?

1.4 – Objetivos

1.4.1 – Objetivo Geral

Apresentar quais os cenários e impactos que um plano de manutenção poderá trazer dentro do contexto de geração de energia renovável em parques eólicos, bem como trazer diretrizes para o desenvolvimento de um plano de manutenção adequado.

1.4.2 – Objetivos específicos

- Apresentar diretrizes para o desenvolvimento de um plano de manutenção e suas nuances dentro do contexto dos parques eólicos.

- Explicitar sobre quais aspectos devem ser considerados no momento deste planejamento, sejam eles aspectos técnicos, financeiros, ou de recursos de forma geral

1.5 – Justificativa

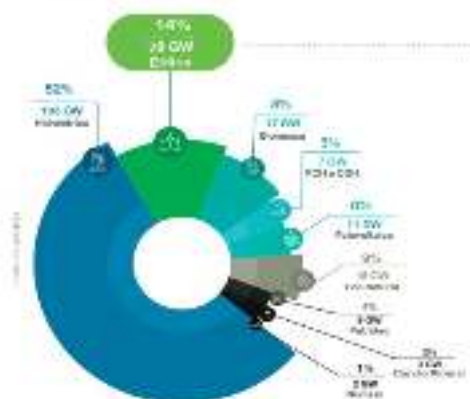
A geração de energia eólica tem se apresentado com grande destaque de forma global. De acordo com Chestney (2023) um recorde de 680 gigawatts (GW) de capacidade de energia deverá ser instalada no mundo até o ano de 2027, sendo que em 2022 a capacidade instalada de energia eólica aumentou 78 GW globalmente em relação a 2021, totalizando um valor de 907 GW.

O Brasil não fica fora destas estatísticas, segundo ABBEólica (2024), o país possui em sua matriz energética um total de 31GW entre capacidade instalada, em operação comercial e teste, com um total de 1039 parques eólicos, 11000 aerogeradores em operação em 12 estados. Espera-se que entre os anos de 2023 a 2027 sejam adicionados 26,5 GW de energia eólica “onshore¹” no país, especialmente na região nordeste onde existe um excelente regime de ventos. Na figura 02 abaixo temos um mapa da matriz energética brasileira bem como a evolução da capacidade instalada em MW da geração eólica.

¹ Termo em inglês referente a parques eólicos instalados em terra.

MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

(em GW)



EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA

(em MW)

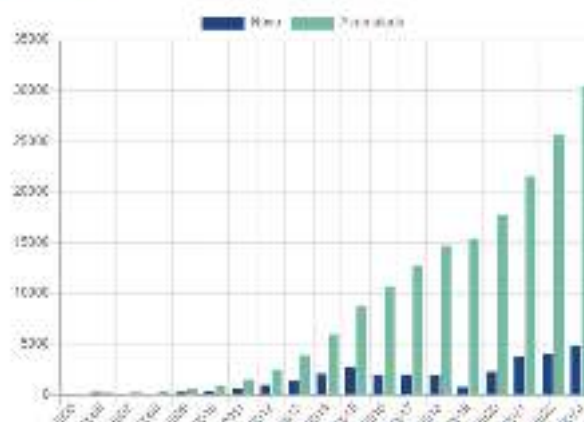


Figura 02 – Matriz energética brasileira e capacidade eólica instalada em MW

Fonte: ABEEólica - <https://abeeolica.org.br/>

Acesso em 11 de Março de 2024

Diante deste cenário global de transição energética, é imprescindível que toda esta potência instalada ao redor do mundo através dos parques eólicos, e principalmente no Brasil que é o foco deste estudo, possa realmente estar disponível e gerando, ou seja, que as turbinas possam operar com boa performance, alta disponibilidade e confiabilidade. O fato é que, nenhum destes cenários serão possíveis caso as respectivas turbinas eólicas que compõem cada parque, não forem submetidas as manutenções adequadas através um plano de manutenção organizado e implementado de forma adequada.

Sendo assim, dentro deste enfoque, e principalmente pelo fato da geração eólica ser uma tecnologia relativamente recente, implementada em larga escala, a proposta que traz justificativa para este projeto, é de esclarecer e dar visibilidade sobre as vantagens e benefícios de um plano estruturado de manutenção, trazendo a tona detalhes de como implementá-lo da melhor forma possível. Da mesma forma, poder esclarecer os cenários de dificuldade em parques eólicos, que eventualmente esta prática não foi implementada de forma correta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A energia elétrica é imprescindível para a vida humana, sendo ela um dos indicadores de desenvolvimento da população mundial. Não é possível usufruirmos

do conforto e comodidade do mundo atual sem termos a energia elétrica a nossa disposição.

Segundo SIBINELLI (2010), a energia pode ser definida como sendo a propriedade de um determinado sistema que lhe permitirá realizar trabalho, sendo que este trabalho poderá ter várias formas: potencial, mecânica, química, eletromagnética, elétrica, calorífica dentre outras.

Ainda segundo Brunoro (2007), a energia elétrica está presente em vários processos e serviços para o atendimento das necessidades humanas, como por exemplo, alimentação, higiene pessoal, lavagem de roupa, limpeza do ambiente, transporte, conforto térmico, lazer, cultura, dentre outros.

Pode-se destacar como os processos mais comuns de geração de energia elétrica, as pilhas e baterias, que geram energia através de um processo químico, a geração hídrica utilizando a passagem do fluxo de água que impulsionam turbinas através de um processo mecânico, a geração eólica que utiliza a força dos ventos, a energia solar que consiste essencialmente na conversão de energia luminosa sobre os materiais semicondutores, convertendo em energia elétrica, bem como a geração através de combustíveis fósseis com a utilização de turbinas a gás ou óleo diesel. Ainda pode-se destacar as turbinas a vapor que operam através do vapor gerado por um caldeira industrial que por sua vez queima alguns tipos de combustíveis, por exemplo, o carvão, bagaço da cana de açúcar, cavaco de madeira dentre outros.

Todos estes processos de geração de energia podem ser divididos em energias renováveis, onde a sua taxa de utilização é menor que a sua taxa de renovação, ou seja, a energia renova-se em uma velocidade maior do que o seu consumo, e as energias não-renováveis, que comumente procedem dos combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural.

Conforme já mencionado acima, podemos citar como energias renováveis, a geração de energia eólica, solar e hidráulica, dentre outras. Da mesma forma, podemos destacar como energia não renovável a geração de energia através de turbinas a gás ou óleo diesel, geração através de turbina a vapor com queima de carvão.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2023), só nos primeiros dias do mês de Julho do ano passado, a produção de energia eólica no país registrou valores inéditos conforme indicam os dados do Operador Nacional do Sistema Elétrica (ONS). Dentre estes índices, está o valor de geração instantânea e média do Sistema Interligado Nacional (SIN), chegando a 19,72GW, o que representa 27,8% da demanda de carga nacional naquele instante. Além disto, a geração média de eólica no SIN também alcançou um patamar inédito no ano de 2023, com valores de 17,11GW, o que representa 24,3% da demanda nacional do SIN. Todos estes valores destacado acima, demonstram a grande importância da geração de energia eólica para o Brasil, além de ficar claro seu potencial de expansão, especialmente na região nordeste. Desta forma, não resta dúvidas de quão relevante é o tema da manutenção dos parques eólicos, e da importância de implementar planos de manutenção adequados e assertivos que contribuam com a gestão destes ativos.

Segundo Tavares (1999), a manutenção é um elemento de extrema importância para o desempenho dos equipamentos. Neste contexto, podemos incluir os mais diversos equipamentos, sejam eles máquinas industriais ou até mesmo residências. Todos eles possuem diretriz a serem seguidas quando o assunto é manutenção.

Para Kardec e Nascif (2003), a manutenção para ser estratégica, precisa estar alinhada com os resultados da organização. É preciso que deixe de ser somente eficiente, e passe a ser eficaz, não só reparando os equipamentos, mas sim mantendo a funcionalidade do mesmo, reduzindo assim as paradas não planejadas.

Ainda sobre manutenção, de acordo com Xenos (1998), as atividades de manutenção devem ter um escopo muito mais abrangente do que simplesmente manter as condições originais dos equipamentos.

2.1 – Princípio da Geração de Energia Eólica

A energia eólica de forma simples, pode ser definida como sendo aquela obtida através da força dos ventos, ou seja, através do que chamamos de aerogerador, a energia cinética das correntes de ar passando pelas pás deste

equipamento, que produzirá um movimento mecânico, que por sua vez produzirá energia elétrica através de um gerador.

Segundo Ackermann (2012), no início da década de 70 com a elevação do preço do petróleo, o interesse pela força dos ventos utilizados para bombear água e moer grãos ressurgiu. Porém desta vez com o foco na geração de energia eólica.

Basicamente o aerogerador funciona da seguinte forma, as pás recebem a força das correntes de ar, ou seja, a força do vento. Estas pás, que nos modelos modernos de aerogeradores são 3 unidades, estão fixadas em um eixo, também chamado de rotor conforme podemos observar na figura 3 abaixo. Este rotor por sua vez está acoplado a uma caixa multiplicadora, também chamada de “Gear Box²” em inglês. Este componente tem uma função essencial neste contexto, pois ele é o responsável por transformar a força do vento girando as pás bem baixa rotação, em um processo de altas rotações do eixo em sua saída, que por sua vez, estará conectado através de um acoplamento ao gerador. O gerador tem a função de converter a energia mecânica (rotações) em energia elétrica, que será enviada ao transformador. Dependendo do modelo e configurações do aerogerador, este transformador poderá estar instalado dentro do próprio aerogerador na área superior chamada de Nacele, ou na base da torre. Porém sua função será de elevar os valores de tensão para etapa de transmissão desta energia.

Vale ressaltar que todos estes componentes, além de outros não mencionados até aqui, como engrenagens, sistemas hidráulicos, freios, placas eletrônicas, painéis elétricos dentre outros, estão interligados, e existe um sistema de controle, juntamente com um software que gerencia todo o aerogerador e suas proteções. Este sistema de controle dos aerogeradores normalmente parametrizados e/ou ajustados de acordo com as condições definidas para o local onde os mesmos deverão ser instalados. Além disto, todos eles podem ser monitorados de forma remota, bem como seus comando de parada e partida serem realizados a distância, em muitos casos em estados diferentes dos quais os mesmos

² Termo em inglês para referenciar a caixa de engrenagens ou caixa multiplicadora do aerogerador.

estão instalados. Na figura 03 abaixo podemos observar a descrição simples dos componentes e o funcionamento de um aerogerador.



Figura 03 – Como funciona um aerogerador

Fonte: Neoenergia - Disponível em: <https://www.neoenergia.com/>
Acesso em 12 de Março de 2024

2.2 – Principais Componentes de um Aerogerador

Abaixo estão destacados as principais partes que compoem um aerogerador. Sendo assim, o plano de manutenção, de certa forma deverá ter foco nestas partes ou subcomponentes e sistemas que fazem parte destes conjuntos.

Segundo Dachery (2020) podemos dividir os aerogeradores em 07 principais componentes, sendo eles:

Torre – Montada e fixada sobre uma fundação de concreto, esta estrutura é composta por uma série de tramos que poderão ser de aço ou concreto em formato cônico que sustentará todo conjunto do aerogerador. Sua altura será de acordo com a potência do aerogerador

Pás – São elas que captam a força do vento e faz com que todo conjunto do rotor possa rotacionar. Normalmente são fabricadas em fibra de vidro ou carbono, possui uma estrutura interna de madeira chamada de “alma da pá”, e suas dimensões, da mesma forma que a torre, serão definidas de acordo com a potência do aerogerador.

Hub – Também conhecido como rotor, é a estrutura que fixa as pás. Sua fabricação normalmente utiliza um aço liga de alta resistência. Além da função de fixação das pás, ele possui um mecanismo hidráulico ou elétrico que posiciona as pás para captar o vento, o que chamamos de movimento de “pitch³” da pá.

Eixo – Elemento responsável por interligar uma série de componentes dentro do aerogerador, desde as pás, passando pela caixa multiplicadora chegando ao gerador. Basicamente ele transfere a energia cinética gerada pelas pás em movimento, ou seja, energia mecânica.

Caixa Multiplicadora – Também conhecida como caixa de engrenagens ou “Gear Box” ela transforma a baixa rotação e alto torque das pás em alta rotação, que por sua vez estará conectado a um gerador.

Gerador – Este componente, conectado a saída da caixa multiplicadora, será o responsável por transformar a energia mecânica em energia elétrica. Seu tamanho e formato dependerá da potência do aerogerador e seu fabricante.

Nacelle – Basicamente este componente é o que abriga todas as partes e peças de um aerogerador, ou seja, é a carcaça do equipamento. Possui uma estrutura interna de metal coberta normalmente de fibra de vidro.

Abaixo na figura 04 temos a descrição geral dos principais componentes que fazem parte de um aerogerador.

³ Termo em inglês utilizado para definir o movimento das pás do aerogerador para captar/atacar o vento.

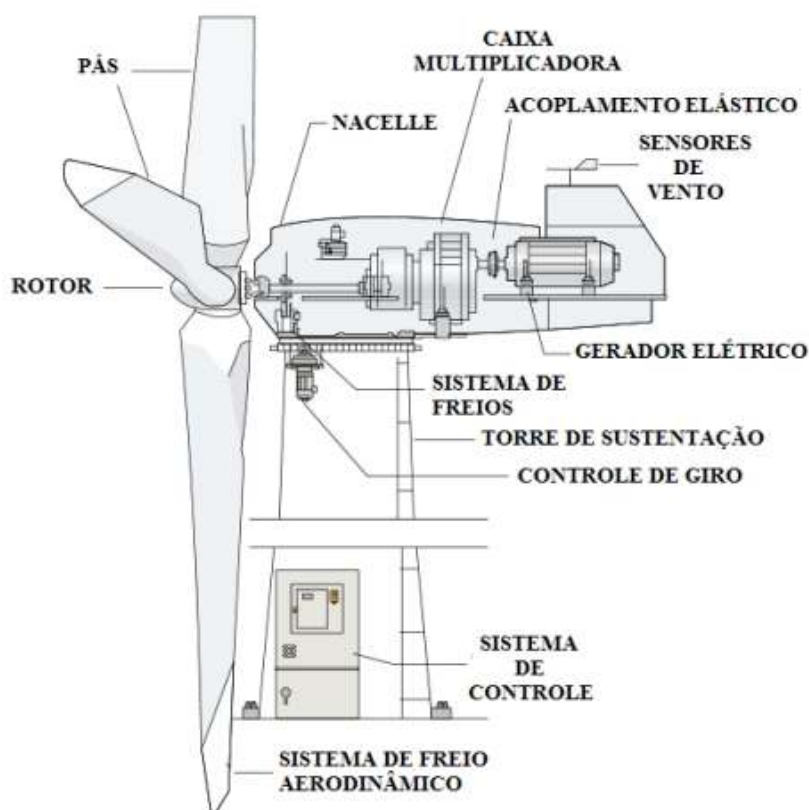


Figura 04 – Principais componentes de um aerogerador
 Fonte: Portal Solar - Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-eolica>
 Acesso em 16 de Março de 2024

2.3 – O Papel da Manutenção em Parques Eólicos

Os tópicos anteriores descreveram sobre a importância da geração eólica no Brasil, bem como crescimento exponencial da geração de energia renovável face a transição energética de forma global. Além disto, deram clareza de forma geral, sobre como a energia eólica é produzida, quais os componentes que fazem parte de um aerogerador e a importância da manutenção neste contexto. Sendo assim, é imprescindível fechar este referencial teórico, trazendo o esclarecimento do papel da Gestão estratégica da manutenção neste cenário da geração eólica.

