

MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE APLICADA A AEROGERADORES

Maurício João Cruz Arcanjo dos Santos¹

Sérgio Oliveira Pitombo²

RESUMO

Este trabalho visa dar um visão geral sobre os elementos necessários para a criação de um plano de manutenção centrada em confiabilidade em uma usina de geração eólica e, para tal, são usadas bases teóricas sobre MCC e também artigos de pesquisas sobre os tipos de falhas mais comuns nesse tipo de empreendimento. São abordados os temas de manutenção corretiva, preventiva e preditiva, manutenção centrada em confiabilidade (MCC), diagrama de análise de modo de falha, seus efeitos e criticidade (FMECA), energia eólica e aerogeradores para, por fim, criar um plano de manutenção. Ao final, notou-se ser viável a criação do plano de manutenção centrado em confiabilidade para se reduzir o risco de operação dos parques eólicos.

Palavras-chave: Energia eólica, aerogeradores, MCC, FMECA, manutenção

1 INTRODUÇÃO

Dentro do cenário atual de um mundo capitalista as empresas enfrentam ampla concorrência que devido à globalização vem de todos os cantos do planeta e, para manterem-se competitivas, estas são obrigadas a buscarem a melhoria contínua em processos. Como exemplos de meios para alcançarem este objetivo podem-se citar o aumento da produtividade, qualidade, eficiência, eficácia e segurança que convergem para o aumento da lucratividade, competitividade e imagem das empresas.

Neste ínterim, a manutenção, que costumeiramente era tida como um gerador de custos, passa a ser tratada como um setor estratégico e, segundo Mendes (2011), a estratégia de manutenção passou, então, a ser fator de construção de vantagem competitiva em manufatura porque possui potencial para reduzir os custos produtivos.

¹ Engenheiro eletricista (Formado em 2011.1 na Faculdade Área 1). E-mail: mauricioarcanjo.s@gmail.com

² Mestre em Engenharia elétrica (USP) – Coordenador do curso MBA em gestão da manutenção do Senai Cimatec. E-mail: sergio.pitombo@fieb.org.br

Assim como o mercado evoluiu e conduziu as empresas a mudarem e evoluírem, a manutenção acompanhou o processo e também teve de se desenvolver e, de acordo com Queiroz, Holanda, Dos Santos, & Borges (2013) a manutenção encontra-se em sua 4ª geração. Porém, Mendes (2011) discorre que o setor de manutenção de grande parte das empresas ainda opera de forma reativa, utilizando apenas manutenções corretivas ou preventivas mal planejadas.

Foi na terceira geração da manutenção que surgiu no setor aeronáutico o conceito de manutenção centrada em confiabilidade, cuja aplicação é o foco deste trabalho. Uma definição da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) dada por Kardec & Nascif (2001) aponta como sendo um dos métodos de suporte a decisões capazes de contribuir para o aumento da confiabilidade na produção.

Ademais, vivemos uma mudança cultural onde são valorizados empreendimentos que tenham forte apelo ambiental e sustentável, visando agredir o planeta o mínimo possível. Nesse ínterim a produção de energia eólica, que tem como fonte de energia renovável os ventos, vem crescendo e se tornando cada vez mais relevante no Brasil.

Conforme supracitado, este trabalho visa aplicar o método de MCC para demonstrar como poderia ser desenvolvido um plano de manutenção para um aerogerador. Para tal, serão utilizadas técnicas como *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), análise de criticidade e análise de risco além de conceitos tradicionais como manutenções preditivas, preventivas e corretivas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão brevemente abordados conceitos importantes para o desenvolvimento do trabalho. Dentre eles estão a manutenção centrada em confiabilidade e FMEA, energia eólica e aerogeradores.

2.1 Manutenção centrada em confiabilidade (MCC)

Manutenção Centrada em Confiabilidade ou *Reliability Centered Maintenance* (RCM) segundo a Nasa (2000) é o processo utilizado para determinar a forma de manutenção mais eficaz para cada caso analisando sua causa raiz. Sob a luz de

Fleming, Silva, & França (1999) é um método para o planejamento da manutenção industrial que visa racionalizar e sistematizar a definição de tarefas de manutenção, bem como garantir a confiabilidade e a segurança operacional ao menor custo.

Os seguintes pontos são destacados por Lafraia (2014) como sendo vantagens da aplicação do MCC:

- Redução na carga de trabalho de Manutenção Preventiva;
- Aumento da disponibilidade dos ativos;
- Aumento da vida útil dos ativos;
- Redução do número de peças sobressalentes;
- Pessoal especializado em planejamento e manutenção
- Redução de custos.

HISTÓRICO DA MCC

O MCC surgiu entre o final dos anos 60 e início dos anos 70 no setor aeronáutico dos Estados Unidos com o objetivo de desenvolver um plano de manutenção economicamente viável para a aeronave Boeing 747. Como esta era absolutamente complexa e maior que as outras existentes no mercado, demandava um número maior de intervenções e então o uso do método tradicional de manutenção preventiva tornava o custo do projeto proibitivo.

