



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL FELIPE DA SILVA GOMES

Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) aplicada à turbinas eólicas: uma revisão
sistemática da literatura

Cabo de Santo Agostinho – PE

2024

RAFAEL FELIPE DA SILVA GOMES

Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) aplicada à turbinas eólicas: uma revisão sistemática da literatura

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Araujo Simões.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Ana Catarina Macêdo – CRB-4 1781

G633m Gomes, Rafael Felipe da Silva.
Manutenção centrada em confiabilidade (MCC)
aplicada à turbinas eólicas: uma revisão sistemática da
literatura / Rafael Felipe da Silva Gomes. – Cabo de Santo
Agostinho, 2024.
55 f.; il.

Orientador(a): Thiago Araujo Simões.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade
Acadêmica Cabo de Santo Agostinho - UACSA,
Bacharelado em Engenharia Mecânica, Cabo de Santo
Agostinho, BR-PE, 2024.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Confiabilidade (Engenharia). 2. Turbinas. 3.
Máquinas - Manutenção e reparos. 4. Energia eólica I.
Simões, Thiago Araujo, orient. II. Título

CDD 620.1

RAFAEL FELIPE DA SILVA GOMES

Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) aplicada à turbinas eólicas: uma revisão sistemática da literatura

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 25/09/2024

BANCA EXAMINADORA

Orientador. Prof. Dr. Thiago Araujo Simões
UFRPE - UACSA

Prof. Dr. Aureliano Xavier dos Santos
UFRPE – UACSA

Dr. Vinícius Dias Silva
USP

AGRADECIMENTOS

Gostaria, antes de tudo, agradecer a oportunidade de ter estudado nessa excelente universidade, a qual me proporcionou grandes desafios e momentos únicos, de muito aprendizado e crescimento pessoal e profissional.

Me sinto privilegiado em ter aprendido com professores tão qualificados que, ao longo de todos esses anos, não apenas transmitiram conhecimentos valiosos, mas também me inspiraram com sua paixão pelo ensino e pela engenharia. Alguns foram verdadeiros mentores nessa jornada. Quero deixar um agradecimento especial ao meu orientador por ter aceitado me direcionar neste trabalho e ter fornecido insights valiosos para conseguir concluí-lo.

Aos meus colegas de curso, que compartilharam comigo essa caminhada, os desafios, as longas horas de estudo na biblioteca e acima de tudo as conquistas, meu sincero agradecimento. A troca de experiências, o apoio mútuo e a amizade que construímos foram fundamentais, sem dúvidas aprendi muito com todos vocês.

Por fim, não poderia deixar de agradecer aos meus familiares, especialmente aos meus pais, por todo o amor, compreensão e incentivo incondicional. Obrigado por nunca me deixarem desanimar. Por vocês, todo esforço vale a pena.

RESUMO

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver uma análise detalhada da evolução das estratégias de aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) em aerogeradores, através de uma revisão sistemática da literatura científica publicada entre 2006 e 2024. Foram analisados artigos indexados na plataforma Scopus, selecionando-se os 10 artigos mais citados nesse período. Os resultados indicam que a MCC é amplamente utilizada em diversos componentes das turbinas eólicas, como o gerador, a caixa de engrenagens e o sistema de controle. As falhas identificadas nesses componentes estão frequentemente relacionadas ao desgaste mecânico, falhas de lubrificação e problemas elétricos. A revisão também evidenciou a importância de implementar sistemas de monitoramento contínuo, que permitem a detecção precoce de falhas, além de técnicas de manutenção preditiva. Esses métodos são mencionados de forma recorrente como formas eficientes de aumentar tanto a confiabilidade quanto a disponibilidade das turbinas eólicas, reduzindo custos operacionais e o tempo de inatividade.

Palavras-chave: manutenção centrada em confiabilidade; falhas de turbinas eólicas; componentes críticos da turbina; scopus.

ABSTRACT

The main objective of this work is to develop a detailed analysis of the evolution of Reliability-Centered Maintenance (RCM) strategies in wind turbines, through a systematic review of the scientific literature published between 2006 and 2024. Articles indexed on the Scopus platform were analyzed, selecting the 10 most cited during this period. The results indicate that RCM is widely applied to various components of wind turbines, such as the generator, gearbox, and control system. Failures identified in these components are often related to mechanical wear, lubrication failures, and electrical problems. The review also highlighted the importance of implementing continuous monitoring systems, which allow for early failure detection, as well as predictive maintenance techniques. These methods are consistently mentioned as efficient ways to increase both the reliability and availability of wind turbines, reducing operational costs and downtime.