O papel da manutenção conforme descrito anteriormente é fundamental para o funcionamento adequado de qualquer instalação industrial, incluindo os parques de geração eólica. Porém é fato que, qualquer um destes equipamentos ou instalações terão suas especificidades, sejam elas devido as suas funcionalidades, regime de operações, e até mesmo o local onde estão instalados, pois muitas vezes

equipamentos idênticos precisam ser tratados de forma diferente em termos de manutenção e operação devido ao local de suas instalações.

“Antes de entender como otimizar o processo de manutenção de aerogeradores, é necessário entender quais são as características desses equipamentos e a quais situações/condições climáticas eles são submetidos.” (Windbox, 2024).

Segundo Júnior e Cerullo (2017), a manutenção dos ativos de uma empresa, negócio ou organização juntamente com metodologias para encontrar a causa raiz de uma determinada falha é extremamente necessário para maiores disponibilidades e confiabilidade dos equipamentos

Sendo assim, de forma geral, a gestão estratégica de manutenção, bem como o desenvolvimento de um plano de manutenção adequado deverá levar em consideração uma série de fatores.

O primeiro deles a ser destacado são as recomendações do fabricante, ou seja, quais são as diretrizes do fabricante para determinado tipo de manutenção no equipamento especificado. Dentre estas diretrizes podemos exemplificar, periodicidades das manutenções, tipos de consumíveis a serem utilizados, graxa, óleo, etc, níveis de torque a serem aplicados em determinados parafusos e componentes, tipos de monitoramento dos equipamentos, vibração, temperatura, níveis de óleo, água, etc.

O segundo ponto está relacionado ao local que está instalado e regime de operação. Em determinados cenários, as manutenções precisam ser ajustadas para que se encontre um ponto ótimo de custo de operação e manutenção, atendendo as recomendações dos fabricantes e mantendo a confiabilidade dos equipamentos. Pode-se por exemplo, ter que diminuir os intervalos de manutenções preventivas, ou inserir um tipo diferente de monitoramento, dentre outras ações.

O terceiro ponto relaciona-se a quais tipos de manutenções desejamos aplicar nos equipamentos. Mesmo com as diretrizes dos fabricantes, em determinados cenários faz mais sentido focar em determinadas manutenções em detrimento a outras. Para exemplificar podemos citar uma instalação industrial que faz paradas

regulares a cada 06 meses para revisões, em certas situações como esta, sabendo que de forma histórica através do fabricante, o equipamento opera perfeitamente durante estes periodo, o investimento em um sistema de predição poderá ser amenizado, ou seja, menor investimento em manutenções preditivas. No caso de um sistema que sua parada só ocorre mediante a um início da degração de um determinado componente, como por exemplo, assinatura de vibração em um equipamento rotativo ou aumento da sua temperatura, é de extrema importancia que o mesmo possua um sistema de monitoramento e predição extremamente assertivo. Neste caso, o investimento de manutenção preditiva deverá ser maior.

Por fim, o quarto ponto está muito relacionado a estratégia de custo da manutenção. O melhor dos mundos, especialmente pelos aficionados por manutenção, seria termos todos os recursos financeiros possíveis e disponíveis para mantermos nossas instalações industriais impecáveis. Mas o fato é que, os custos de manutenção precisam ser controlados e gerenciados de forma assertiva. Assim sendo, todos os pontos citados anteriormente precisam ser avaliados levando em consideração os custos que serão incorridos nestes processos.

Para Nunes (2001) os custos de manutenção em termos absolutos podem transformar as áreas e departamentos de manutenção em um segmento estratégico para o sucesso do negócio.

De acordo com Schmidt, Stadler e Rodermeil (2012), o plano estratégico proporciona a possibilidade de analisar o desempenho de uma empresa ou negócio ao longo dos anos. Se existe um plano com projeções futuras, é possível traçar objetivos, analisar o desempenho e verificar o atendimento das metas proposta, ou seja, o plano não é uma atitude estática.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa

A metodologia utilizada nesta pesquisa é do tipo aplicada, onde o objetivo é gerar conhecimento para aplicação prática na solução de problemas específicos, sendo para este cenário, o entendimento de como desenvolver um plano de manutenção adequado voltado para parques eólicos levando em consideração

alguns diretriz para este processo. Desta forma, a ideia é sanar ou minimizar problemas futuros oriundos de processos de manutenções inadequados para um aerogerador ou até mesmo para uma frota de aerogeradores

Primeiramente será necessário uma pesquisa voltada sobre todas as recomendações dos fabricantes no que se refere as manutenções dos aerogeradores instalados nos parques eólicos. Em uma segunda etapa, conforme já comentado em tópicos anteriores, a pesquisa terá seu foco nas condições e locais onde estes equipamentos estão instalados, regime de operação, situações e impactos que estes equipamentos poderão sofrer devido ao ambiente onde estão operando. Como uma terceira etapa, a pesquisa trará os tipos de manutenções a serem aplicadas nestes aerogeradores, ou seja, manutenção corretiva, preventiva, preditiva, manutenção por oportunidade dentre outras, principalmente contextualizado para o cenário dos parques eólicos e suas instalações.

Vale ressaltar que este estudo será focado primeiramente na importância de se implementar um plano adequado de manutenção através da Gestão estratégica de manutenção, avaliando todos os cenários, recomendações e possibilidades dentro deste contexto.

3.2 Limitação da pesquisa

Primeiramente vale ressaltar que as informações a serem levantadas neste estudo relacionam-se a parques eólicos instalados no Brasil, tanto na região nordeste onde se concentram a maior parte destes equipamentos como no sul do país. Além disto, conforme figura 05 abaixo hoje temos mais de 11.000 aerogeradores instalados nestas regiões, dos mais diversos modelos, tamanhos, potência e fabricantes. Atualmente são mais de 06 grandes fabricantes atuando no país, por este motivo, esta pesquisa será limitada aos equipamentos de fabricação da GE – General Electric, que é uma das maiores fabricantes mundiais neste cenário. Além disto, trataremos apenas dois modelos fabricados pela GE, chamados de plataforma 1X e 2X que serão explicitadas ao longo deste estudo.

Por fim, ressalta-se que serão considerados apenas informações relacionadas ao plano de manutenção dos últimos 02 anos de manutenção dos aerogeradores,

especialmente para os sistemas ou componentes considerados vitais para o funcionamento do aerogerador, sendo eles: Pás, Rolamento Principal, Caixa Multiplicadora (Gear Box), Sistema de Pitch, Sistema de Giro (Yaw System) e Gerador. Em outras palavras, para que fique claro, este será o universo destas pesquisa.



Figura 05 – O tamanho da indústria eólica no Brasil

Fonte: ABEEólica - <https://abeeolica.org.br/>

Acesso em 16 de Março de 2024

3.3 Formas de coleta de dados

A coleta de informações e dados para esta pesquisa ocorrerá através de documentações técnicas dos aerogeradores disponíveis no mercado, desde que não sejam informações proprietárias, livros, artigos técnicos, monografias, dissertações e pesquisa publicadas sobre o assunto, bem como de anotações técnicas do autor deste trabalho, e observações em campo das atividades de manutenções realizadas pelas equipes de manutenção com seus respectivos resultados.

Segundo Silva e Menezes (2001) a coleta de dados é a pesquisa de campo propriamente dita onde para se obter êxito neste processo é necessário paciência e persistência.

Alguns pontos deverão ser considerados para coleta de informações e dados neste estudo. Primeiramente conforme comentado no item 3.1 – Limitação da pesquisa, pois deverão ser considerados os principais e vitais sistemas e equipamentos para o funcionamento do aerogerador na visão do fabricante. Além disto, peças e equipamentos considerados de alto custo em um cenário de quebra e necessidade de substituição. Por fim, peças e equipamentos considerados críticos para segurança do equipamento e pessoas que atuam e acompanham estes equipamentos.

3.4 Forma de análise de dados

A análise das informações e dados coletados conforme explanado no item 3.3 acima se dará levando em consideração a aderência das recomendações e diretrizes dos fabricantes para os componentes e partes em questão. Tanto para as informações disponíveis no mercado através de artigos técnicos, documentações e pesquisas, quanto em relação as anotações e observações do autor deste trabalho. Ou seja, no caso de manutenções, recomendações ou até mesmo atividades que porventura não sejam cobertas pelas diretrizes do fabricante deverão ser explicitadas de forma clara, tanto as atividades executadas como possíveis resultados, sejam eles positivos ou não.

4 – GESTÃO DA MANUTENÇÃO

O conceito de gestão de manutenção é bastante amplo em seu contexto, e tentar defini-lo de forma simplista ou resumida poderia levar-nos a definições que, de certa forma não atenderiam todos os seus aspectos e cenários neles envolvidos, ou poderia levar a entendimentos distorcidos. Porém, de forma geral, é possível dizer que, a gestão de manutenção é um conjunto de métodos e ferramentas que visam assegurar a eficácia e eficiência das atividades, processos e atividades de manutenção com a finalidade de garantir a correta operação dos equipamentos, sistemas e máquinas com o intuito de contribuir no processo de otimização da produção e/ou fabricação de uma empresa, industria ou negócio.

Para Almeida (2017), a gestão de manutenção é a correta administração da manutenção através da organização dos recursos, sejam eles pessoas, materiais e

insumos aliado ao planejamento estratégico para que máquinas, equipamentos ou instalações de qualquer empresa estejam em boas condições de funcionamento e supram as necessidades existentes.

A Gestão de manutenção é uma função empresarial e gerencial, da qual se espera o controle constante da organização, assim como o conjunto de serviços de reparo e revisões necessárias para garantir o funcionamento regular e o bom estado de conservação das instalações produtivas, serviços e instrumentação dos estabelecimentos (OCDE apud FILHO, 2000).

Segundo Souza (2008), a gestão de manutenção é um conjunto de tarefas que tem como propósito assegurar continuidade na sua gestão, mantendo a eficiência de suas tarefas e serviços tanto em nível tecnológico como administrativo, via adequação contínua de sua estratégia, de sua capacitação e de sua estrutura.

4.1 Manutenção em Parques Eólicos

O conceito no que se refere ao gerenciamento de manutenções em parques eólicos, de forma geral, não difere dos demais sistemas de manutenção das mais diversas instalações industriais, ou seja, as premissas serão similares. Exemplificando o exposto acima, pode-se dizer que a otimização da produção do negócio é uma premissa fundamental, e por este motivo o planejamento das manutenções devem ser otimizado dentro desta perspectiva. Além disto, a qualidade das manutenções executadas é fator primordial para operação contínua dos equipamentos após o período de manutenção. Ainda dentro deste contexto observa-se que os tipos de manutenções a serem aplicadas nas turbinas eólicas passam pelos conceitos tradicionais de manutenção, ou seja, manutenções preventivas, preditivas e corretivas. Por fim, as diretrizes dos fabricantes devem ser estudadas, observadas e aplicadas, pois são eles quem possuem conhecimento dos projetos dos equipamentos e instalações, e conhecem seu comportamento ao longo do seu ciclo de vida.

Apesar destes conceitos similares a outras instalações industriais, o fato é que, como qualquer instalação industrial, os parques eólicos possuem suas especificidades, e com elas seus requerimentos para que uma manutenção ou um

plano de manutenção possa ser aplicado de forma assertiva. As ferramentas de uso geral utilizadas em uma siderurgia por exemplo, até podem ser as mesmas de um complexo eólico, mas com certeza existem ferramentas específicas para os dois casos. E o mesmo acontece com os procedimentos de manutenção e até os equipamentos de proteção individual a serem utilizados.

Para exemplificar um pouco este contexto, podemos trazer o tema das manutenções preventivas que serão tratadas com mais detalhes em outro tópico. Basicamente existem dois ciclos de manutenções preventivas em um parque eólico. O primeiro ciclo, seria o ciclo chamado de manutenção preventivas semestral, com atividades mais “rápidas e simples”, e um ciclo, chamado de manutenção preventiva anual com atividades mais complexas e que tem maior duração. Dentro deste contexto, existem períodos durante o ano onde se observar um ciclo de ventos mais baixos, e em outro período com ciclos de ventos mais altos. Sendo assim, a primeira premissa a ser avaliada dentro deste cenário é, planejar as manutenções mais complexas em períodos de ventos mais baixos otimizando a produção dos parques eólicos. Assim sendo, este é um exemplo de cenário específico para manutenção de turbinas eólicas.

Segundo Almeida (2014), manutenção é o conjunto de cuidados e procedimentos técnicos necessários ao bom funcionamento e também reparo de máquinas, equipamentos, peças, moldes e ferramentas. Ainda segundo ele, manutenção preventiva é a manutenção planejada e controlada, realizada em datas predeterminadas, de modo a manter o bom funcionamento dos equipamentos, evitando paradas imprevistas.

4.2 Plano de Manutenção

Após a explanação no item 4.1 relacionada a manutenção em parques eólicos, iniciamos a visão de um planejamento de manutenção ou plano de manutenção dentro deste contexto.

Primeiramente é primordial esclarecer que o Plano de Manutenção nada mais e do que a combinação dos tipo de manutenções disponíveis, ou seja, manutenções preventivas, preditivas e corretivas, sendo que estas combinações passam por análises do comportamento do equipamento, taxas de falha, recomendações dos fabricantes, intervalos de manutenção, experiência dos mantenedores e operadores

ao longo dos anos, histórico dos equipamentos e toda avaliação financeira dentro destes aspectos. Existem por exemplo, equipamentos que operam até o seu completo desgaste e quebra, pois será mais fácil e barato sua substituição do que mantê-lo sendo reparado. Vale salientar que são casos bastante específicos. Em outras situações, a parada do equipamento por uma falha trará grandes perdas monetárias pela falta de produção, impactos de segurança ou até mesmo impactos ambientais envolvidos. Desta forma, faz todo sentido monitorar as condições dos equipamentos de forma preditiva, bem como aplicar as manutenções preventivas dentro dos prazos estabelecidos. Podemos citar como exemplo uma turbina a gás ou vapor com potências acima de 150MW, onde sua parada traria grandes perdas de produção de energia.