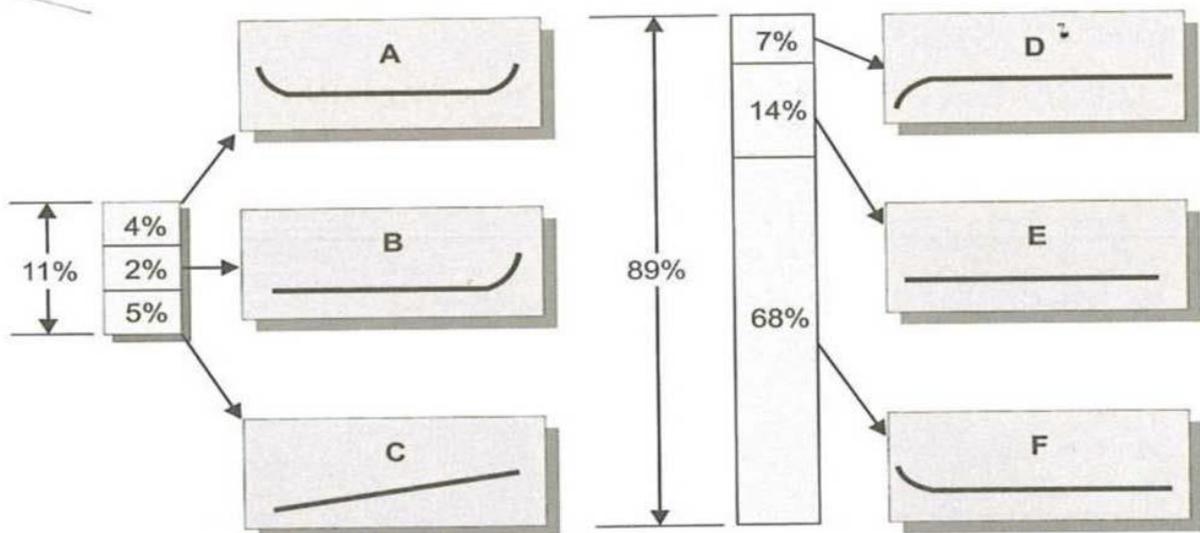
Assim, em 1978, surge o documento criado por F. Stanley Nowlan e Howard F. Heap chamado Reliability-Centered Maintenance o qual sintetiza as técnicas e formas de aplicação desenvolvidas para a solução do problema. Segundo a Nasa (2000) o trabalho demonstrou que a forte correlação entre tempo de uso (idade) e falha, sintetizado pela curva da banheira, não existia para boa parte dos equipamentos, e que o fundamento da manutenção preventiva (baseada no tempo) era falsa para estes.

De acordo com Moubray (2000) e ilustrado pela Figura 1, pesquisas em aeronaves civis relataram que apenas 4% dos itens seguem a curva do tipo A, conhecida como a típica forma da curva da banheira. A maior parte dos sistemas (68%) responde a curvas do tipo F, onde a probabilidade de falha não depende do tempo.

Como houve evolução na indústria e a introdução de diversos equipamentos eletrônicos em detrimento aos mecânicos, descobriu-se que a curva da banheira não

era aderente a esses tipos de equipamentos, pois o desgaste no final de vida era basicamente causado devido aos contatos entre partes mecânicas e, como isso não acontecia nos eletrônicos, surgiram essas novas curvas. Pode-se observar no gráfico F que a operação inicia-se com uma taxa de mortalidade infantil porém depois a taxa de falha cai e fica constante. Então, supondo que seja feita uma manutenção preventiva, ela fará com que a probabilidade de falha aumente por colocar um novo componente e esse voltar para seu período de depuração inicial, logo para alguns equipamentos o ideal é deixá-los funcionarem até falharem.

Figura 1 - Diferentes tipos de curva da banheira



Fonte: Moubray (2000)

Posteriormente ao uso na aviação a MCC foi aplicada pela força aérea e marinha norte americanas e pela indústria nuclear. A partir dos anos 90 passou a ser integrado a algumas indústrias devido à necessidade de reduzir custos para melhorar a competitividade.

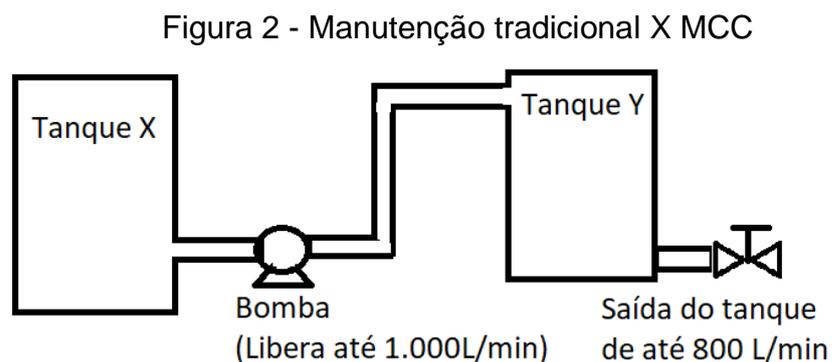
OBJETIVO DA MCC

Neste ponto há uma mudança de paradigma que pode dificultar a implantação do MCC. Enquanto na visão tradicional e difundida da manutenção o objetivo é manter a integridade do equipamento, na ótica da manutenção centrada em confiabilidade há uma alteração e começa-se a ter uma visão mais ampla, considerando-se o sistema em detrimento ao equipamento.

Segundo Lafraia (2014) o objetivo do RCM é “assegurar que um sistema ou item continue a preencher as suas funções desejadas” assim, o foco passa a ser a preservação das funções do sistema como um todo e não a integridade do equipamento. Nesse ínterim, é sabido que o equipamento precisará ter potência e disponibilidade suficientes para ter o desempenho pelo menos igual à meta definida pela equipe que, caso esta seja superior à potência nominal do equipamento, a análise usando a MCC e outra ferramenta de qualidade chamada FMECA, auxiliaria a identificar que não seria um caso corrigível por manutenção mas por um re-projeto.

Pode-se ilustrar essa mudança através da Figura 2, onde na manutenção tradicional toda vez que a bomba apresentasse algum defeito como ruído ou vibração por exemplo, seria feita uma manutenção corretiva. Porém, mesmo com esse problema, ela pode estar bombeando os 800 L/m então, segundo a filosofia do RCM, não precisaria de intervenção porque ainda estaria cumprindo a sua função que é bombear 800 L/m.

Então, com esta visão de sistema o estabelecimento da estratégia de manutenção, que é o objetivo da MCC, passa a ser feito por equipes multidisciplinares que buscam manter a funcionalidade do sistema com os menores custos possíveis. É importante salientar que questões ambientais, de segurança e qualidade passam a ter relevância na criação do plano de manutenção.