Keywords: reliability-centered maintenance; wind turbine failures; critical turbine components; scopus.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Evolução do tamanho das turbinas na última década | 12 |
| Figura 2: Gráfico lucro versus disponibilidade | 13 |
| Figura 3: Evolução dos processos de manutenção | 16 |
| Figura 4: Curva da banheira..... | 17 |
| Figura 5: Curva P-F..... | 19 |
| Figura 6: Fluxograma de aplicação da MCC | 21 |
| Figura 7: Esquema de componentes de uma turbina tradicional..... | 24 |
| Figura 8: Passos para análise do desempenho dos equipamentos de uma turbina..... | 26 |
| Figura 9: Taxa de falhas dos sistemas de uma turbina | 26 |
| Figura 10: Tempo de falha dos equipamentos onshore e offshore..... | 27 |
| Figura 11: Esquema da nacelle de uma turbina convencional. | 28 |
| Figura 12: Caixa multiplicadora de uma turbina eólica | 29 |
| Figura 13: Esquema de seleção dos artigos. | 31 |
| Figura 14: Classificação dos documentos encontrados por tipo..... | 32 |
| Figura 15: Classificação dos documentos por área | 33 |
| Figura 16: Documentos versus ano de publicação..... | 34 |
| Figura 17: Ranking de países versus número de publicações. | 35 |
| Figura 18: Número de publicações por autores..... | 36 |
| Figura 19: Diagrama de rede representando os autores mais citados em trabalhos..... | 37 |
| Figura 20: Diagrama de rede dos autores com artigos mais citados..... | 38 |
| Figura 21: Diagrama de rede representando palavras-chave mais utilizadas nos artigos. | 39 |
| Figura 22: Equipamentos mais citados nos artigos. | 48 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 14 |
| 1.1.1 | Objetivo principal..... | 14 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 14 |
| 2 | JUSTIFICATIVA | 14 |
| 3 | MANUTENÇÃO | 15 |
| 3.1 | MANUTENÇÃO CORRETIVA..... | 17 |
| 3.2 | MANUTENÇÃO PREVENTIVA | 18 |
| 3.3 | MANUTENÇÃO PREDITIVA..... | 18 |
| 3.4 | MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL (MPT)..... | 19 |
| 3.5 | MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE | 20 |
| 3.5.1 | Diferenças entre MCC e manutenção tradicional..... | 22 |
| 4 | TURBINAS EÓLICAS | 23 |
| 5 | FALHAS EM AEROGERADORES | 25 |
| 5.1 | FALHAS DE COMPONENTES ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS | 27 |
| 5.2 | FALHAS MECÂNICAS..... | 29 |
| 6 | METODOLOGIA | 30 |
| 7 | REVISÃO SISTEMÁTICA | 32 |
| 7.1 | EVOLUÇÃO DO TEMA NOS ÚLTIMOS 18 ANOS | 33 |
| 7.2 | PAÍSES QUE MAIS PUBLICARAM SOBRE O TEMA | 35 |
| 7.3 | ANÁLISE DOS AUTORES | 36 |
| 7.4 | ANÁLISE NO VOSViwer®..... | 36 |
| 7.5 | ANÁLISE DOS ARTIGOS MAIS CITADOS (Scopus) | 39 |
| 8 | ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS..... | 48 |
| 9 | CONCLUSÃO | 49 |

| | | |
|----|---|-----------|
| 10 | TRABALHOS FUTUROS | 50 |
| | REFERÊNCIAS..... | 52 |
| | APÊNDICE A – PASSO À PASSO DA SELEÇÃO DOS ARTIGOS | 56 |

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é uma tecnologia estabelecida e desenvolvida, com uma ampla cadeia de fornecimento global. Nos últimos cinco anos, essa tecnologia avançou para aumentar a produção de eletricidade por megawatt de capacidade instalada, possibilitando o uso em locais com menores velocidades de vento. As turbinas eólicas terrestres cresceram em tamanho, com cubos mais altos e rotores de maior diâmetro. Paralelamente, quando olhamos para o contexto offshore, é possível avistarmos um alto potencial de crescimento nos próximos anos - à medida que a instalação de turbinas no mar aproveita ventos mais intensos. (IEA, 2023).