A otimização da política de manutenção requer uma combinação balanceada entre manutenções preventivas, preditivas e corretivas. Sendo que a determinação do tipo de manutenção e do intervalo entre manutenções de cada item depende do comportamento de sua taxa de falhas e do custo de cada falha (FARRERO, TARRÉS, LOSILLA apud MENDES E RIBEIRO, 2014).

Quando iniciamos esta perspectiva voltada para os parques eólicos, precisamos primeiramente entender que, diferentemente de um equipamento em uma linha de produção que ao parar e gerar a perda na produção, em alguns casos é possível restabelece-lo e em um regime diferenciado de operação, e assim poder recuperar a produção perdida, no caso da geração eólica, o tempo parado da turbina é uma perda que não se recupera mais, a não ser por um período de ventos acima do previsto, ao ponto de compensar a uma determinada geração estabelecida para um mês, por exemplo.

Além disto, outra perspectiva a ser levada em consideração são os fatores climáticos que interferem diretamente nas manutenções. Primeiramente existem os períodos de alto e baixo ventos conforme citado anteriormente. Sendo assim, as manutenções preventivas mais complexas precisam ser planejada em períodos de ventos mais baixos, por outro lado as manutenções mais simples e rápidas em períodos de ventos mais altos. Outro ponto importante a ser considerado são os períodos de chuva. As manutenções externas, como os reparos externos de pás não podem ser programados em períodos de chuvas intensas, devido ao que chamamos de cura do reparo da pá não ser possível, tão pouco em períodos de altos ventos, pois os acessos as pás para os reparos se dão através de rapel por cordas, e isso

traria insegurança para os mantenedores das pás. Além disto, é importante salientar também que os períodos de chuva trazem consigo os raios que são um risco aos mantenedores, por este motivo muitas vezes as manutenções são paralizadas devido estes alertas de raios.

Ainda sobre os aspectos dos parques eólicos, é importante ter mente que a extensão destes parques são muito grandes, muitas vezes se percorre mais de 01 hora dentro de um complexo eólico para se deslocar de uma turbina a outra, ou da base onde os técnicos estão até uma determinada turbina eólica. Assim sendo, o planejamento sobre o que se levar em um determinado tipo de manutenção é essencial de forma a se evitar perdas em idas e vindas dos técnicos dentro dos parques.

Por fim, é essencial ter a perspectiva e entendimento de que as turbinas estão instaladas em locais abertos, expostos a chuva, sol, intemperes, e em sua grande maioria, em áreas onde existe um arraste muito de poeira para dentro de suas instalações. Além disto, existem aquelas turbinas instaladas em regiões próximas ao mar, com altos índices de salinidade, umidade e arraste de areia, o que torna o cenário ainda mais complexo por questões de corrosão, oxidação e depósito de material. É fato que estas turbinas foram projetadas para suportar estas condições, porém uma manutenção adequada e assertiva é essencial, e isso se dará através de um plano de manutenção adequado.

4.3 Tipos e definições de manutenção

Antes de se iniciar efetivamente o detalhamento do plano de manutenção para uma turbina eólica e respectivamente para um parque eólico é importante esclarecer os tipos de manutenções já trazidos neste trabalho, além de esclarecer sobre suas respectivas definições

4.3.1 Manutenção Corretiva

A Manutenção corretiva pode ser definida como sendo, o procedimento ou atividade de manutenção executada com o intuito de restabelecer o mais breve possível e com segurança o funcionamento de um determinado equipamento,

máquina ou instalação industrial que teve sua operação ou funcionamento paralizado por uma determinada falha.

4.3.2 Manutenção Preventiva

Pode-se definir a manutenção preventiva, como sendo uma manutenção planejada em datas predeterminadas para ocorrerem, sendo que, estas datas poderão ser determinadas por tempo de operação (horas/dias), por ciclos de produção, ou seja, quantidade de produtos produzidos, ou simplesmente por intervalos regulares de tempo independentemente se o equipamento operou ou não, por exemplo, manutenções a cada 06 meses. Vale ressaltar que comumente estas diretrizes de quando e como realizar estas manutenções são dadas pelo fabricante do equipamento, e eventualmente melhoradas de acordo com a experiência do time dos mantenedores e históricos dos equipamentos ao longo dos anos.

4.3.3 Manutenção Preditiva

A ideia da manutenção preditiva e seu conceito conforme o próprio nome diz é, prever alguma situação, ou seja, antecipar a um evento que possa ocorrer, a predição da falha. Isso ocorre através do monitoramento do equipamento ou máquina, o que os mantenedores chamam habitualmente de “ouvir o equipamento”. Este processo se dá através de equipamentos e sensores instalados nos próprios equipamentos, máquinas ou sistemas, ou com a utilização de ferramentas especiais de monitoramento e medição. Como exemplos destes equipamentos podemos citar medições de vibração, temperatura, ruídos, além da análise de fluídos lubrificantes, que também serão utilizados para dar subsídio as análises a serem realizadas.

De forma geral são estas as 03 grandes categorias de manutenções utilizadas nos parques eólicos ou em qualquer instalação industrial. Existe outras categorias que poderiam ser citadas, mas que na realidade estão inseridas de alguma forma neste contexto dos 03 tipos citados. Um exemplo interessante são as manutenções por oportunidade, onde se utiliza uma determinada parada do equipamento por qualquer motivo, por exemplo, uma parada por solicitação da operação ou produção por um período determinado, e assim se inclui uma manutenção dentro deste

contexto aproveitando a oportunidade observada para corrigir um problema. Mas isso nada mais é do que uma manutenção corretiva. Outro exemplo, é a lubrificação, que muitas vezes é considerada uma tipo de manutenção, porém que na realidade está inserida no processo de manutenção preventiva.

4.4 Desenvolvendo um Plano de Manutenção

4.4.1 Visão Geral

Inicialmente é importante ter a visão de que um plano de manutenção poderá ser desenvolvido dentro de uma ferramenta específica para isso, ou seja, um software de gerenciamento de manutenção, normalmente chamado no mercado de CMMS - Computerized Maintenance Management System, que em português significa “Sistema de Gestão de Manutenção Computadorizado⁴”, e que hoje em dia é oferecido no mercado por diversas empresas, nas mais diversas características, opções e também custos. Mas também este mesmo plano poderá ser desenvolvido em planilhas em excel ou smartsheets dentre outras ferramentas. Existem diferenças em se optar por uma ferramenta específica de gerenciamento ou a utilização de planilhas por exemplo, especialmente quando temos instalações industriais grandes com muitas informações sobre os mais diversos tipos de manutenção, controles e principalmente histórico dos equipamentos. É bem provável que, em algum momento parte destas informações se percam quando se opta por utilizar um controle em planilhas em Excel.

Além disto, os sistemas CMMS são projetados para fornecerem informações gráficas sobre os atendimentos dos equipamentos, principais ocorrências, descrição de falhas, nestes softwares é possível cadastrar os equipamentos instalados com suas respectivas informações técnicas, em muito deles informações sobre procedimentos de manutenção, ferramentas a serem utilizadas e peças também são alocadas nos respectivos equipamentos. Conforme suas opções de automação, ao se solicitar a execução de uma determinada manutenção, este sistema CMMS interligado ao almoxarifado solicita a alocação de peças e consumíveis a serem

⁴ Software que ajuda a gerenciar as atividades de manutenção em uma empresa. Ele é usado para planejar, programar e rastrear as atividades de manutenção, bem como para gerenciar os recursos necessários para realizar as atividades.

utilizados, o que facilita muito o trabalho do mantenedor. Outro ponto interessante é que as chamadas “Ordens de Serviço” são enviadas diretamente ao celular, Palm ou Tablet dos mantenedores, sem a necessidade de utilização de via física (Papel). Estes softwares eles podem ser configurados e preparados para o gerenciamento de uma determinada instalação ou parque industrial, em alguns casos são desenvolvidos especificamente para uma determinada aplicação. Na figura 06 abaixo vemos a tela de um sistema CMMS.

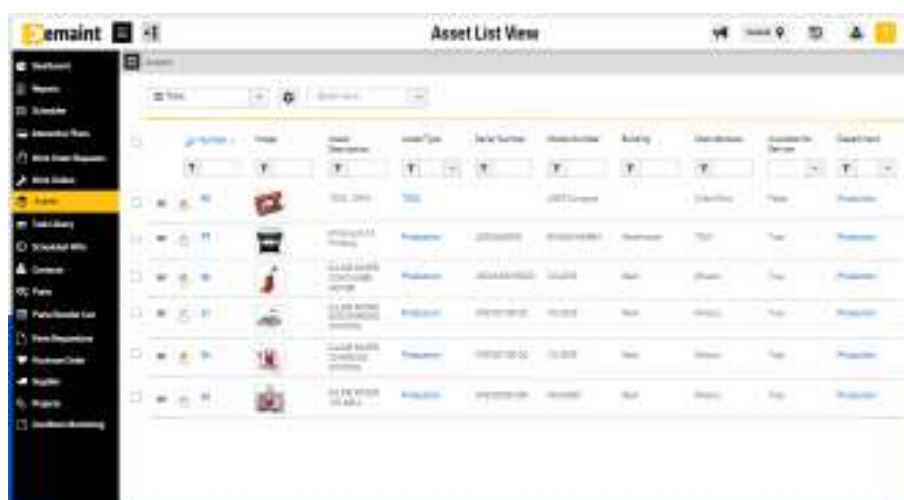


Figura 06 – Tela de um Sistema CMMS de Manutenção

Fonte: Emaint - <https://www.emaint.com>

Acesso em 27 de Março de 2024

Por fim, é importante esclarecer, que o plano de manutenção não é simplesmente a execução de atividades de manutenções em uma determinada instalação industrial, como por exemplo, um parque eólico. Ele faz parte de uma função estratégica da empresa ou do negócio, onde uma série de áreas e departamentos estarão interligados. Desdobramentos, processos de ferramentas, dentre outros deverão ser desenvolvidos a partir deste planejamento, como por exemplo o planejamento de custos, planejamento de peças em estoque, contratação de mão de obra em determinados períodos, processos de análises de falha e causa raiz para problemas recorrentes ou de grande impacto, e outras ações.

Em outras palavras, não se implementa um plano de manutenção adequado de forma isolada em um negócio, mais sim com o envolvimento de todas as áreas que porventura terão terão impactos nas decisões tomadas a partir deste processo de implementação.

4.4.2 Planos de Manutenção do Principais Componentes

A partir deste ponto serão descritas todos os tipos de manutenções que poderão ser aplicados em cada um dos grandes componentes dos aerogeradores, ou seja, manutenções preventivas, corretivas e preditivas, além disto serão explanadas sobre as periodicidade a ser aplicada para cada uma delas (se aplicável), fatores que podem impactar suas realizações dentro dos prazos estabelecidos, motivos pelos quais um determinado tipo de manutenção não se aplica a um destes principais componentes e por fim, desencadeamento de outras atividades advindas destas manutenções.

Vale ressaltar que estas são diretriz que auxiliarão e darão suporte no desenvolvimento de um plano de manutenção conciso, adequado e assertivo, porém variações destas diretrizes ocorrerão de acordo com cada um dos fabricantes, modelo de turbina eólica, local de instalação e regime de operação.

4.4.2.1 – Pás (Blades)

As pás são consideradas uma das peças mais críticas da turbinas por sofrerem grandes tensões durante a operação do aerogerador, além de ser fundamental para o funcionamento, pois são elas que captam a força do ventos e fazem com que todo o conjunto rotativo possa se mover. De forma geral, elas são formadas e divididas em 04 grandes e principais componentes, sendo eles: as cascas (Shells em inglês), é o que se observa externamente na pá , e são divididas em, a parte casca pressão e a parte casca sucção. Como segundo componente temos longarinas (Spar caps em inglês), são estes que recebem e suportam grande parte da carga aerodinâmica durante a operação do aerogerador transmitindo estes esforços a raiz, podemos dizer que é o núcleo da pá. O terceiro componente são o que chamamos de almas (Shear Web em inglês), sua função basicamente é de ligar as longarinas do lado pressão com o lado sucção, garantindo a rigidez da pá como um só componente. Sua função é estrutural mantendo a geometria da pá. Por fim, temos a raiz (Root em inglês), é o componente que sofre os maiores esforços e sua função é a transmissão da flexão da pá para o rolamento onde a mesma é fixada através de grandes parafusos. Todos estes componentes formados por vibra de

vidro, resina epóxi e um tipo de polímero endurecido com catalizador, que são colados entre si e formam um estrutura resistente. A figura 07 abaixo descreve os principais componentes de uma pá de um aerogerador.

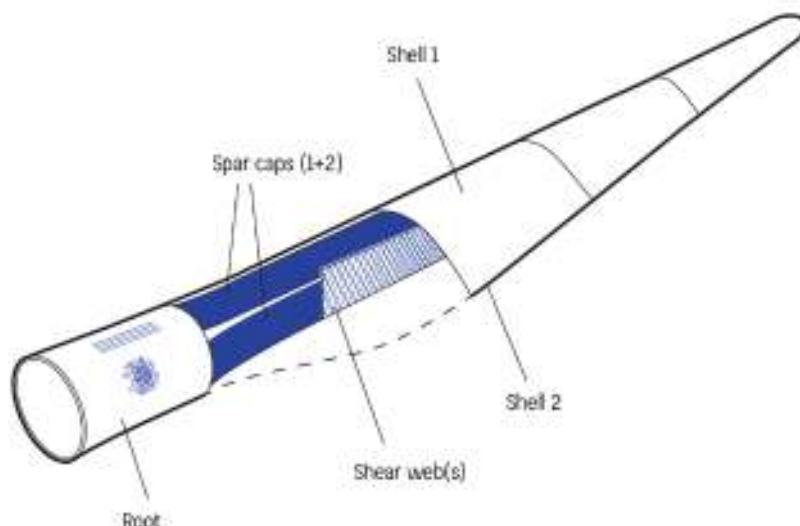


Figura 07 – Descrição dos componentes de uma pá
Fonte: LinkedIn - <https://www.linkedin.com>
Acesso em 27 de Março de 2024

Assim, o primeiro processo a ser considerado são as manutenções preventivas. Nestas manutenções devem-se considerar todos estes aspectos construtivos, e ele começa através do planejamento de inspeções externas e internas destas pás na busca por danos que podem ser superficiais até danos estruturais que podem levar a necessidade de substituição da pá. Estes danos devem ser categorizados de acordo com a criticidade dos mesmos, dimensão, profundidade e região da pá onde o dano ocorreu. Estas categorias normalmente possuem, dependendo do fabricante, 05 níveis (CAT1, 2, 3, 4, 5), sendo que em alguns deles os reparos poderão ser planejados para serem executados em datas futuras e a turbina continuará em operação, e em outros casos a parada da turbinas e reparo deverá ser imediato, como nas categorias 4 e 5 que são danos mais severos. A forma de executar esta inspeções vem se aprimorado a cada ano. Inicialmente as inspeções eram realizadas com a parada da turbina e uma série de fotografias que eram tiradas de toda extensão das pás com máquinas fotográficas de alta resolução para avaliações posteriores. Hoje em dia os drones realizam este trabalho tirando fotos e filmando as pás muito próximo das mesmas, o que permite análises no mesmo instante da inspeção ou avaliações posteriores mais detalhadas, além dos processo de parada e retorno da turbina serem muito mais rápidos. Quanto

a periodicidade das inspeções podem variar de acordo com os fabricantes, mas normalmente ocorrem duas vezes ao ano, a não ser em casos em que um determinado dano está sendo monitorado e deverá ter uma periodicidade específica. Para as inspeções internas, elas ocorrem de forma similar quanto a categorização de defeitos (CAT1,2,3,4,5), porém as inspeções são realizadas entrando internamente nas pás, através de uma janela de inspeção, ou utilizado um tipo de robô que caminha internamente pela pá filmando e retirando fotos. Sobre a periodicidade, o normal é que se realize uma inspeção ao ano, especialmente porque o processo de parada do aerogerador e entrada na pá é mais complexo e demorado.