Fonte: Autor (2018)

2.2 FMECA - Diagrama de análise de modo de falha, seus efeitos e criticidade

Segundo a ABNT (1994) o FMEA é um método qualitativo de análise de confiabilidade que envolve o estudo dos modos de falhas que podem existir para cada item, e a determinação dos efeitos de cada modo de falha sobre os outros itens e sobre a função específica do conjunto. Já o FMECA, um dos objetos de estudo desse artigo, significa Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticalidade e é semelhante ao FMEA porém são adicionados os componentes de criticalidade que são ocorrência, severidade e detecção, a partir dos quais se calcula o Número de Prioridade de Risco (NPR), que será abordado mais à frente.

O FMECA, então, dá subsídios para identificar potenciais falhas críticas, atribuir nível de severidade, determinar a frequência que a falha ocorre, identificar a facilidade de detecção da falha e hierarquizar as falhas. O uso da ferramenta também permite ter profundo conhecimento sobre o processo, uma vez que as funções do sistema e as ações atenuantes das falhas são documentadas, aumenta a confiabilidade do sistema, contribui para a padronização dos processos e melhora a competitividade da empresa.

Para dar continuidade ao estudo faz-se necessária a explanação de alguns conceitos, que conforme Sakurada (2001) e Siqueira (2009) podem ser definidas como:

- FALHA FUNCIONAL: Incapacidade de desempenhar função específica dentro dos limites de performance desejados;
- FALHA POTENCIAL: Condição identificável e mensurável que indica uma falha funcional pendente ou em processo de ocorrência;
- FALHA EVIDENTE: Falha facilmente detectável pela equipe de operação;
- FALHA OCULTA: falha não detectável pela equipe de operação;
- MODO DE FALHA: a maneira que o componente em estudo deixa de executar a sua função ou desobedece as especificações;
- EFEITO DA FALHA: é a forma ou maneira de como o modo de falha se manifesta ou como é percebido em nível de sistema;
- CAUSA DO MODO DE FALHA: É o motivo que levou o modo de falha a ocorrer;

É importante salientar que o modo de falha é uma anomalia que ocorre em nível de componente, já o efeito ocorre em nível de sistema. Ademais, o modo de falha é uma propriedade de cada componente, devido a cada um ter suas características específicas como função, local de aplicação, materiais, fabricação e qualidade. Exemplificando, para um eixo é possível ter como modos de falha ruptura, empenamento e desgaste, diferentemente, em um rolamento podem ser ruptura ou travamento.

Ainda segundo Sakurada (2001), o conhecimento dos modos de falha nos permite tomar as providências técnicas na fase do ciclo de vida que se está analisando para evitar a manifestação daquele modo de falha. Assim, auxilia na manutenibilidade e confiabilidade além de servir para programas de capacitação, proporcionando um melhor entendimento dos componentes, do sistema, facilitando a escolha do tipo de manutenção (corretiva, preventiva, preditiva) e garantindo maior disponibilidade.

O FMECA não é definitivo e é dinâmico, devendo ser constantemente atualizado pela equipe, além de ser mutável, acompanhando as alterações do processo durante todo o seu ciclo de vida. Quanto às equipes, estas devem ser multidisciplinares e compostas por membros de diversos setores que atuem no sistema que será avaliado, para que contribuam com diferentes experiências e conhecimentos, reduzindo assim a probabilidade de que ocorram erros.

A equipe delimita a abrangência do estudo do sistema, os problemas, identifica e propõe ideias, fornece e recomenda análises ou técnicas apropriadas, toma decisão baseada num consenso, que é uma decisão coletiva alcançada através da participação ativa de todos os membros. Sugere-se que tenha de 5 a 7 membros. É importante que se tenha um responsável pelo projeto ou sistema e um líder de FMECA, este último para que conheça a técnica e tire as dúvidas conceituais sobre ela, além de organizar e tratar as informações nos formulários.

As principais entradas da tabela do FMECA vem do mapa de processos e das entradas prioritárias da matriz de causa e efeito (diagrama de Ishikawa). Nota-se que não é recomendado elaborar a tabela sem essas ferramentas pois senão corre-se o risco de esquecer de incluir alguma informação, mesmo que se conheça profundamente o processo.

Consoante já citado, o Número de Prioridade de Risco (NPR) é resultado da multiplicação dos índices severidade, ocorrência e detecção, que serão descritos logo a seguir, cujo valor máximo de cada um é 10. Embora Sakurada (2001) tenha sugerido

o uso de índices de 1 a 10 optou-se, nesse trabalho, por usar índices de 1 a 7 replicando a metodologia usada por algumas indústrias do Polo Petroquímico de Camaçari. Outrossim, o NPR tem a função de subsidiar a priorização das falhas potenciais do sistema, visto que quanto maior o valor maior será o risco, e com isso ajudar a definir quais ações serão realizadas e em qual ordem.

Os autores Fogliatto & Ribeiro (2009) afirmam que deve-se atuar sobre 95% de todas as falhas obtidas através do uso do FMECA, logo estas apenas deverão ser analisadas se o NPR for maior que 50.

Sob a luz de Sakurada (2001) os índices de criticalidade podem ser definidos como:

- **Severidade:** é um índice que indica o quão sério é o efeito do modo de falha potencial e é aplicada sobre o efeito do modo de falha. Quanto mais grave e crítico é o efeito maior é o índice de severidade e o índice de severidade só pode ser alterado mediante uma mudança no projeto. Os valores atribuídos à severidade podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 - Índices de severidade

Severidade	Escore
O cliente provavelmente não tomará conhecimento	1
Leve aborrecimento	2-3
Insatisfação do cliente	4-6
Alto grau de insatisfação	7-8
Atinge as normas de segurança	9-10

Fonte: Adaptado de Sakurada (2001)

- **Ocorrência:** Ocorrência é um índice que corresponde a um número estimado (algumas vezes um número cumulativo) das falhas que poderiam ocorrer. Deve ser baseado ou na causa ou no modo de falha. A ocorrência pode ser reduzida mediante melhorias nas especificações de engenharia e /ou nos requerimentos do processo com a intenção de prevenir as causas e reduzir suas frequências. Os valores atribuídos à severidade podem ser vistos na Figura 4.
- **Probabilidade de não Detecção:** Embora seja chamado de detecção, essa é a probabilidade de que os sistemas de controle **não** detectem a falha (causa ou modo de falha) antes que esta atinja os clientes (internos ou externos). Para identificar um índice de não detecção deve-se estimar a habilidade para cada um dos controles para detectar a falha antes que ela alcance o cliente. O índice

de não detecção pode ser reduzido adicionando ou melhorando as técnicas de avaliação do projeto/processo, aumentando o tamanho das amostras. Os valores atribuídos à severidade podem ser vistos na Figura 5.