Nos últimos anos, a energia eólica produzida em instalações no mar tem experimentado um crescimento significativo e atraído investimentos, consolidando essa tecnologia como uma base sólida para um futuro sustentável. A busca incessante por aprimorar os processos de geração e armazenamento dessa energia, tornando-os mais eficientes e ecológicos, tem sido direcionada para promover o bem-estar coletivo em todas as fases operacionais (geração, armazenamento, transmissão, distribuição, gestão e uso final). (ABEE , 2020)

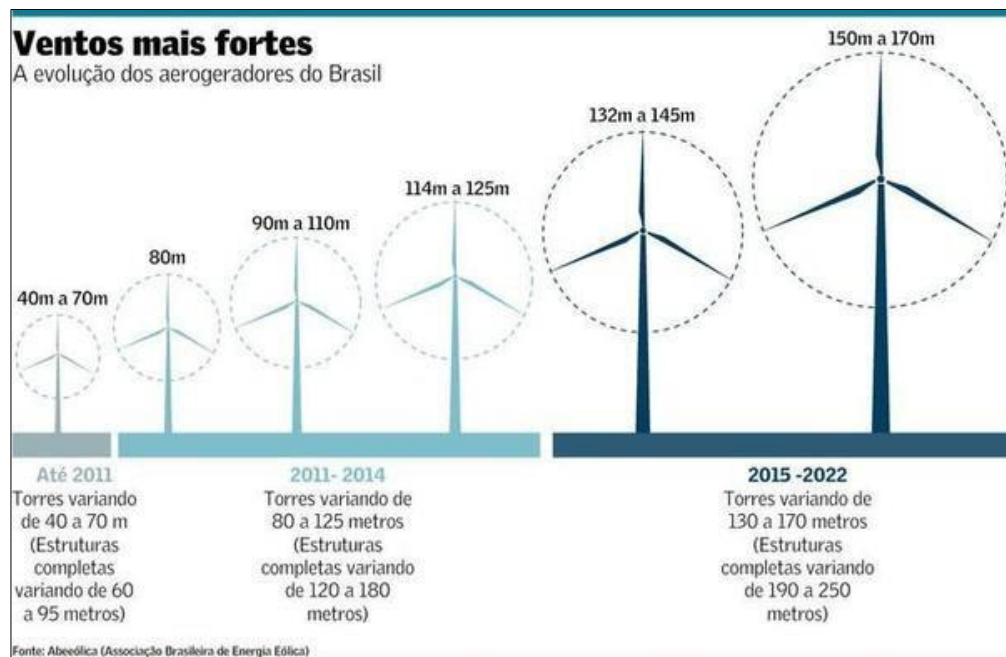
De acordo com Brandão (2011), as centrais eólicas normalmente são afastadas dos grandes centros urbanos, e, conseqüentemente, a locomoção para fazer qualquer tipo de manutenção em uma usina já instalada pede grandes custos, o que é um problema pois sabemos que a geração de energia por meio de parques eólicos busca a maximização do lucro das empresas envolvidas. E para que essa maximização seja alcançada, é essencial contar com sistemas confiáveis, que tenham uma baixa taxa de falhas e, conseqüentemente, altas taxas de operação.

No ano de 2021, Cevalco, Koujoura e Kolios conduziram uma análise utilizando dados de 24 bancos de dados sobre confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade de aerogeradores. Alguns dos principais achados de seus estudos incluem a observação de que, de maneira geral, a confiabilidade das turbinas tende a diminuir à medida que seu tamanho aumenta, enquanto a disponibilidade de uma central eólica cresce conforme o número de turbinas instaladas. Eles também identificaram que o aumento do tamanho das turbinas está associado à redução de falhas em componentes como o rotor, eixo e sistemas do gerador, mas ao mesmo tempo, há um aumento nas falhas nos sistemas de controle, transmissão e de pitch. Além disso, foi observado que certas condições

climáticas, como ventos mais fortes, altos níveis de turbulência e elevada umidade, estão relacionadas a uma maior ocorrência de falhas (Cevasco, Koujoura, Kolios, 2021).