No que se refere a manutenções preditivas para pás, este tipo de manutenção ainda é bastante prematuro no contexto de monitoramento preditivo de pás. Basicamente temos hoje sensores que são instalados dentro das pás que medem a deflexão das mesmas e enviam sinais de alarmes quando estas deflexões ultrapassam um limite pré-estabelecido. Porém os custos de instalação destes sensores ainda são muito elevados, o que torna inviável financeiramente a venda das pás com este tipo de equipamento instalado de fábrica. Estes sensores ainda são mais utilizados em ambientes de testes na fábrica. Como alternativa mais comum no dia a dia em campo são os algoritmos desenvolvidos que monitoram o comportamento das pás através dos esforços e balanceamento que são “sentidos” pelos rolamentos também chamados de “pitch bearing” onde estas pás são fixadas pela sua raiz. O fato é que, estes algoritmos não são tão assertivos quanto os sensores, e muitas vezes não são capazes de captar danos pequenos ou médios, mas apenas danos maiores a ponto de evitar o colapso da pá, ou seja, a quebra da mesma evitando danos maiores no aerogerador.

Quanto as manutenções corretivas, que são os reparos de pás, não descreveremos o processo destes reparos, mesmo porque envolvem uma série de atividades e processos que requerem pessoas especializadas no assunto. Porém, de forma sucinta, descreveremos aqui as 04 etapas que envolvem estas atividades. A primeira relacionada a manutenção preventivas que são as inspeções categorizando o nível de criticidade conforme já explanado, logo após inicia-se efetivamente o processo de reparo como segunda etapa, onde no local do dano a pá será “descascada”, ou seja, será aberto este dano em suas camadas até o ponto onde se observa o que se precisa ser reparado. Neste caso também haverá

diferentes categorias, desde reparos chamados superficiais ou “cosméticos” até reparos que podem chegar próximo a “alma” da pá. Ao se realizar esta abertura, um especialista em reparo de pás definirá o tipo de reparo, isto significa, quais os materiais a serem utilizados, tempo de cura do reparo, se será necessário algum tipo de reforço, etc. Como etapa final, um procedimento é desenvolvido para aquele reparo e as atividades deste reparo acontecem, normalmente com as pás instaladas na turbina, o que chamados de “uptower repair”. Em alguns casos, os reparos são tão grandes e complexos que as pás precisam ser retiradas e levadas ao solo para que possam ser reparadas. Vale salientar também que os reparos poderão ser programados dentro do sistema de gerenciamento da manutenção de acordo com sua criticidade, ou seja, dependendo da extensão e criticidade do dano não faz sentido parar a turbina naquele instante, e sim aguardar uma nova oportunidade.

Na figura 08 temos o exemplo de um reparo externo sendo realizado após a detecção do problema durante uma inspeção preventiva.



Figura 08 – Reparo Externo de pá de um aerogerador
Fonte: GBTECWIND – Inspeção e reparo de pás eólicas
Acesso em 27 de Março de 2024

Com estas premissas, o plano de manutenção poderá ser desenvolvido e inserido em um sistema CMMS ou em alguma outra forma de controle, e o resultados das inspeções também precisarão ser descritos no histórico da pá. Eventualmente, no caso do planejamento de um reparo advindo das inspeções

preventivas, este deverá ser planejado através uma ordem de serviço corretiva a ser aberta no sistema de controle de manutenção.

4.4.2.2 – Caixa Multiplicadora (Gear Box)

Neste tópico descreveremos sobre as manutenções aplicadas na caixa multiplicadora do aerogerador, também conhecida como “Gear Box”. Basicamente este componente é responsável por aumentar as rotações oriundas do rotor que está conectado as pás, onde normalmente se tem rotações em torno de 10 a 15 rpm (rotações por minuto), e multiplica-las a rotações em torno de 1600 rpm, que seria a rotação necessária e exigida pelo gerador para produção de energia elétrica

Esta caixa basicamente possui uma série de engrenagens com vários estágios e planetários que combinados proporcionam este aumento de rotação. Sendo que, estas engrenagem são lubrificadas com um tipo de óleo lubrificante específico para este propósito. Na figura 08 abaixo observa-se uma gear box instalada em um aerogerador.



Figura 09 – Visão Externa de uma Gear Box

Fonte: WINDPOWER BRASIL
Acesso em 28 de Março de 2024

Diante da explanação acima iniciamos a composição do nosso plano de manutenção para caixa multiplicadora no contexto das manutenções preventivas. Dentro deste cenário, alguns pontos essenciais devem ser observados e cobertos por esta manutenção. O primeiro deles relacionado a inspeção do nível de óleo desta caixa, bem como sua reposição se necessário. O segundo ponto a ser inserido, refere-se aos filtros que fazem parte deste componente, os mesmos precisam ser inspecionados e substituídos durante as inspeções. Da mesma forma o que chamamos de respiro dissecante com sílica gel, utilizada para evitar entrada de umidade na caixa deverá ser substituída porque a mesma possui um ponto de saturação devido a altas umidades. Logo após estes dois itens, é necessário realizar uma inspeção de todas as vedações da caixa multiplicadora, com intuito de observar possíveis vazamentos, e neste caso substituir estas vedações danificadas. Além disto, as mangueiras que transportam o óleo da caixa multiplicadora e suas conexões também precisam ser inspecionadas, especialmente por questões de ressecamento e quebra por se tratarem de mangueiras de um tipo especial de borracha. Por fim, sistema de resfriamento da caixa multiplicadora deverá ser inspecionado e limpo, em especial seu radiador, garantindo assim sua eficiência até o próximo ciclo de manutenções. No que tange a periodicidade desta manutenção preventiva e suas atividades, as mesmas devem ocorrer duas vezes ao ano, ou seja, a cada semestre. Todas as atividades estão incluídas nos dois ciclos de manutenção preventiva, a não ser a limpeza do radiador do sistema de resfriamento da Gear Box que normalmente deverá ser limpo apenas 01 vez a cada ano. Para parques eólicos muito próximos ao mar, devido a salinidade, estas limpezas ocorrem a cada semestre.

Quanto a manutenções preditivas, por se tratar de um componente suscetível a grandes esforços e formado por uma série de engrenagens e planetários, esta caixa multiplicadora é monitorada através de sensores de vibração, que geram um comportamento de operação desta caixa, ou seja, alarmes e assinaturas de vibrações são geradas a partir da operação deste componente, e estes valores de vibração são enviados e armazenados no sistema de controle do aerogerador para análises e tomadas de decisões. Além disto, monitoramento de temperaturas de operação e níveis de óleo também são enviados ao controlador dos aerogeradores, e assim todo seu comportamento poderá ser monitorado e avaliado. Vale salientar que alguns destes sensores estão instalados no que chamamos de linha de

segurança do aerogerador, ou seja, em caso de operação fora dos limites estabelecidos de vibração e temperatura o sistema de controle irá parar imediatamente o equipamento, o que é chamado de “trip do aerogerador”

Como ponto final, no sentido de compor este plano de preditivas, análises de óleo são retiradas semanalmente ou anualmente para verificação das condições físico-químicas deste óleo, garantindo que realmente seu papel de lubrificação da caixa está ocorrendo de acordo com o esperado. Desta forma todo o cenário de preditivas da caixa multiplicada estará contemplado, e um histórico do seu comportamento garantido ao longo dos anos de operação.

Por fim trataremos das manutenções corretivas que também poderão ocorrer apesar de todo contexto descrito sobre os outros tipos de manutenção.

De forma geral, pequenas manutenções corretivas poderão ocorrer na caixa multiplicadora, como por exemplo, a troca de uma mangueira ou vedação que não foi contemplada durante as manutenções preventivas. Eventualmente ocorrem também falhas de sensores de temperatura, vibração, nível, dentre outros. E assim os mesmo deverão ser substituídos de acordo com a necessidade. Alguns deles causam a parada do aerogerador, e assim a manutenção corretiva deverá ser imediata, enquanto outros apenas alarmes e desta forma as manutenções poderão ser programadas.

Existem porém duas outras grandes manutenções corretivas nestas caixas multiplicadoras. A primeira delas está relacionada a uma falha de um determinado rolamento ou engrenagem, que provavelmente foi detectado durante o monitoramento de vibração ou até mesmo temperatura, e neste caso estes componentes poderão ser substituídos ou todo o estágio da caixa multiplicadora onde estes componentes estão instalados. Este tipo de manutenção, apesar de ser relativamente grande e envolver a abertura da caixa, ainda assim é possível realizá-lo sem a remoção da caixa multiplicadora. Porém, pode acontecer também a falha total da caixa multiplicadora, e neste caso haverá a necessidade de substituição da mesma envolvendo a desmontagem parcial da Nacele (teto), desacoplamento da caixa multiplicadora do rotor, esgotamento de todo óleo da caixa para evitar possíveis derramamentos causando um problema ambiental, retirada da caixa através de um guindaste, içamento de uma nova caixa e instalação da mesma. Além dos custos elevados de uma nova caixa, custos de guindastes e recursos para substituição, é importante salientar que este tipo de manutenção poderá ser

impactada pelas intempéries climáticas, como chuva, altos ventos, etc. Procedimentos específicos de substituição da caixa multiplicadora são utilizados desde o processo de içamento pelo guindaste. Por este motivo, se faz tão importante evitar a substituição completa da caixa multiplicadora. A figura 10 abaixo mostra o processo de substituição de uma caixa multiplicadora.



Figura 10 – Substituição de uma Gear Box
Fonte: MAX SERVICES – Disponível em <https://maxservices.com.au/>
Acesso em 29 de Março de 2024

4.4.2.3 – Rolamento Principal (Main Bearing)

O rolamento principal do aerogerador, que em inglês tem o nome de “Main Bearing”, é responsável por garantir toda rotação contínua do conjunto rotor em torno do seu próprio eixo, por este motivo eles estão sujeitos a altas cargas por um longo período de tempo. Dependendo do modelo da turbina eólica, alguns tipos de rolamentos poderão ser utilizados, como por exemplo, rolamentos de rolo de três fileiras, rolamentos de rolo de duas fileiras ou rolamentos de rolos cônicos de uma fileira. Na figura 11 abaixo é demonstrado cada um dos modelos citados.



Figura 11 – Modelos e Tipos de Rolamento Principal
 Fonte: LIEBHERR NO BRASIL – Disponível em <https://www.liebherr.com>
 Acesso em 29 de Março de 2024

De acordo com Figueiredo (2021), os rolamentos são peças que suportam e guiam conjuntos ou elementos rotativos de um determinado equipamento, como eixos ou rodas, e transferem as cargas entre componentes que compõe estes equipamentos e máquinas. Os rolamentos reduzem o atrito, e desta forma permitem velocidades elevadas com menores ruídos e temperaturas, bem como menor consumo de energia. Na figura 12 abaixo é possível observar as várias partes que compoem um rolamento.

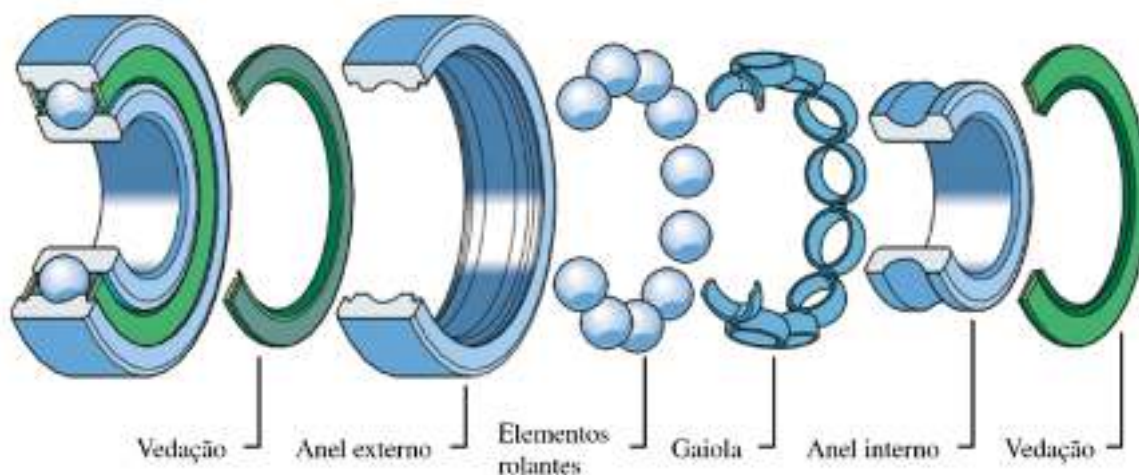


Figura 12 – Componentes de um rolamento
 Fonte: Otimização da manutenção e extensão de vida de rolamentos principais de aerogeradores de acoplamento direto, Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – FEUP Faculdade de Engenharia, 2021
 Acesso em 29 de Março de 2024

Diante das explicações apresentadas iniciamos a composição do plano de manutenção do rolamento principal do aerogerador.

Inicialmente sobre a perspectiva das manutenções preventivas, por se tratar de um grande rolamento que suporta grandes esforços, é primordial garantir sua lubrificação adequada. Diferentemente da Gear Box lubrificada com óleo, este componente utiliza graxa em seu processo de lubrificação. Estes lubrificantes normalmente possuem características especiais que garantem a correta lubrificação do rolamento por longos intervalos de tempo, condições de altos esforços do rolamento para operações com temperaturas mais elevadas. São lubrificantes sintéticos, e normalmente a recomendação do tipo de lubrificante que deverá ser utilizado vem do fabricante do aerogerador. Além disto, é de extrema importância se atentar para a periodicidade das lubrificações, onde o mais comum é que se ocorra a cada 06 meses. A quantidade a ser aplicada em cada lubrificação também é essencial e será direcionada pelas recomendações dos fabricantes. Esta quantidade depende muito do tamanho do rolamento. Diferentemente do que se imagina, a aplicação excessiva de graxa também poderá acarretar em um primeiro instante um sobre aquecimento do rolamento, além do desperdício de graxa, pois o rolamento irá expulsar o excesso da graxa, além da sujeira gerada no aerogerador. Todo este processo é realizado de forma manual através de bombas de graxa especiais que injetam a graxa em pontos específicos de lubrificação do rolamento.