Figura 4 - Probabilidade de Ocorrência

Probabilidade de ocorrência	Chances de ocorrência	Escore
Remota	0	1
Baixa	1/20.000	2
	1/10.000	3
Moderada	1/2.000	4
	1/1.000	5
Alta	1/100	7
	1/20	8
Muito alta	1/10	9
	1/2	10

Fonte: Adaptado de Sakurada (2001)

Figura 5 - Probabilidade de não detecção

Probabilidade de não detectar a falha	Probabilidade (%) de um defeito individual alcançar o cliente	Escore
Remota	0-5	1
Baixa	6-15	2
	16-25	3
Moderada	26-35	4
	36-45	5
	46-55	6
Alta	56-65	7
	66-75	8
Muito alta	76-85	9
	86-100	10

Fonte: Adaptado de Sakurada (2001)

Tendo em vista que já foram abordados os conceitos fundamentais para o entendimento do FMECA, segue no Anexo I um modelo de tabela juntamente com instruções de como preenchê-la da melhor forma possível.

Em suma, seguem as etapas necessárias para que possa ser executado o FMECA:

1. Identificar o FMECA (CASO) a ser estudado, se é de produto ou de processo;
2. Identificar todas as partes componentes dos produtos, serviços ou equipamentos;
3. Caracterizar as funções de cada componente do produto, serviço ou equipamento;
4. Listar todas as formas possíveis segundo as quais os componentes poderiam falhar (modos de falha possíveis);
5. Descrever os efeitos possíveis de cada tipo de falha (tempo parado, insegurança, necessidade de consertos, efeitos para os clientes – sequelas);
6. Identificar todas as causas possíveis das falhas para cada modo de falha;
7. Verificar os controles existentes para prevenir a ocorrência ou detectar as falhas;
8. Avaliar a probabilidade de ocorrência da falha, a gravidade dos efeitos, a probabilidade de detecção;
9. Calcular o NPR (número de prioridade de risco) multiplicando as três avaliações entre si;
10. Tomar decisões e estudar as ações que visem reduzir os correspondentes índices de risco;
11. Definir a responsabilidades e prazos para as tomadas de ações;
12. Controlar o andamento das ações;
13. Analisar criticamente (pertinência, adequação e eficácia) as ações tomadas;
14. Reavaliar os índices após a implementação das ações;
15. Decidir se o estudo continua;
16. Atualizar / revisar o FMEA sempre que necessário.

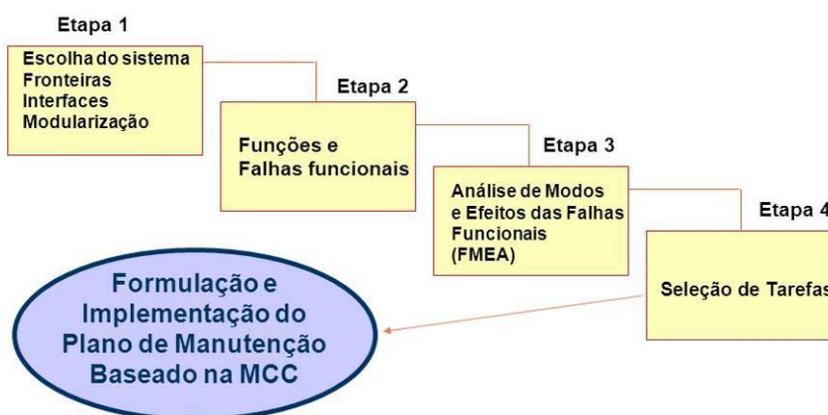
2.3 APLICAÇÃO DA MCC

O autor Moubray (2000) atesta que a MCC é uma análise fundamentada e sequencial cujo objetivo é responder a 7 perguntas sobre os itens a serem revistos, sendo que no uso atual acrescenta-se a oitava questão, conforme veremos a seguir:

1. Quais são as funções e padrões de desempenho esperado de um ativo no seu contexto operacional atual?
2. De que forma ele pode falhar em cumprir suas funções?
3. Quais eventos levam a cada falha funcional?
4. O que acontece quando cada falha ocorre?
5. De que forma cada falha importa?
6. O que pode ser feito para predizer ou prevenir cada falha?
7. O que deve ser feito caso uma tarefa pró-ativa adequada não possa ser encontrada?
8. Quais as frequências ideais para as tarefas de manutenção?

Pode-se dividir as perguntas em 3 etapas, onde a primeira é a etapa, que vai da questão 1 a 5, é a de análise, a segunda, questões 6 e 7, de decisão e a terceira e última é de implementação. Nota-se que as questões da etapa de análise são respondidas utilizando-se da ferramenta FMECA e para as demais pode-se usar o diagrama de decisão. Ademais, a Figura 6 ilustra uma espécie de diagrama de blocos, o qual ilustra os processos e análises necessários para que faça a implementação da MCC.