Na figura 1 é possível observamos a evolução do tamanho das turbinas do Brasil nos últimos anos, por exemplo.

Figura 1: Evolução do tamanho das turbinas na última década

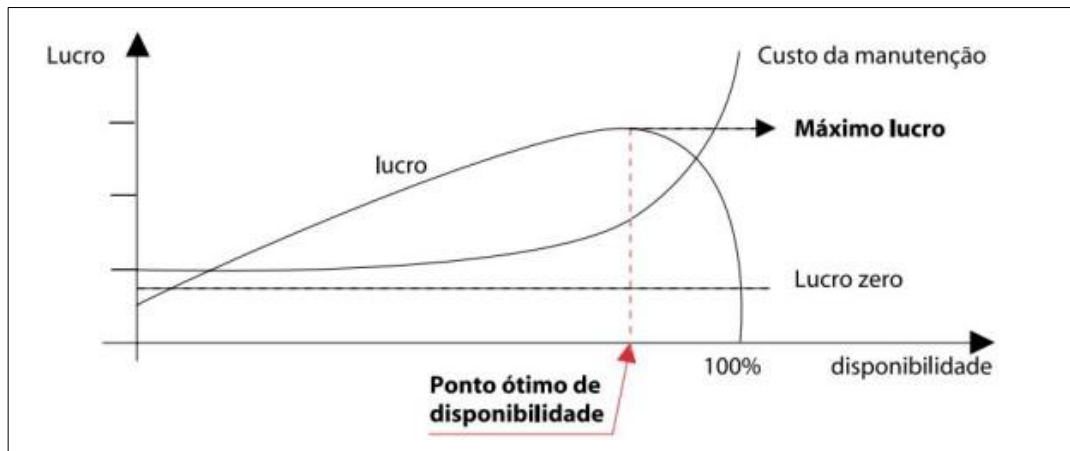


Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica, 2023.

Pensando nesta constante evolução dos projetos de aerogeradores impulsionado pelo crescimento do setor eólico mundialmente, a questão da confiabilidade de operação das turbinas torna-se fundamental. Azeredo (2023), nos traz que a confiabilidade dos aerogeradores é crucial para a disponibilidade dos equipamentos e sistemas, influenciando diretamente a produção da central eólica e o custo da energia gerada. Ao passo que, confiabilidade implica menos falhas, maior disponibilidade e aumento de receita, enquanto menor confiabilidade resulta em mais falhas, custos de manutenção mais elevados e redução da receita, atingir um alto grau de confiabilidade de operação das turbinas é imprescindível para o lucro das organizações.

Na figura 2 podemos observar um gráfico que ilustra o lucro *versus* a disponibilidade de um equipamento, exaltando a necessidade de se encontrar um ponto ótimo de disponibilidade para que a lucratividade não seja afetada com as paradas de operação das turbinas.

Figura 2: Gráfico lucro versus disponibilidade



Fonte: Junior, Ribeiro e Franco, 2015.

De acordo com Brandão (2011), estima-se que uma turbina com 20 anos de operação em uma instalação onshore, por exemplo, tenha custos de operação e manutenção equivalentes a cerca de 10 a 15% de sua capacidade produtiva. Considerando que os custos de operação e manutenção em instalações eólicas são elevados, os sistemas de monitoramento de condição dos ativos tornam-se ferramentas indispensáveis nesse tipo de instalação e métodos de manutenção mais confiáveis e eficientes se fazem necessários.

Nesse contexto, a Manutenção Centrada em Confiabilidade surge como uma metodologia que auxilia na priorização desses esforços, com o objetivo de garantir que os ativos desempenhem suas funções essenciais, levando em conta o ambiente e o processo nos quais estão inseridos. (Lima Junior; Rodrigues, 2022).

A Manutenção Centrada na Confiabilidade é um método utilizado para determinar o que deve ser feito para garantir que qualquer item físico continue a desempenhar suas funções desejadas dentro do contexto operacional em que se encontra. Nesse processo, diversas ferramentas podem ser aplicadas, inicialmente para quantificar custos relevantes e o número de falhas, e, posteriormente, para resolver os problemas de forma eficaz. Entre essas ferramentas estão a FMEA (Análise dos Modos e Efeitos de Falhas), a RCFA (Análise de Causas Raiz de Falhas) e o MASP (Método de Análise e Solução de Problemas). (Lima, 2013).