Em aerogeradores com potências maiores, ou seja, acima de 4,5MW normalmente se opta pela instalação de um sistema automático de lubrificação, pois os períodos de lubrificação precisam ser menores, bem como a quantidade total aplicada acaba sendo maior dentro deste contexto. Para estes casos, é necessário também realizar inspeções preventivas no equipamento completando o nível de graxa do tanque do sistema, confirmando o correto funcionamento da bomba de injeção de graxa, bem como sensores que detectam possíveis falhas, como por exemplo, sensor de nível de graxa. Estas inspeções também possuem uma periodicidade semestral.

Partindo para as atividades do plano de manutenção em um contexto de preditivas, temos dois grandes aspectos a serem observados. O primeiro deles relacionado ao monitoramento de vibração e temperatura do rolamento, que da mesma forma como ocorrem em uma Gear Box, sensores são instalados com o intuito de gerar um comportamento deste rolamento. Em outras palavras, trata-se de

gerar uma assinatura de vibração e monitoramento de temperaturas. Desta forma é possível acompanhar os desgastes do componente, possíveis falhas prematuras, e todo seu histórico ao longo dos anos de operação. Estes sensores são ligados diretamente ao sistema de supervisão e controle do aerogerador e em alguns casos são parametrizados para que, ao alcançarem determinados limites possa parar a turbina imediatamente ou gerar alarmes que deverão ser analisados. É muito importante salientar que, todos estes dados devem ser avaliados por especialistas no assunto, pois são eles que normalmente possuem o conhecimento para interpretar os gráficos e tendências geradas pelo sistema de controle da turbina. O segundo item do plano de manutenção preditiva são as análises destas graxas. A coleta e análise por laboratórios especializados trarão informações importantes que em conjunto com o comportamento do rolamento principal poderão dar subsídios para tomadas de decisões sobre a operação do aerogerador. Um exemplo prático destas decisões baseada neste conjunto de dados são os processos de purga completa da graxa de um rolamento, também chamado de “flushing” e aplicação de uma nova graxa, bem como a execução de uma “inspeção boroscópica⁵” do rolamento. Basicamente, ao se detectar variações na vibração de um rolamento, bem como aumento de temperatura, aliado a sua análise de graxa, toma-se a decisão de realizar uma inspeção boroscópica para se observar início de desgastes no rolamento, e a necessidade de inserção de uma nova quantidade de graxa evitando assim desgastes prematuros.

Por fim, temos as manutenções corretivas, sendo estas manutenções limitadas a possíveis trocas de sensores que monitoram os rolamentos, ou a substituição completa deste rolamento principal. Isso significa dizer que serão envolvidos muitos recursos na atividade, além dos altos custos. A substituição do rolamento por um equipamento novo, além da utilização de guindastes, desmontagem da Nacele (teto) e todos os recursos advindos desta atividade, sem mencionar o tempo de parada do aerogerador, que neste caso dependerá da disponibilidade da nova peça, guindaste, pessoas e as condições climáticas no período de troca, este processo de substituição também precisa ser muito bem

⁵ Chamada também de videoscopia ou endoscopia industrial, a boroscopia é uma técnica de inspeção visual de máquinas e equipamento para visualização de locais inacessíveis com auxílio de um equipamento ótico.

planejado no contexto de segurança, pois trata-se de atividades com grandes riscos se não conduzida de forma adequada pelos times de campo.

Desta forma, fica claro a importância da realização de manutenções preventivas e preditivas adequadas e assertivas. Na figura 13 abaixo pode-se observar os grandes rolamentos de um aerogerador com destaque em amarelo para o rolamento principal.



Figura 13 – Modelos e Tipos de Rolamento Principal
Fonte: LIEBHERR NO BRASIL – Disponível em <https://www.liebherr.com>
Acesso em 29 de Março de 2024

4.4.2.4 – Sistema de Pitch

Descrevemos neste tópico o plano de manutenção relacionado ao sistema de pitch do aerogerador. Este sistema é responsável por rotacionar a pá em seu próximo eixo, fazendo com que o ângulo da pá em relação ao vento incidente seja maior ou menor, o que chamamos de ângulo de ataque da pá. Desta forma, a pá receberá uma maior ou menor força do vento e conseqüentemente a velocidade (rotação da Turbina) relativa a essa força, o que permitirá a produção de energia.

Os principais componentes deste sistema são os rolamentos da pá, em inglês chamado de Pitch Bearing ou Blade Bearing, onde as pás são fixadas através de sua raiz, um conjunto de motores, normalmente 01 motor por pá conectado através

de uma cremalheira que será responsável pelo movimento da pá, e um sistema de alimentação de emergência normalmente composto de um conjunto de baterias conversores e inversores que irão garantir a movimentação das pás em uma situação de falta de energia no aerogerador. Este tipo de sistema de alimentação de emergência será de extrema importância, pois evitará que as pás fiquem em uma posição de ataque ao vento durante uma falta de energia, o que poderia acarretar em uma sobre velocidade do aerogerador e um possível colapso das blades ou de toda estrutura. Todo este conjunto está interligado ao sistema de controle do aerogerador que gerenciará o ângulo das pás, rotação do rotor, sincronismo do aerogerador e geração de energia.

As primeiras atividades a serem descritas referem-se ao plano de manutenção preventiva relacionadas aos rolamentos da pá. Dá mesma forma que o rolamento principal, estes rolamentos suportam grandes esforços e devem ser lubrificados com uma graxa sintética específica para este propósito. Existem também nestes rolamentos pontos específicos de lubrificação, bem como as quantidades adequadas de acordo com as recomendações dos fabricantes. Estas quantidades também variam conforme o tamanho da turbina e conseqüentemente o tamanho do rolamento. Quanto a periodicidade, o mais comum são lubrificações semestrais, por este motivo é tão importante seguir as recomendações do lubrificante a ser utilizado.

Segundo Sales (2019) os lubrificantes industriais exercem um papel fundamental no trabalho de proteger a integridade e aumentar a vida útil dos equipamentos e máquinas.

Além das atividades de lubrificação é importante que conste neste plano uma inspeção dos selos de borracha que protegem externamente este rolamento, pois parte dele fica exposto as intempéries climáticas por estarem conectados as pás, e eventualmente estas borrachas podem ressecar ou até mesmo deslocarem fazendo com que poeira e umidade penetrem no rolamento. Por fim, não se tem como prática de mercado a coleta e análise de graxa destes rolamentos, a não ser em casos especiais onde se observe indícios de contaminação da graxa. Uma configuração de rolamento da pá é mostrada na Figura 14. O rolamento consiste em dois anéis formando as pistas externa e interna e um complemento de esferas ou rolos. Os anéis interno e externo possuem furos de montagem que permitem que o rolamento seja aparafusado diretamente às estruturas de suporte.

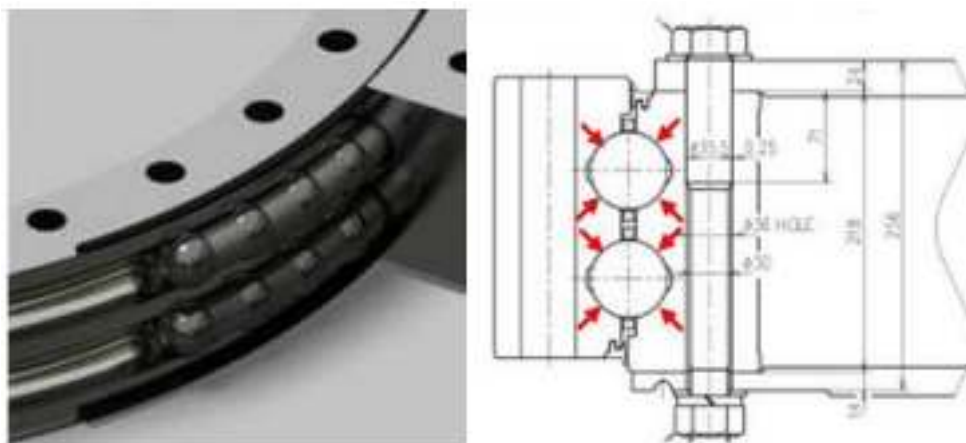


Figura 14 – Rolamento Típico da pá
 Fonte: NREL – Rating of Pitch Bearing for 1.5 MW - Wind Turbine
 Disponível em <https://www.nrel.gov>
 Acesso em 30 de Março de 2024

Ainda dentro do contexto dos rolamentos das pás, porém tratando sob aspectos preditivos, existe um sistema que monitora a corrente dos motores que movimentam estas pás. Este sistema através da variação de corrente destes motores e os aspectos de movimentação destas pás, ou seja, travamentos, movimentos bruscos traçará possíveis problemas relacionados aos rolamentos gerando alarmes de atenção e até mesmo a parada do aerogerador. Em algumas destas situações, eventualmente pode-se solicitar uma análise de graxa ou até mesmo a purga do rolamento e inserção de uma nova graxa. Sendo assim é importante que estas ações também sejam contempladas no plano de manutenção.

Quanto aos motores dos rolamentos das pás, durante as manutenções preventivas, deve ser realizado a limpeza dos mesmo, reaperto de suas conexões, e uma medição do nível de isolamento do motor através de um equipamento chamado Megôhmetro também conhecido como Megger. No caso de falha destes motores, a substituição completa do mesmo deverá ocorrer, o que seria a manutenção corretiva.

Em relação a manutenção corretiva do rolamento das pás, o que normalmente se realiza é a substituição das borrachas de vedação, que eventualmente podem ressecar, ou a completa substituição do rolamento da pá, que neste caso também será um processo complexo envolvendo guindaste, pois primeiramente a pá deverá ser retirada para posteriormente a remoção do rolamento, e o processo inverso na montagem, instala-se o rolamento e posteriormente a sua pá.

Partindo para o restante dos equipamentos que compõe o sistema de pitch temos o sistema de baterias, conversores e inversores. Para estes equipamentos, em relação a manutenções preventivas, por se tratar de conexões elétricas, é de extrema importância a verificações de suas conexões por completo. Pelo movimento do aerogerador, alguns destes equipamentos sofrem vibrações, o que poderiam causar um afrouxamento destas conexões. Especialmente para os polos das baterias é importante salientar que elas possuem um torque específico em suas conexões, sendo que, este valor de torque sempre é dado pelo fabricante, sendo necessário empregar o valor correto durante as verificações. A limpeza dos polos da bateria também fazem parte deste plano de preventivas e devem ser aplicadas sempre que necessário através de uma inspeção visual. Além disto, o nível de tensão das baterias deverá ser medido durante as preventivas certificando que as mesmas estão em bom estado. Historicamente, de forma geral, estas baterias possuem uma vida útil de 03 anos, e logo após este período começarão a falhar. Vale salientar também que, por se tratar de um sistema de segurança do aerogerador, durante as manutenções preventivas é necessário que se faça um teste de operação destes inversores e conversores, juntamente com o banco de baterias. Este teste normalmente já está programado no software da turbina e poderá ser iniciado sempre que necessário. Por fim, vale salientar que, apesar de estarmos tratando de um sistema elétrico, a termografica, que é um tipo de manutenção preditiva, não é aplicada neste equipamento, pois não se pode acompanhar as temperaturas deste sistema com a turbina em operação, devido não ser permitido a permanência de um mantenedor na turbina durante sua operação normal.

Partindo para o processo de preditivas, existem dois aspectos importantes, o primeiro deles relacionado a um algoritmo que monitora a vida util das baterias através dos níveis de tensão e corrente. Este monitoramento é contínuo e poderá ser acompanhando através do sistema de controle do aerogerador, além disto, ele também gera alarmes de alerta quando existe alguma indicação de possíveis problemas, mesmo que ainda não tenha ocorrido a falha completa, ou seja, uma forma de predição. O segundo aspecto está relacionado ao teste de operacionalidade do aerogerador. O mesmo teste que deve ser realizado na preventiva, é executado automaticamente pela turbina através de um contador de tempo. Ao chegar no limite da contagem de tempo, o sistema de controle executará

este teste observando o comportamento do sistema e gerando informações para os operadores e mantenedores.

Em relação as manutenções corretivas, basicamente tem-se a substituição de placas eletrônicas que controlam os inversores e conversores, bem como a substituição das baterias ou do banco completo de baterias, tanto nos processos onde elas falham e o aerogerador para sua operação, como também através do sistema preditivo que monitora a vida útil das baterias. Vale salientar que, a partir do momento em que uma das baterias que compõem um banco falha, existe uma grande probabilidade de que o restante das baterias também irão falhar em poucos dias ou semanas. Sendo assim, utiliza-se como boa prática de manutenção, a substituição completa do banco de baterias, evitando a parada consecutiva do aerogerador. Assim, finaliza-se as diretrizes de manutenções para o sistema de Pitch do aerogerador.

4.4.2.5 – Sistema de Giro

Neste tópico descreveremos as manutenções relacionadas ao sistema de giro da turbina eólica, também chamado de sistema de orientação da turbina, conhecido em inglês como sistema de Yaw. Este sistema é responsável pelo giro de toda turbina em todas as direções, em 360 graus, posicionando-a na direção do fluxo do vento, e assim otimizando a captura desta energia dos ventos de forma mais adequada possível.

Segundo Gontijo (2016), o sistema de yaw é basicamente utilizado para otimizar a absorção da energia dos ventos através do posicionamento da turbina na direção do fluxo de vento.

O sistema de giro ou orientação da turbina, de forma geral é composto por: Coroa do Yaw, Rolamento de giro ou sistema de pastilhas deslizantes, Freio hidráulico ou eletromecânico, motoredutores, sistema de inversores dependendo do modelo da turbina e sistema de lubrificação automática quando aplicável. A coroa do yaw que basicamente é uma grande circunferência com engrenagens em sua parte eterna, instalada no topo da torre da turbinas, e sobre ela posicionada todo conjunto da nacelle, que irá rotacionar de acordo com a orientação do vento através dos comandos do sistema de controle da turbina. Para que a nacelle possa rotacionar existem dois sistemas diferentes que serão aplicados de acordo com o modelo das

turbinas. O primeiro deles é um grande rolamento instalado na parte interna da coroa do Yaw, normalmente com esferas, que proporcionam este movimento de forma suave. E o segundo tipo são de pastilhas (também chamadas de patins deslizantes) que são instaladas sobre a pista do Yaw onde a nacela é posicionada, e proporciona este movimento. A rotação da nacela ocorre através de 04 motoredutores (o número deste motoredutores dependerá do tamanho da turbina eólica) que estão engrenados através de um pinhão com a coroa do yaw, e quando acionados iniciarão o momento da nacela. Além disto, em alguns modelos de turbina existem um sistema de freio hidráulico acoplado na pista do yaw, que funciona interligado com a operação dos motoredutores, ou seja, quando eles estão parados os freios estão travados. A partir do início da operação dos motores, os freios desacoplam, permitindo o movimento da nacela. Em outros modelos de turbina o sistema de freios é através do próprio motoredutor, porém eles possuem um sistema de fricção passiva (freio passivo) que mantém um certo atrito na pista da coroa do Yaw, de forma a não deixar a nacela totalmente “solta” no momento da rotação. A figura 15 mostra um exemplo do sistema de Yaw de uma turbina.