Figura 6 - Diagrama de Implantação da MCC

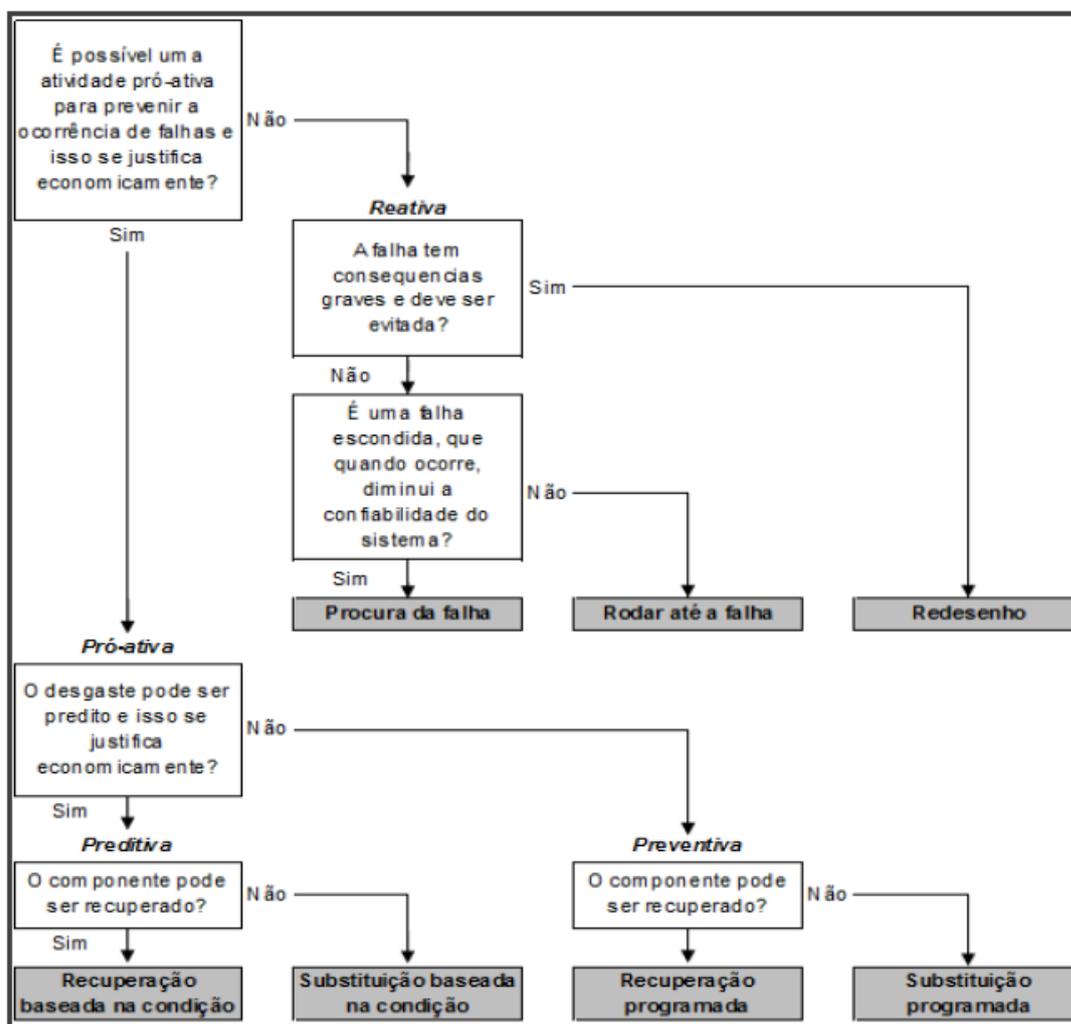


Fonte: <https://slideplayer.com.br/slide/2570044/> (2018)

Para responder às perguntas 6 e 7 que correspondem à identificação das atividades de manutenção recomendadas, discute-se com a equipe do MCC os modos de falhas identificados associando-os com as atividades de manutenção aplicáveis.

Nesta etapa identifica-se a melhor estratégia de manutenção a ser implementada conforme o modo de falha. Para tal, pode-se utilizar o fluxograma representado na Figura 7, que auxilia a escolha das técnicas de manutenção mais adequadas. Por fim, a questão 8, relativa à determinação das frequências das atividades de manutenção pode ser definida a partir do manual do fabricante do equipamento, experiência da equipe e histórico do sistema.

Figura 7 - Diagrama de decisão de manutenção



Fonte: Fogliatto & Ribeiro (2009)

3 ENERGIA EÓLICA

Conforme a BBC Brasil (2012), O Brasil é o décimo maior consumidor mundial de energia elétrica e, desde 2001, o consumo de eletricidade no país aumentou quase 38%, acima da média mundial, que foi de 30% no período. De acordo com um levantamento feito pela Empresa de pesquisa energética, o consumo no Brasil era de 463TWh em 2013 e passará para 1465TWh em 2050. Levando-se em consideração que os combustíveis fósseis estão em esgotamento e também a questão ambiental, visto que a queima de combustível fóssil aumenta o efeito estufa, esse aumento da demanda deverá ser suprido através de fontes de energias renováveis.

Segundo a Abeólica (2016), o Brasil tem capacidade para gerar cerca de 300GW de energia eólica e, no ranking mundial, passou de 13º colocado em capacidade instalada em 2011 para o 5º lugar em 2016. Isso mostra a preocupação do estado para suprir a demanda energética e também a entrada de investimentos privados na área. O país, hoje, possui cerca de 487 parques eólicos, sendo que 80% deles estão no nordeste, que contribuem com cerca de 2% da energia gerada.

A captação da energia dos ventos é feita por equipamentos denominados aerogeradores (Figura 8), que podem ser instalados isoladamente ou em parques ou fazendas eólicas que reúnem muitos deles. Os parques concentram geograficamente os aerogeradores, reduzindo o impacto visual causado por eles e possibilitam também o aproveitamento dos melhores ventos de determinada região.

As fazendas eólicas podem ser instaladas em terra, sendo chamadas de fazendas “*on shore*” ou em águas rasas, onde são chamadas de “*off shore*” (Figura 9). Segundo Pereira (2004), as vantagens de projetos “*off shore*” são os reduzidos problemas de visibilidade e ruídos, ventos constantes de alta velocidade que resultam em grande produção de energia. Contudo, a desvantagem é o aumento dos custos causado pela construção das fundações submersas e as grandes distâncias que devem ser cobertas pelos cabos de energia que conectam as fazendas eólicas ao sistema elétrico.

Figura 8 – Parque eólico onshore



Fonte: Instituto Fraunhofer (2018)

Ainda de acordo com Pereira (2004), o princípio de funcionamento de um aerogerador compreende dois processos de conversão, levados a termo pelos seguintes componentes: o rotor, que retira energia cinética do vento e a converte em conjugado mecânico e o gerador que converte o conjugado mecânico em eletricidade e alimenta a rede elétrica.

Figura 12 – Parque eólico offshore



Fonte: Fonte: Instituto Fraunhofer (2018)

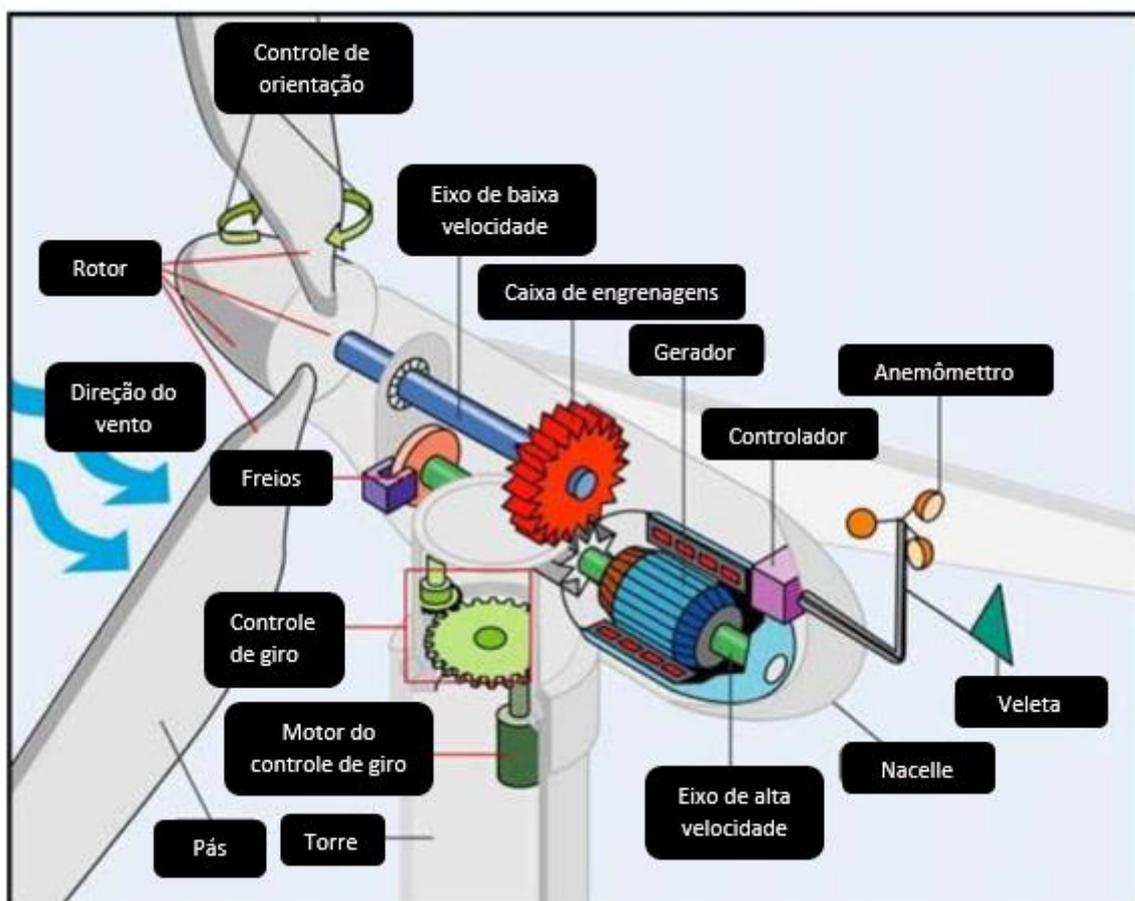
O aerogerador, que conforme já mencionado anteriormente, é o equipamento responsável por converter a energia cinética para elétrica e a Figura 10 representa seus principais componentes:

- Rotor: Conecta as pás do rotor ao eixo de baixa velocidade;
- Pás (“*Blades*”): Capturam a energia do vento que passa por ela e transfere para o rotor. Atualmente tem em torno de 23 a 63 metros de comprimento;
- Controle de orientação das pás (“*Pitch control*”): é feito movendo-se as aletas em cada pá aumentando ou diminuindo em poucos graus cada vez que o vento

mudar sua intensidade a fim de garantir o melhor ângulo para extração de potência para todas as velocidades do vento.

- Eixo de baixa velocidade (*“Low-speed shaft”*): Conecta o cone do rotor à caixa de engrenagens (*“gearbox”*) e gira entre 9 e 30 rpm.
- Freio (*“brake”*): limita a velocidade de rotação das pás em caso de ventos muito forte e também pode pará-las.
- Caixa de engrenagens (*“Gearbox”*): converte a baixa rotação e o alto conjugado do eixo de baixa rotação para alta velocidade e baixo conjugado no eixo de alta rotação, podendo assim ser usado pelo gerador elétrico para gerar energia. Em máquinas de 600 a 750kW a relação de engrenagens é de aproximadamente 1:50;
- Gerador elétrico (*“Generator”*): geralmente utiliza-se geradores de indução ou síncronos com potência entre 500kW a 2000kW podendo atingir até 4500kW;
- Sistema de controle (*“Controller”*): Contém um microprocessador que monitora continuamente as condições do aerogerador. Se houver alguma falha ele para a turbina eólica;
- Eixo de alta velocidade (*“High-speed shaft”*): Tem a função de acionar o gerador elétrico.
- Nacelle: Estrutura que encapsula os componentes do aerogerador incluindo a caixa de engrenagens e o gerador elétrico;
- Anemômetro (*“Anemometer”*): mede a velocidade do vento e é interligado ao controlador, que para o aerogerador quando a velocidade do vento está acima de 3,5m/s e o para quando está superior a 25m/s, visando preservar o sistema;
- Veleta (*“Wind vane”*): monitora a direção do vento, sendo seu sinal enviado para o controlador e usado para girar o aerogerador usando o controle de giro (*“Yaw control”*) para aproveitar melhor o vento;
- Controle de giro (*“Yaw control”*): Controlado pelo controlador com auxílio da veleta, utiliza motores elétricos para girar a nacelle contra o vento.
- Torre: é a estrutura metálica vertical, apoiada na fundação, que sustenta a nacelle e o rotor e tem cerca de 60m de altura. Como a velocidade do vento aumenta proporcionalmente à altura torna-se vantajoso ter torres altas.