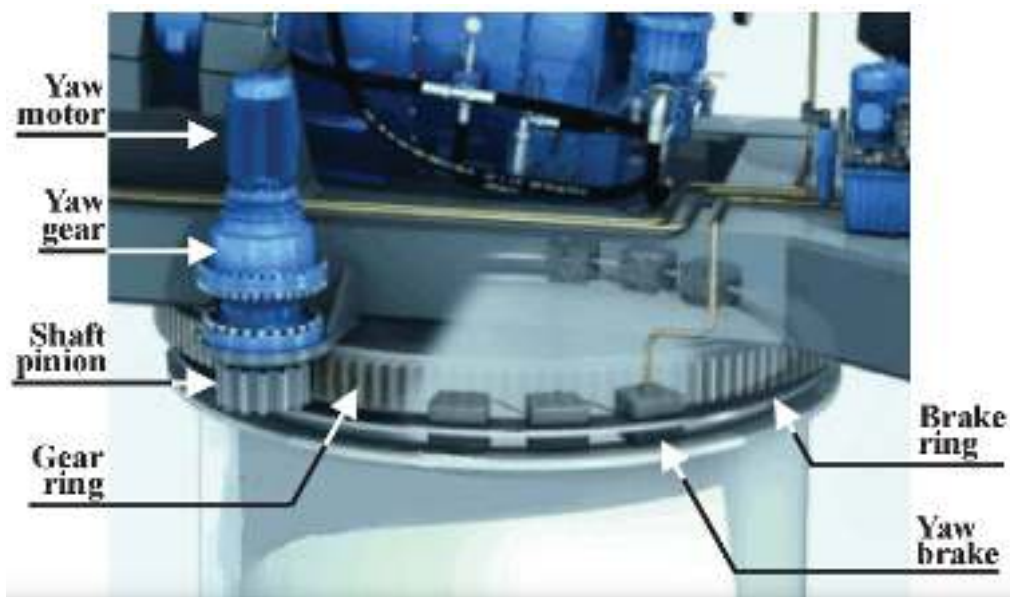


Figura 15 – Sistema Típico de giro da Turbina

Fonte: Semantic Scholar – Disponível em <https://www.semanticscholar.org>
Acesso em 09 de Abril de 2024

Com a visão clara do funcionamento do sistema de Yaw, iniciamos as diretrizes do plano de manutenção, começando pelas preventivas. Vale ressaltar que abordaremos as diferenças indicadas nos sistemas de modelos de turbinas diferentes.

Inicialmente temos a lubrificação das engrenagens do Yaw, bem como a lubrificação das engrenagens (pinhão) dos motoredutores. Esta lubrificação deverá ocorrer de forma semestral, utilizando a graxa indicada pelo fabricante do equipamento. Por serem engrenagens que ficam expostas, é necessário uma limpeza e remoção de impurezas antes da aplicação da nova graxa. Além disto, uma inspeção visual das engrenagens na busca de desgastes deverá ser realizada. Possíveis desgastes prematuros nas engrenagens podem ser indício de problemas na lubrificação. Ainda dentro da lubrificação, no caso do sistema com rolamento para rotação da nascele, é necessário também que estes rolamentos sejam lubrificados através de pontos de lubrificação específicos neste rolamento. Normalmente são em torno de 8 pontos de lubrificação. Para o sistema de pastilhas deslizantes, cada um delas possui pontos de lubrificação individuais garantindo uma lubrificação homogênea no sistema. O tipo de graxa e quantidade será determinado de acordo com cada modelo de turbina através do fabricante. Em turbinas com maior potência, acima de 4,5MW, o sistema de lubrificação é automático, sendo assim a preventiva deverá garantir seu perfeito funcionamento, ou seja, reabastecimento do tanque de graxa, verificação da operacionalidade da bomba de graxa, sensores de baixo nível de graxa, e principalmente limpeza do sistema, garantindo que nenhum bico de lubrificação esteja obstruído.

No caso de sistema com patins deslizantes combinado com sistema de freio hidráulico através de pinças, duas verificações importantes deverão ser realizadas durante a preventiva. A primeira delas relacionada aos patins deslizantes, sendo uma inspeção visual, e se necessário uma medição da espessura destas pastilhas (patins deslizantes) para garantir que não houve desgaste anormal destas peças que promovem a rotação da nascele. Em casos onde ocorre um desgaste anormal, por uma falha de lubrificação por exemplo, a nascele poderá ficar travada sobre a pista da Coroa de Yaw. A segunda verificação está relacionada ao desgaste das pastilhas de freio, e sua substituição preventiva se necessário, garantindo a operação normal deste sistema. Inspeções visuais quanto a vazamentos no sistema hidráulico também deverão ser realizadas.

Para sistema de Yaw que utilizam rolamento, conforme já mencionado acima, realiza-se a lubrificação, porém é importante garantir que o sistema de fricção instalado na pista da coroa do yaw esteja operando adequadamente. Este sistema opera como sendo um freio passivo durante a rotação da Nacele. Para isso é necessário certificar-se de que estes dispositivos chamados em inglês de Yaw Pucks estejam com seus respectivos torques adequadamente aplicados. Este tipo de manutenção preventiva é realizada com uma ferramenta chamada torquímetro que basicamente aplica e limita o aperto a ser dado em um determinado componente.

No caso destas atividades mencionadas acima, tanto para o sistema com patins deslizantes quanto para sistema com rolamento, a periodicidade indicada é a cada 06 meses, da mesma forma como na lubrificação a ser aplicada. Isso garante que a turbina será parada somente 01 vez a cada semestre, e todo sistema de Yaw será contemplado.

Por fim, compondo estas atividades preventivas, o sistema de inversores para partidas mais suaves precisam também ser inspecionados visualmente, e no caso dos modelos com acesso as conexões elétricas, uma checagem e reaperto destas conexões deverá ser realizada.

No cenário das manutenções preditivas não existe a prática de coleta e análise de graxa, devido se tratar de engrenagens expostas, tão pouco algum tipo de inspeção termográfica nos inversores, ou monitoramento de vibração do sistema de Yaw por operar em baixas rotações. Porém, em alguns aerogeradores existe algoritmos que podem detectar anormalidades na operação dos motoredutores através do monitoramento de corrente destes motores. Este seria um dos poucos itens monitorados de forma preditiva.

Para as manutenções corretivas, o que normalmente se executa são as trocas dos patins deslizantes em caso de desgaste anormal, o que não é muito comum. Já no caso das pastilhas do freio hidráulico que desgastam com a operação normal do sistema, e os anéis de vedação no sistema hidráulico que podem gerar vazamento devido seu desgastes, estes componentes sim possuem um processo de manutenção corretiva mais usual. Para as turbinas que possuem o sistema de freio passivo, ocorre também a substituição dos Yaw Pucks, que com o tempo se desgastam e precisam ser substituídos. Por fim, quebra de engrenagens dos motoredutores, queima dos motores ou falhas dos inversores também podem ocorrer com certa frequência, especialmente em regiões onde a direção do vento se

alterna constantemente, fazendo com que a turbina esteja em constante operação do sistema de Yaw em busca da direção do vento.

Assim conclui-se o processo de plano de manutenção do sistema de Yaw da turbina, que é fundamental para sua operação, e um dos sistemas que mais apresentam falhas estatisticamente.

4.4.2.6 – Gerador Elétrico

O gerador elétrico em uma turbina eólica é um dos elementos chave nesta estrutura, e possui papel fundamental na geração de energia. Instalado logo após a caixa de engrenagens (Gear Box), e conectado em um eixo através de um robusto acoplamento saindo da mesma, ele basicamente transforma energia mecânica em energia elétrica que deverá ser direcionada a um transformador através de cabos de potência. Apesar de haverem outros tipos de conexões, esta seria a mais comum a ser utilizada.

O Gerador eólico, basicamente, é um sistema destinado a converter energia cinética do fluxo de ar (vento), em energia elétrica. (ACKERMANN, 2005; BURTON ET AL., 2001 apud CAMPOS; FERRARI, 2021)

Existem diversos tipos de geradores que poderão ser utilizados neste contexto, geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos, geradores de comutador de corrente alternada, dentre outros. Cada um destes modelos possuem suas características, suas possíveis aplicações, vantagens e desvantagens. Além disto, seu tamanho e potência será de acordo com o tamanho e potência da turbina onde o mesmo será instalado. A ideia não é explorar o tipo de operação de cada um deles, tão pouco suas diversas aplicações técnicas. Por esta razão, as definições do plano de manutenção a seguir seguem baseando-se em geradores tipo Assíncrono – DFIG, ou seja para rotações variáveis, com potências entre 2.6MW a 2.9MW de acordo com o modelo da turbina, pois estes são os modelos mais utilizados hoje em dias nas grandes turbinas. Abaixo observa-se a figura 16 de um gerador de baixa potência conectado a uma Gear Box.



Figura 16 – Gerador conectado a uma caixa de engrenagem (Gear Box)

Fonte: Cresesb – Disponível em <https://cresesb.cepel.br>

Acesso em 10 de Abril de 2024

Descrevendo o plano de manutenção do gerador elétrico, inicia-se explanando sobre as manutenções preventivas. Basicamente temos duas manutenções semestrais que são cruciais para perfeita operação do gerador. Os mesmos itens são verificados durante estas manutenções, não havendo diferença entre elas, a não ser em caso de se observar algum desgaste ou dano durante estas mesmas. O primeiro item verificado são as escovas de potência do gerador elétrico. Estas escovas possuem um desgaste normal durante a operação e precisam ser substituídas sempre que alcançam o tamanho mínimo determinado pelo fabricante. Como boa prática de manutenção, avalia-se a probabilidade da escova operar mais 06 meses sem troca, se isso não for possível, a mesma deverá ser substituída, mesmo não chegando ao seu limite mínimo em termos de tamanho. É comum que as diversas escovas instaladas desgastem de forma desigual uma das outras, por este motivo que todas devem ser avaliadas individualmente. As molas que pressionam as escovas nas pistas do slip de potência onde estão instaladas, também precisam ser verificadas visualmente. Quando se observa algum desgaste nestas molas, ou falta de pressão, é recomendada a sua substituição ou a utilização de um dinamômetro para verificação da intensidade da força da mola, garantindo assim sua integridade. Outra ação a ser realizada, é a limpeza do slip de potência e porta escovas que, devido ao desgaste normal de operação destas escovas de grafite, terá em sua estrutura uma grande quantidade de pó impregnado. Com isso, uma limpeza adequada com um sistema de aspiração de pó e aplicação de um

solvente dielétrico indicado pelo fabricante se faz necessário. Existem ainda as escovas de aterramento, que apesar de apresentarem um desgaste menor precisam ser inspecionadas e substituídas se necessário. Na figura 17 temos um slip de potência de uso geral.



Figura 17 – Slip Ring de Potência com porta escovas
Fonte: Made in China – Disponível em <https://www.made-in-china.com>
Acesso em 12 de Abril de 2024

O segundo ponto a ser observado são os filtros dos geradores. Normalmente estes filtros são instalados nos sistemas de entrada de ar dos geradores garantindo a filtragem de impurezas e umidade que poderiam entrar dentro do mesmo. Estes filtros com a operação sujam e ficam saturados, o que poderia causar um menor fluxo de ar entrando no gerador e possíveis aquecimentos. Sendo assim, sua substituição de forma adequada e dentro dos prazos estabelecidos, neste caso a cada 06 meses, garante a correta operação do gerador. Ainda tratando a questão do sistema de refrigeração do gerador em alguns modelos, existe uma troca de calor entre o ar que entra no gerador e um sistema de refrigeração através de serpentina e um radiador. Este sistema é abastecido com água e glicol (produto químico) que melhora a performance de refrigeração do sistema, e assim a troca de calor entre este sistema de resfriamento e o ar deverá ser adequada, garantido a operação do gerador em temperaturas adequadas. Para que este processo de troca de calor

ocorrá, é necessário a inspeção do nível de água/glicol no sistema, checagens de possíveis vazamentos, verificação da operacionalidade da bomba de circulação de água e indicação dos sensores de temperatura. Importante salientar que existem geradores onde somente a troca passiva de ar é o suficiente para resfria-lo, ou seja, o equipamento não possui sistema de trocador de calor com água.

Ainda explanando sobre as manutenções preventivas temos a atividade de verificação do alinhamento do gerador, e possíveis ajustes se assim se fizer necessário. Normalmente esta atividade é realizada utilizando um alinhador a laser que garantia uma excelente precisão na atividade, bem como rapidez nas atividades.

Seguindo para o plano de manutenção, descreveremos os tópicos relacionados a manutenção preditiva. Existem dois pontos principais que devem constar neste plano de preditivas. O primeiro deles refere-se ao monitoramento de vibração do gerador. Por se tratar de um grande componente rotativo e fundamental para operação do aerogerador, este equipamento possui uma série de sensores de vibração, normalmente acelerômetros, que em conjunto podem gerar o chamamos de assinatura de vibração do gerador, ou seja, seu comportamento durante a operação. Estes sensores são parametrizados com determinados limites que geram no sistema de controle alarmes e parada do aerogerador em casos mais críticos. Além disto, gráficos de tendências de vibração podem ser gerados dentro deste processo através do sistema de controle da turbina eólica. É preciso que profissionais especializados possam acompanhar todo este processo através da análises destes gráficos e comportamentos. Assim, evita-se situações mais críticas como a troca completa do gerador. Além do monitoramento de vibração, este gerador também é monitorado através de sensores de temperatura que por sua vez possuem seus limites de operação parametrizados, e evitam que o equipamento opere com sobre temperatura ou fora dos limites estabelecidos. Normalmente estes sensores de temperatura estão instalados no estator do gerador, monitorando a temperatura dos enrolamentos, e nos mancais (rolamentos) do gerador. Da mesma forma, estes sensores geram gráficos de tendência que precisam ser analisados por especialistas, e assim possíveis situações mais críticas serão evitadas.