Figura 10 - Componentes do aerogerador



Fonte: Adaptado de www.npee.joinville.br (2018)

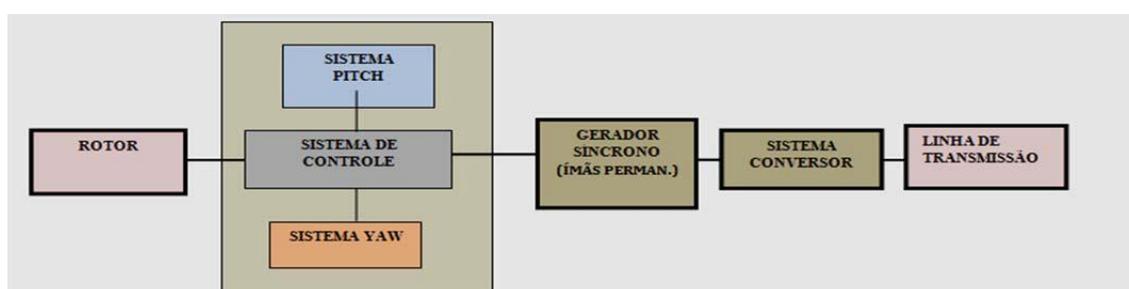
4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Tendo em vista que já foram abordados todos os conceitos necessários, esta etapa do trabalho focou no desenvolvimento de um plano de manutenção para um aerogerador seguindo a metodologia da manutenção centrada em confiabilidade.

As informações sobre as principais falhas e tipos de manutenções adequadas foram retiradas de artigos cujos autores tem vasta experiência na área de estudo e esses são: *“Reliability-Centered Maintenance for Wind Turbines Based on Statistical Analysis and Practical Experience”* dos autores Fischer, Besnard, & Bertling (2011), *“A survey of failures in wind turbine generator systems with focus on a wind farm in China”* de Bi, Qian, & Zhou (2014) e *“An FMEA-Based Risk Assessment Approach for Wind Turbine Systems: A Comparative Study of Onshore and Offshore”* de Shafiee & Dinmohammadi (2014).

Foi utilizado o método passo a passo descrito na Figura 6 para a criação do plano, sendo que, primeiramente, definiu-se a equipe que foi responsável pelo trabalho que, no caso, foi formada por 5 componentes cujo um deles foi o facilitador do FMECA. Posteriormente, foi feita a escolha do sistema, que foi o aerogerador, e subsistemas para a análise. Com o objetivo de simplificar o volume de informação para otimizar o entendimento os subsistemas foram limitados aos elementos da Figura 11, além da caixa de engrenagens e a dois modos de falha em cada.

Figura 11 – Diagrama de bloco de componentes de um aerogerador



Fonte: Castro & Vilela (2013)

Posteriormente à definição dos subsistemas, passou-se ao preenchimento da tabela do FMECA, a qual pode ser visualizada no Anexo II. O primeiro subsistema estudado foi a caixa de engrenagens cuja função é, como já mencionado anteriormente, converter baixa rotação e alto conjugado para alta rotação e baixo conjugado para assim gerar energia elétrica.

Quanto aos modos de falha desse componente, Fischer, Besnard, & Bertling (2011) afirmam que os mais comuns são a perda da transmissão de torque entre os eixos e também o aquecimento. Sendo que, neste o efeito causado é o aumento do ruído e baixa produtividade e naquele é a baixa produção energética. Já as causas usadas como raízes para a perda de torque foram o subdimensionamento dos componentes e a instalação mal executada, enquanto que para o aquecimento foram a falha no rolamento ou excesso ou falta de lubrificação.

Em seguida, foram estabelecidos os valores de criticidade, frequência e dificuldade de detecção cuja multiplicação resultou no NPR para cada causa raiz, como ilustrado pela Figura 12.

Figura 12 – Tabela do NPR da caixa de engrenagens

CAUSA	CRITICIDADE	FREQUÊNCIA (ocorrência)	DIFICULDADE (detecção)	NPR
Subdimensionamento de componentes	7	5	5	175
Instalação mal executada	7	5	5	175
Falha em Rolamento	3	1	3	9
Excesso ou falta de lubrificação	3	1	5	15

Fonte: Autor (2018)

Com essa informação em tela, pôde-se observar que as causas subdimensionamento e instalação mal executada tiveram um NPR alto e demandaram ações no plano de manutenção para reduzi-lo e diminuir o risco de falha. Enquanto que para a primeira causa a solução encontrada para mitigar a probabilidade de falha foi o reprojeto, na segunda foi o alinhamento do eixo anualmente, sendo essas ações de responsabilidade do Componente 1 do grupo. Como resultado, após a aplicação das ações foram estabelecidos novos números para o NPR (lembrando que a criticidade não muda) vide a Figura 13.