Seguindo sobre o plano de manutenções corretivas, basicamente temos as trocas dos rolamentos do gerador, que eventualmente poderão apresentar desgastes, que provavelmente serão observados através do monitoramento de

vibração e temperatura, e assim deverão ser substituídos. Além disto, alguns destes sensores que monitoram o gerador, também apresentam falhas, apesar de não ser muito comum, e precisam ser substituídos. Reparos no sistema de resfriamento do gerador, como por exemplo, pequenos vazamentos podem ocorrer, e alguns vedações deverão ser substituídas. Por fim, existem algumas falhas internas no gerador, como por exemplo, o rompimento do anel de junção do estador que, apesar de ser um problema mais complexo, podem ser reparos através de empresas especializadas ao invés da substituição completa do equipamento.

Por fim, poderá eventualmente ocorrer a falha completa do gerador, e assim este componente deverá ser substituído. Por se tratar de um grande componente, será necessária a utilização de guindastes para içamento, desmontagem de parte da Nacele, equipes especializadas para esta troca, sem levar em consideração aspectos externos como chuva, e vento que poderão impactar no tempo de troca do gerador. Por este motivo que, sua substituição deve ser evitada através das manutenções e monitoramentos adequados. Na figura 18 abaixo observa-se a troca de um gerador em uma turbina eólica.



Figura 18 – Troca de um Gerador Elétrico em turbina eólica
Fonte: Marxservices – Disponível em <https://maxservices.com>
Acesso em 14 de Abril de 2024

Assim conclui-se todo processo de diretrizes para desenvolvimento de um plano de manutenção adequado para uma turbina eólica.

5 – ANÁLISE E DISCUSSÕES

Conforme discutido nos tópicos anteriores são muitos os fatores que influenciam e impactam o desenvolvimento de um plano de manutenção robusto e assertivo. As diretrizes para desenvolvimento deste plano é um destes fatores fundamentais, ou seja, ter o conhecimento sobre todo cenário que envolve o desenvolvimento de atividades de manutenção, sejam elas preventivas, preditivas e corretivas. E não só ter o conhecimento técnico da máquina ou instalação industrial, mas sim, aplicar este conhecimento levando em consideração fatores como, o ambiente onde estes equipamentos estão instalados, regime de operações, recursos disponíveis, sejam eles pessoas, peças e o próprio tempo disponível para as atividades. Além disto, é importante ser considerado, questões financeiras do negócio, como por exemplo orçamento de manutenção disponível para determinado ano, questões estratégicas de manutenção, ou seja, em que tipo de manutenção se deseja investir seus maiores recursos, e quais serão seus resultados. Enfim, montar este quebra-cabeça não é uma tarefa muito simples, requer dedicação, conhecimento, trabalho em equipe e comprometimento, especialmente no que se refere a seguir as diretrizes acordadas e implementadas para cada plano.

Em contrapartida, a implementação de um plano adequado trará ao negócio, a melhora do desempenho dos equipamentos e máquinas, pois evitará falhas, desgastes prematuros e perda de precisão. Além disto, o trabalhador terá mais segurança em trabalhar com máquinas que operem dentro dos padrões requeridos pelas mesmas. Ainda dentro deste contexto, os recursos necessários para estes equipamentos e máquinas operarem, poderão ser reduzidos, como por exemplo, consumo de energia, água, lubrificantes dentre outros insumos. Por fim, questões relacionadas a custos operacionais também diminuirão, ou seja, reparos emergenciais, problemas relacionados a perda de produção e prováveis multas ou indenizações, além de questões relacionadas a satisfação dos clientes.

Segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção tem por missão garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender um processo de produção ou serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados.

Para Moro (2007) a importância de se estabelecer um programa de manutenção se dá pelo fato de que equipamentos parados representam além de

uma grave falha na manutenção, um grande prejuízo para a empresa, causando redução ou parada da produção, perdas financeiras e aumento dos custos.

Ferreira (2007) defende que uma mudança estratégica vem sendo adotada pelas empresas no que se refere a processos de manutenção. Essa mudança tem apresentado resultados diretos em relação a uma melhor disponibilidade, lucros maiores, maior segurança das equipes e instalações, redução de custos e preservação do meio ambiente.

A tabela e gráfico abaixo traz uma perspectiva traduzida em valores financeiros sobre importância e impactos que os custos de manutenção trazem para a indústria de uma forma geral, e dentro deste contexto um plano de manutenção adequado é um fator imprescindível.

Segmento Industrial	% Custo total de Manutenção em relação ao Faturamento Bruto da Empresa
Açúcar, Alcool, agropecuário e Agroindustrial	4,75
Alimentos e Farmacêuticos	2,00
Automotivo	2,17
Construção Civil e Construção Pesada	6,67
Energia Elétrica	3,00
Hospitalar e Predial	2,00
Cimento e Cerâmica	3,00
Mag. Equipamento Aeronáutico	10,00
e Eletroeletrônica	
Metalúrgico	3,45
Mineração	2,33
Papel e Celulose	5,50
Petróleo	1,50
Petroquímico e Plástico	1,67
Prestação de Serviços (Equipamentos)	4,00
Prestação de Serviços (Mão de obra)	7,25
Químico	3,00
Saneamento	8,00
Siderurgia	6,20
Têxtil e Gráfico	2,60
Transporte e Portos	6,33

Tabela 01 – Custo Total de Manutenção relação ao faturamento bruto por segmento
 Fonte: Manutenção Função Estratégica – Alan Kardec, Júlio Nascif – 5 Edição 2019

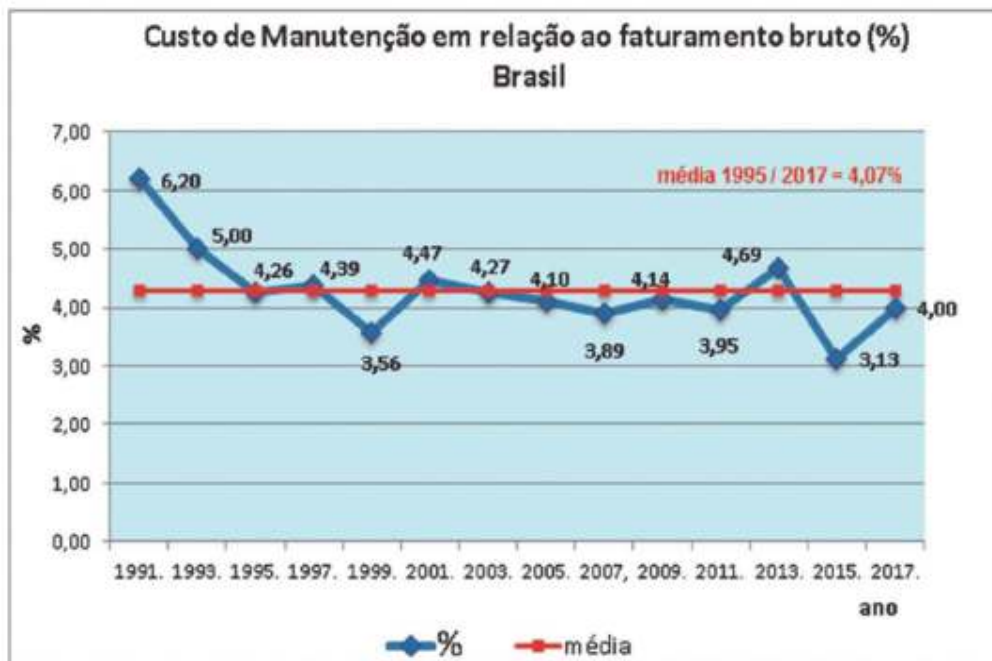


Tabela 02 – Custo Total de Manutenção em relação ao faturamento bruto
Fonte: Manutenção Função Estratégica – Alan Kardec, Júlio Nascif – 5 Edição 2019

Sendo assim, não há como deixar de lado o tema manutenção, tão pouco desenvolver um plano de manutenção que não atenda as expectativas do negócio. É crucial que a manutenção desenvolva seu papel pautada em estratégias que tragam resultados positivos. E, quando se comenta sobre resultados, não é somente no âmbito financeiro, mas em questões ligadas a disponibilidade de equipamentos, confiabilidade, segurança e até o meio ambiente, que dentre outros fatores também fazem parte de todo este processo, e serão impactos de acordo com as estratégias que forem escolhidas.

A figura abaixo traz uma representação muito simples sobre os tipos de manutenções e suas respectivas consequências e impactos. Apesar de não tratarmos de todas as variações de tipos de manutenção mostradas na tabela, é interessante observarmos cada uma delas.

Tipo de Manutenção	Ação	Atuação	Foco	Consequências		
				Custo	Disponibilidade	Segurança
Corretiva não Planejada	Reativa	Não Planejada	Correção emergencial	Red	Red	Red
Preventiva	Próativa	Planejada	Antecipação de falhas	Yellow	Yellow	Green
Preditiva/Inspeção	Próativa (monitoramento)	Planejada	Monitorar e Diagnosticar	Green	Green	Green
Detectiva /Inspeção		Planejada	Monitorar e Diagnosticar	Green	Green	Green
Prescritiva		Planejada	Monitorar, Diagnosticar e Prescrever atuação	Green	Green	Green
Corretiva Planejada	Correção indicada pelo monitoramento	Planejada	Corrigir com planejamento antecipado.	Green	Green	Green
Engenharia de Manutenção	Proativa ou Corretiva	Planejada	Melhorias	Green	Green	Green
	Ruim		Razoável			Bom

Tabela 03 – Características das formas de atuação de manutenção
 Fonte: *Manutenção Função Estratégica – Alan Kardec, Júlio Nascif – 5 Edição 2019*

Trazendo esta análise do plano de manutenção e suas diretriz para o ambito técnico, conforme explanado no início deste tópico, é importante que se tenha clareza sobre os tipos de manutenção, quando aplica-las e em quais investir de acordo com as estratégias do negócio, sendo assim, de forma sucinta é apresentado em forma gráfica o comportamento esperado de um determinado equipamento ou sistema mediante a decisão de mante-lo em operação aplicando determinado tipo de manutenção.

O gráfico abaixo mostra o comportamento de desempenho de um equipamento onde se atua de forma corretiva sem planejamento, ou seja, somente após a quebra haverá atuação da manuteção. Dois pontos podem ser destacados, o primeiro relacionado a queda do desempenho ao longo do tempo. E o segundo ponto que a falha ocorre de forma aliatória, t_0-t_1 é diferente de t_2-t_3 , ou seja, não se pode prever quanto tempo o equipamento irá operar, tão pouco quando ocorrerá a falha.



Figura 19 – Gráfico Manutenção Corretiva Não Planejada
 Fonte: Manutenção Função Estratégica – Alan Kardec, Júlio Nascif – 5 Edição 2019

O próximo gráfico logo abaixo mostra o comportamento de desempenho de um equipamento onde se atua de forma preventiva, onde a ideia é evitar ou prevenir as falhas. Especialmente em áreas onde a segurança é fator primordial como na aviação, este tipo de manutenção é muito utilizado. Neste tipo de manutenção as diretrizes que o fabricante fornece devem ser seguidas, além das questões operacionais serem avaliadas conforme comentado ao longo deste trabalho.



Figura 20 – Gráfico Manutenção Preventiva
 Fonte: Manutenção Função Estratégica – Alan Kardec, Júlio Nascif – 5 Edição 2019

Como terceiro gráfico, tem-se a representação do comportamento do desempenho de um equipamento onde se atua de forma preditiva, também conhecida como manutenção sob condição, pois o equipamento terá seu comportamento ou condição de operação monitorada, e as atividades de manutenção ocorrerão de acordo com os resultados deste monitoramento.

Algumas questões precisarão ser avaliadas e perguntas serem respondidas com o intuito de aplicar a manutenção preditiva, por exemplo, é possível tecnicamente monitorar o equipamento? Faz sentido monitorá-lo devido criticidade do mesmo? As progressões dos danos podem ser acompanhados? É possível analisar e dar um diagnóstico com possíveis reparos? Claro que não só isso, mas questões relacionadas ao custo dos equipamentos de monitoramento, conhecimento da equipe que farão dos diagnósticos, dentre outros tópicos. Fato é que, em um monitoramento adequado, haverá redução de custos com intervenções desnecessárias, aumento de disponibilidade e segurança da equipe, maior tempo de operação, dentre outros pontos positivos.

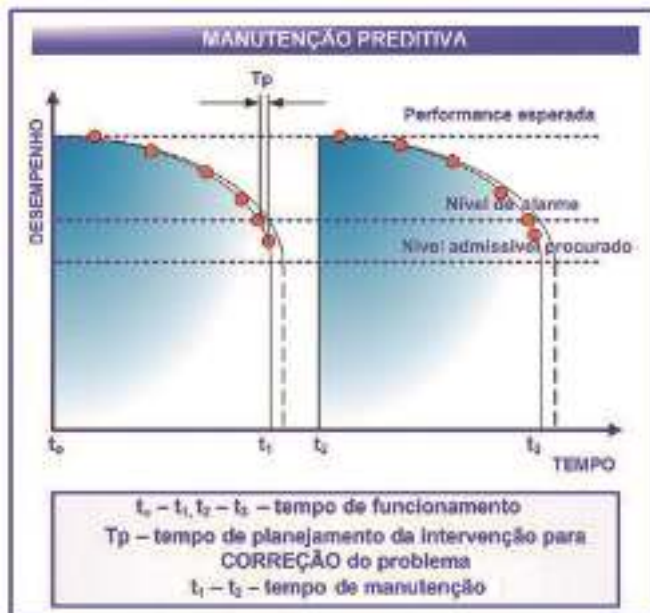


Figura 21 – Gráfico Manutenção Preditiva

Fonte: *Manutenção Função Estratégica* – Alan Kardec, Júlio Nascif – 5 Edição 2019

No contexto das turbinas nos parques eólicos, estes cenários de manutenções não são diferentes. Estes equipamentos sofrem com falhas nos seus respectivos sistemas e subsistemas devido as mais variadas razões, e planos de

manutenção adequados precisam ser implementados. Como exemplo destas falhas, temos uma tabela abaixo demonstrando os sistemas de uma turbina eólica, número de falhas, MTBF⁶ e MTTR⁷ que foram levantados a partir deste registro de um parque eólico com 10 turbinas eólicas na região do Rio Grande do Norte sendo monitorado por 01 ano em 2020. Apesar de não estar identificado as possíveis causas que levaram a estas respectivas falhas, bem como os dados de tempo médio entre falhas e tempo de reparo, é possível afirmar que existem alguns sistema com números elevados de eventos, principalmente levando em consideração o período estipulado de monitoramento de 01 ano e o número de turbinas que forma monitoradas.

Subsistema	#Falhas	MTBF (horas)	λ	MTTR (horas)
Sistema Hidráulico	79	1111,90	8,99E-04	4,60
Yaw	12	7320,00	1,37E-04	4,72
Controle	78	1126,15	8,88E-04	3,48
Gerador	10	8784,00	1,14E-04	7,77
Multiplicadora	66	1330,91	7,51E-04	1,75
Nacele	290	302,90	3,30E-03	0,96
Rotor	48	1830,00	5,46E-04	23,82
Transformador	1	87840,00	1,14E-05	1,07
Conversor	49	1792,65	5,58E-04	5,19

Tabela 04 – Indicadores de manutenção do parque eólico.

Fonte: Integração com SCADA para gestão de indicadores de manutenção em parques eólicos, Artigo (Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semi-árido, 2021

Um outro dado interessante neste mesmo monitoramento é mostrado na tabela abaixo, que o autor chama de falhas críticas ou crônicas observadas no parque eólico e o tempo de turbina parada em horas na coluna DT (horas) que seria Down Turbine em inglês, traduzido turbina parada.

⁶ MTBF refere-se a Mean Time Between Failures, ou seja, tempo médio entre falhas

⁷ MTTR refere-se a Mean Time To Repair, ou seja, tempo médio de reparo

Código	Descrição	Subsistema	Dt (horas)	MTTR (horas)	#Falhas	Status
733	Alta temperatura do óleo da caixa de engrenagens	Multiplicadora	44,08	0,76	58	Crônico
748	Sem detecção de velocidade TOG> 50% da velocidade	Controle	29,75	1,49	20	Crônico
767	Operação do sistema de pitch não está OK	Controle	100,63	6,71	15	Crônico-crítico
777	Erro de módulos de hardware	Controle	21,15	1,92	11	Crônico
792	Anemômetro em falha	Nacele	18,25	0,51	36	Crônico
1808	SSD de alto nível de vibração (choque)	Nacele	237,65	0,95	250	Crônico
4014	Can 3 Master Error	Hidráulico	110,78	3,08	36	Crônico
4016	Evolução de ataque incoerente	Rotor	51,48	2,57	20	Crônico
4029	Nível baixo de óleo de freio hidráulico	Hidráulico	103,82	7,42	14	Crônico-crítico
4031	Baixo nível de óleo hidráulico	Hidráulico	73,83	8,20	9	Crônico-crítico

Tabela 05 – Falhas Crônicas e Críticas identificadas no parque eólico

Fonte: Integração com SCADA para gestão de indicadores de manutenção em parques eólicos, Artigo (Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semi-árido, 2021

Diante do que foi exposto, fica claro que qualquer equipamento, sistema ou instalação industrial em operação está sujeita a desgastes e falhas, e que todo processo de manutenção é parte integrante e fundamental do negócio, e por este motivo precisa ser tratado de forma relevante.

É necessário que profissionais com conhecimento, experiência, e principalmente comprometimento possam analisar e desenvolver planos de manutenção adequados, dentro das diretrizes e especificações que cada indústria impõe, e que principalmente venha de encontro com as expectativas e resultados que o negócio espera.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do tema exposto e analisado neste estudo, algumas conclusões e considerações devem ser extraídas com intuito de validar se os objetivos inicialmente levantados foram alcançados, além de estender um convite aos novos interessados a prosseguir em novas análises e com isto perpetuar campo do conhecimento na área de planejamento de manutenção.

Primeiramente, fica claro neste estudo que independentemente do tipo de instalação industrial, a manutenção tem um papel fundamental neste contexto, e dentro deste tópico o planejamento de manutenção é imprescindível neste aspecto. Estratégias implementadas de forma errônea ou com pouca aderência as perspectivas do negócio trarão impactos negativos ao negócio. Por outro lado planos de manutenção assertivos e aderentes produzirão os resultados esperados.

Uma segunda consideração a ser levantada, e já comentada neste estudo é que o desenvolvimento de um plano adequado precisa ser realizado a “várias mãos”,

ou seja, não é somente sob a perspectiva do departamento de manutenção, mas sim de todos que porventura poderão ser impactados neste assunto. É claro que, o desenvolvimento técnico deste plano será dos especialistas de manutenção, porém questões como por exemplo, orçamento disponível, melhores datas para as paradas dos equipamentos, cenários de segurança, meio ambiente e saúde, além de outros aspectos precisarão serem apresentados, alinhados e discutidos com cada um dos setores do negócio.

Um terceiro ponto a se destacar é o conhecimento e disposição no sentido de desenvolver um plano adequado. Conforme comentado anteriormente, não se produz um plano de manutenção somente com conhecimento técnico do equipamento ou instalação industrial. É necessário, conhecer as especificidades de onde este equipamento está instalado e se haverá impactos devido a este local. Outro fator é o regime de operação deste equipamento, melhores datas de parada para execução das manutenções, que tipo de manutenção deverá ser implementada dentre outros aspectos. Enfim, o esforço e comprometimento dos envolvidos neste cenário é proporcional a qualidade do plano de manutenção desenvolvido.

Trazendo para o contexto dos parques eólicos, os tópicos descritos acima também se aplicam em sua totalidade, e fazem total sentido. Além disto, é importante destacarmos que, no Brasil a geração de energia eólica é um tema relativamente recente, principalmente quando tratamos de um grande volume de turbinas eólicas com potências entre 1,2MW a 5,5MW. Isso traz alguns pontos importantes que precisam ser destacados, como a experiência e conhecimento das equipes nas respectivas tecnologias, histórico de monitoramento e comportamento das turbinas em uma região tropical, disponibilidade de peças sobressalentes, dentre outros fatores já mencionados neste estudo. Sendo assim, estes pontos reforçam ainda mais a necessidade de planos adequados, sendo revisados constantemente, dentro de um processo de melhoria contínua, com a aplicação de lições aprendidas, utilização de ferramentas e processos de qualidade, troca de experiências em um âmbito nacional e até mesmo internacional através de simpósios, palestras, discussões técnicas e estudos como este dentre outros.

Somente desta forma chegaremos a um cenário de maturidade adequada da manutenção no contexto de geração eólica, como por exemplo hoje temos em outras áreas de geração de energia, bem como em alguns tipos de indústria. Esta

maturidade trará novas perspectivas e possibilidades, e assim fazendo com que o processo de melhoria continua se mantenha relevante.

Por fim, durante o desenvolvimento deste trabalho foi comentado que o mesmo possui suas limitações no âmbito da pesquisa e temas abordados. Desta forma, por se tratar de um campo vasto de conhecimentos, muitos assuntos não foram abordados e discutidos neste trabalho. Sendo assim, estende-se o convite aos interessados que realmente queriam seguir para darem continuidade a este assunto tão interessante a ser explorado por novos pesquisadores.

7 REFERÊNCIAS

Chestney, N. **Energia eólica terá recorde de instalação no mundo até 2027; Brasil dá impulso.** Site InfoMoney. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/negocios/energia-eolica-tera-recorde-de-instalacao-no-mundo-ate-2027-brasil-da-impulso>. Acesso em 11 Março 2024.

ABEEólica. **Associação Brasileira de Energia Eólica.** Disponível em: <https://abeeolica.org.br>. Acesso em 11 Março 2024.

Ministério de Minas e Energia. **Segundo semestre de 2023 começa com recordes na geração eólica.** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/segundo-semester-de-2023-comeca-com-recordes-na-geracao-eolica>. Acesso em 12 de Março 2024

Iberdrola. **O que é a energia eólica, como ela se transforma em eletricidade e quais são suas vantagens.** Disponível em <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/energia-eolica>. Acesso em 12 Março 2024

Neoenergia. **Você sabe como funciona um aerogerador.** Disponível em <https://www.neoenergia.com/w/voce-sabe-como-funciona-um-aerogerador-#:~:text=Semelhante%20a%20um%20moinho%20de,energia%20mec%C3%A2nica%20em%20energia%20el%C3%A9trica>. Acesso em 12 Março 2024

DACHERY, M.J. **7 Componentes do Aerogerador que você Precisa Conhecer**. Disponível em <https://energes.com.br/componentes-aerogerador/>. Acesso em 12 Março 2024

TAVARES, LOURIVAL. **Administração Moderna da Manutenção**. Rio de Janeiro: Novo Pólo, 1999.

KARDEC, A.; NASCIF J. **Manutenção: função estratégica**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2003. 11 p.

XENOS, Harilaus Georgius D´Philippus. **Gerenciando a manutenção produtiva: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade**. Belo Horizonte: Editora de desenvolvimento gerencial, 1998. 19 p

Reescrever. **Como fazer citação**. Disponível em https://reescrever.app/como-fazer-citacao/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwncWvBhD_ARIsAEb2HW_QZ2JwN5cQovd eN6WIGvEITKjZz3sCuElmSFPp90OZTETxcO21FEYaAr6DEALw_wcB. Acesso em 14 de Março 2024.

Windbox. **Manutenção de aerogeradores: conheça 3 dicas para otimizar este processo**. Disponível em <http://windbox.com.br/blog/manutencao-de-aerogeradores/#:~:text=Os%20tipos%20de%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20preventiva,um%20desses%20tem%20suas%20peculiaridades>. Acesso em 14 de Março 2024.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 3.ed.Porto alegre: Bookman, 2005.

JÚNIOR. Z. Luiz Antonio; CERULLO. A.L.F Vitor André. **Estudo e Aplicação de KPI (Key Performance Indicators) na Gestão da manutenção no setor de energia eólica**. 2017.74 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ACKERMANN, T. **Wind power in power systems**. Nova Iorque, Editora John Wiley, 2012.

SCHMIDT, Maria do C.; STADLER, Adriano (Org.); RODERMEL, Pedro M. **Desenvolvimento gerencial, estratégia e competitividade**. (Coleção Gestão empresarial, v. 3). Curitiba: Ibpex, 2012.

NUNES, E. L. **Manutenção Centrada em confiabilidade (MCC): análise da implantação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada**, Florianópolis. 146 páginas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina 2001.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Florianópolis: Editora da Universidade de Santa Catarina, 2001.

BSM Engenharia S.A. **Subida e Instalação de um conjunto de pás em um aerogerador**. Disponível em <https://bsm.com.br/inicio/eolica/>. Acesso em 16 de Março de 2024

Portal Solar. **Energia eólica: o que é, como funciona, vantagens e desvantagens**. Disponível em <https://www.portalsolar.com.br/energia-eolica>. Acesso em 16 de Março de 2024

SOUZA, J. B. **Alinhamento das estratégias do planejamento e controle da manutenção (PCM) com as finalidades e funções do planejamento e controle da produção (PCP): Uma abordagem analítica**. Ponta Grossa: UTFPR, 2008

FILHO, G. B. **Dicionário de Termos de Manutenção e Confiabilidade**. Editora Ciência Moderna, 2000.

ALMEIDA, P.S. **Gestão de Manutenção Aplicadas as Áreas Predial e Elétrica**. Editora Saraiva, 2017

ALMEIDA, P.S. **Manutenção Mecânica Industrial – Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada**. Editora Érica/Saraiva, 2014

MENDES, A. Angélica; RIBEIRO, D. José Luis **Estabelecimento de um plano de manutenção baseado em análises quantitativas no contexto da MCC em um**

cenário de produção JIT – Artigo Científico – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2014

ABECOM. **O que é CMMS? Uma visão geral do software de gerenciamento de manutenção.** Disponível em <https://www.abecom.com.br/cmms-software-de-manutencao/>. Acesso em 27 de Março de 2024

EMAIMT Fluke Reliability Brand. **Software CMMS.** Disponível em <https://www.emaint.com/pt/cmms/emaint-cmms-software/>. Acesso em 27 de Março de 2024.

MARINHO. T. **Conheça a Anatomia de Pás Eólicas.** Disponível em <https://www.linkedin.com/pulse/conhe%C3%A7a-geometria-de-p%C3%A1s-e%C3%B3licas-thayc-marinho/?originalSubdomain=pt>. Acesso em 27 de Março de 2024

WINDPOWER BRASIL. **Gearboxes.** Disponível em <https://windpowerbrasil.com.br/gearbox/>. Acesso em 28 de março de 2024

LIEBHERR NO BRASIL. **Rolamentos principais para turbinas eólicas.** Disponível em <https://www.liebherr.com/pt/bra/produtos/componentes/rolamentos-de-giro-e-redutores-de-giro/rolamentos-de-giro-para-turbinas-eolicas/rolamentos-de-giro-para-turbinas-eolicas.html>. Acesso em 29 de Março de 2024

FIGUEIREDO, C.P.P.J **Otimização da manutenção e extensão de vida de rolamentos principais de aerogeradores de acoplamento direto,** Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – FEUP Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto, 2021.

KELLER, J.;GUO Y. - **Rating of a Pitch Bearing for a 1.5-Megawatt Wind Turbine - National Renewable Energy Laboratory – 2022** – Disponível em <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/82462.pdf> - Acesso em 30 de Março de 2024.

GONTIJO, G. F. **Controle de um sistema eólico na configuração DFIG com funcionalidades de condicionamento de energias.** Orientador: Prof. Mauricio Aredes. 2016. 101 f. Trabalho de conclusão de curso (Ensino Superior) - Engenharia

Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SALES, R. **Lubrificante industrial: qual sua importância e como escolher o adequado.** 2019. Disponível em: <https://blog.acoplastbrasil.com.br/lubrificanteindustrial/>. Acesso em 08 Abril de 2024

SEMANTIC SCHOLAR. **Indirect estimation of the Yaw-Angle misalignment in a horizontal axis wind turbine.** Disponível em <https://www.semanticscholar.org/paper/Indirect-estimation-of-the-Yaw-Angle-misalignment-a-Tsioumas-Karakasis/5fbb35a3d7cffe3034dc8218a3685dd3b6f35d97>. Acesso em 09 de Abril de 2024.

CAMPOS, S.C. NATÁLIA; FERRARI, O.H. **Sistemas eólicos de velocidade fixa e variável: Um estudo comparativo.** Intercursos Revista Científica. Ciências Exatas. Unidade Ituiutaba, UEMG, 2021.

CRESESB. **Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica.** Disponível em https://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=231. Acesso em 10 de Abril de 2024.

MARXSERVICES. **Project case study.** Disponível em <https://maxservices.com.au/wind-renewables-lincoln-gap/>. Acesso em 10 de Abril de 2024.

KARDEC, A; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica.** 3. ed. rev. e. ampl. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

MORO, N; AURAS, A. P. **Introdução à Gestão da Manutenção.** Monografia. Santa Catarina, 2007.

FERREIRA, J. R. **A Importância da Manutenção na Indústria.** Monografia. Taquaritinga, 2007.

KARDEC, A; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica.** 5. ed. rev. e. ampl. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2019.

RIBEIRO, L; CAVALCANTE, F; VILAR, Z; **Integração com SCADA para gestão de indicadores de manutenção em parques eólicos.** Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica. Universidade Federal Rural do Semi-árido, 2021.

SIBINELLI, TAÍSA C. **Crise energética e licenciamento ambiental simplificado: Pequenas centrais hidroelétricas e participação da sociedade civil.** Piracicaba: Universidade Metodista de Piracicaba, 2010

BRUNORO, CLAUDIO M. **Metodologia de tratamento integrado de energia elétrica e recursos naturais para empreendimentos dos setores residenciais e comerciais.** São Paulo: USP, 2007