Figura 13 – Tabela do NPR da caixa de engrenagens após ações de manutenção

APÓS APLICAÇÃO DA MCC			
CRITICIDADE	FREQUÊNCIA (ocorrência)	DIFICULDADE (detecção)	NPR
7	1	5	35
7	1	5	35
3	1	1	3
3	1	3	9

Fonte: Autor (2018)

Assim, notou-se que as ações de manutenção tendem a baixar os valores de ocorrência e dificuldade de detecção, tendendo também a tornar o equipamento mais confiável. Seguindo o mesmo processo por hora apresentado, foi preenchida o restante da planilha do FMECA para os demais subsistemas previamente definidos, a qual pode ser detalhadamente lida no Anexo II desse artigo. Por fim, após o completo preenchimento desta, foi criado o plano de manutenção para o aerogerador e estabelecida a periodicidade das suas intervenções, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Plano de manutenção para um aerogerador

NOME DO SUBSISTEMA	AÇÃO	DIÁRIO	SEMESTRAL	ANUAL	BIENAL	4 ANOS	10 ANOS
Caixa de engrenagens	Reprojeto						
	Alinhamento do eixo			X			
	Monitoramento por análise de vibração		X				
	Plano de lubrificação com medição da pressão do óleo			X			
Sistema Pitch	Manutenção preventiva (subst. 10 anos)						X
	Troca de óleo a cada 4 anos					X	
	Rota de inspeção por equipe para buscar vazamentos		X				
	Instalação de medidores de pressão para verificar condição dos filtros			X			
Sistema de controle	Teste de continuidade			X			
	Análise de vibração e reapertos			X			
	Rota de inspeção por equipe e testes			X			
	Rota de inspeção por equipe e testes			X			
Sistema Yaw	Manutenção preventiva (subst. 10 anos)						X
	Troca de óleo a cada 4 anos					X	
	Rota de inspeção por equipe para buscar vazamentos		X				
	Instalação de medidores de pressão para verificar condição dos filtros			X			
Gerador	Manutenção preventiva			X			
	Monitoramento da temperatura em tempo real na sala de controle	X					
	Análise de vibração			X			
	Medição de continuidade e de isolamento no circuito				X		
Sistema elétrico	Análise de vibração e reapertos				X		
	Análise de vibração e teste de continuidade				X		
	Aplicação de proteção anti-ferrugem			X			
	Controle da temperatura	X					

Fonte: Autor (2018)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à área de energia eólica ser relativamente nova no Brasil existe uma escassez de dados e pesquisas sobre ela. Então, este trabalho teve como propósito sugerir, de forma objetiva, uma compreensão sobre os principais subsídios teóricos para uma nova aplicação para a MCC que foi criar um plano de manutenção para um aerogerador de energia eólica.

Para consecução deste objetivo, optou-se por uma descrição sequencial da MCC, FMECA, uma visão geral sobre energia eólica e a aplicação das técnicas para a criação do plano de manutenção periódica.

Observou-se que devido aos modos de falha recorrentes que ocorrem nos aerogeradores e que também, pela magnitude dos equipamentos cada intervenção demanda alto investimento e planejamento logístico. Logo, é plausível o investimento para executar a manutenção centrada em confiabilidade, visto que esta poderá auxiliar a reduzir os riscos de falhas que podem vir a ocorrer na operação de parques eólicos.

Espera-se que as informações aqui expostas possam contribuir para a aplicação da técnica às fazendas de aerogeradores.

RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE APPLIED TO WIND TURBINES

Maurício João Cruz Arcanjo dos Santos

Sérgio Oliveira Pitombo

ABSTRACT

This work aims to give an overview about the elements necessary for the creation of a maintenance plan centered on reliability in a wind power plant, and for this are used theoretical bases on MCC and also articles of research on the most common types of failures in this type of enterprise. The topics of corrective, preventive and predictive maintenance, maintenance centered on reliability (RCM), failure mode analysis diagram, its effects and criticality (FMECA), wind energy and wind turbines are addressed in order to create a maintenance plan. Finally, it was considered feasible to create a reliability-based maintenance plan to reduce the risk of wind farm operation.

Keywords: Wind energy, wind turbines, RCM, FMECA, maintenance

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade*. Rio de Janeiro, 1994.

BI, Ran, Kejun QIAN, and Chengke ZHOU. "A survey of failures in wind turbine generator systems with focus on a wind farm in China." 2014.

CASTRO, Daniel, and Omar VILELA. "AUMENTO DA EFICIÊNCIA OPERACIONAL DE GERADORES EÓLICOS ATRAVÉS DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E RISCO." CEFET-MG, 2013.

FISCHER, Katharina, François BESNARD, and Lina BERTLING. "Reliability-Centred Maintenance for Wind Turbines Based on Statistical Analysis and Practical Experience." *IEEE*, 2011: 1-12.

FLEMING, Paulo Victor, Mauricio SILVA, and Sandro FRANÇA. *Aplicando manutenção centrada em Confiabilidade (mcc) em indústrias Brasileiras: Lições aprendidas*. Salvador, 1999.

FOGLIATTO, F.S., and J.L.D. RIBEIRO. *Confiabilidade e Manutenção na Indústria*. São Paulo: Elsevier, 2009.

KARDEC, Alan, and Júlio Aquino NASCIF. *Manutenção: Função Estratégica*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de Confiabilidade, Manutenabilidade e Disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014.

MENDES, Angélica Alebrant. "Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa." *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*. 2011. <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/29050/000774312.pdf?...1> (accessed 01 10, 2016).

MOUBRAY, J. *Manutenção centrada em confiabilidade*. Aladon: Brasileira, 2000.
NASA. "Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment." NASA. 2000. <http://www.hq.nasa.gov/office/codej/codejx/Assets/Docs/RCMGuideMar2000.pdf> (accessed 01 2016, 10).

PEREIRA, Marcello Monticelli. "Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante." Juiz de Fora, Minas Gerais: Universidade Federal de Juiz de Fora, Outubro 2004.

QUEIROZ, Emerson Santos, Kleber HOLANDA, Mateus Carlos Ramos DOS SANTOS, and Pollyanna Luiza Martins BORGES. "Manutenção centrada em confiabilidade: Importante ferramenta para redução de custos e falhas." *Faculdade do Norte Capixaba de São Mateus*. 2013. <http://saomateus.multivix.edu.br/wp-content/uploads/2014/08/manutencao-centrada-em-confiabilidade.pdf> (accessed 01 2016, 10).

SAKURADA, Eduardo Yuji. "As técnicas de Análise do Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos." Florianópolis, Santa Catarina, 2001.

SHAFIEE, Mahmood, and Fateme DINMOHAMMADI. "An FMEA-Based Risk Assessment Approach for Wind Turbine Systems: A Comparative Study of Onshore and Offshore." *Energies*, 2014.

SIQUEIRA, Iony Patriota. *Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

ANEXO I

ANEXO II