Para melhor elucidar a importância desta ferramenta de manutenção em turbinas modernas, neste trabalho, iremos desenvolver uma Revisão Sistemática de artigos relevantes sobre o tema, através da base de dados Scopus, com o objetivo de explicitar as

estratégias de manutenção das turbinas mais consolidadas, e quais os impactos dessas estratégias para as organizações como um todo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O principal objetivo da pesquisa é desenvolver uma revisão sistemática sobre as metodologias de manutenção aplicadas a turbinas eólicas, com foco na Manutenção Centrada na Confiabilidade, a fim de investigar as técnicas de manutenção mais utilizadas em diferentes contextos operacionais das turbinas.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos estão divididos por:

- Identificar os artigos mais relevantes sobre o tema;
- Visualizar os equipamentos mais relevantes na manutenção das turbinas;
- Analisar os diferentes contextos operacionais de cada estudo;
- Relatar os resultados dos estudos e compará-los.

2 JUSTIFICATIVA

A energia eólica é uma fonte de energia renovável crucial para a diversificação da matriz energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a eficiência e a viabilidade econômica dos parques eólicos dependem fortemente da confiabilidade e disponibilidade dos aerogeradores. A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) surge como uma ferramenta essencial para aumentar a confiabilidade dos sistemas, reduzindo falhas inesperadas, otimizando custos de manutenção e prolongando a vida útil dos equipamentos.

Diante do crescimento constante do setor eólico e os diversos desafios operacionais enfrentados pelas turbinas, a aplicação de MCC é vital para garantir operações seguras e eficientes. Esta pesquisa se justifica pela necessidade de uma revisão sistemática da literatura para identificar as práticas de MCC mais adotadas e as principais diretrizes para se alcançar um plano de manutenção eficiente. A pesquisa será realizada através de uma

base de dados consolidada, a Scopus, visando selecionar os trabalhos recentes e consolidados sobre MCC aplicada à aerogeradores, avaliando a qualidade dos estudos, extraindo dados e sintetizando resultados. A análise dos artigos mais citados entre 2006 e 2024 na plataforma permitirá quantificar os benefícios econômicos da metodologia e identificar áreas de melhoria.

Além disso, o uso de ferramentas como o VOSviewer® para análise bibliométrica facilitará a visualização das tendências de pesquisa, redes de coautoria e temas emergentes, contribuindo para uma compreensão aprofundada do contexto atual e das futuras direções de pesquisa na área.

Em resumo, esta pesquisa visa destacar os resultados mais relevantes sobre as práticas de manutenção associadas à aerogeradores, identificando possíveis lacunas na literatura e oferecendo recomendações práticas que possam ser aplicadas na indústria eólica, promovendo avanços no conhecimento e um melhor entendimento dos resultados de uma aplicação da MCC na indústria.

3 MANUTENÇÃO

De acordo com Fonseca, Gregório, Santos e Prata (2018), manutenção refere-se a um conjunto de atividades técnicas e de gestão destinadas a preservar ou restaurar um objeto para um estado em que possa realizar as funções necessárias. Essas funções essenciais são aquelas requeridas para executar uma determinada ação.

Assim como as máquinas, as ferramentas, os materiais e a tecnologia evoluíram desde o surgimento da mecanização, industrialização e automatização. A manutenção, por sua vez, também evoluiu no que se refere aos procedimentos práticos de montagem, desmontagem, substituição de peças e alinhamento. Também avançou na Administração da Manutenção e no desenvolvimento de tipos de manutenção que atendessem a cada necessidade industrial (Almeida, 2015).

Nesse contexto, ao longo dos anos, as técnicas de manutenção evoluíram segundo as necessidades de cada período da indústria compreendendo diferentes gerações da manutenção, onde cada uma buscou priorizar técnicas que otimizassem a produção e priorizassem a segurança operacional e ambiental das instalações com base nos conhecimentos adquiridos ao longo dos anos acerca do tema.

A figura 3 mostra a evolução da manutenção de acordo com cada geração da indústria.

Figura 3: Evolução dos processos de manutenção.



Fonte: Moubray, 1999.

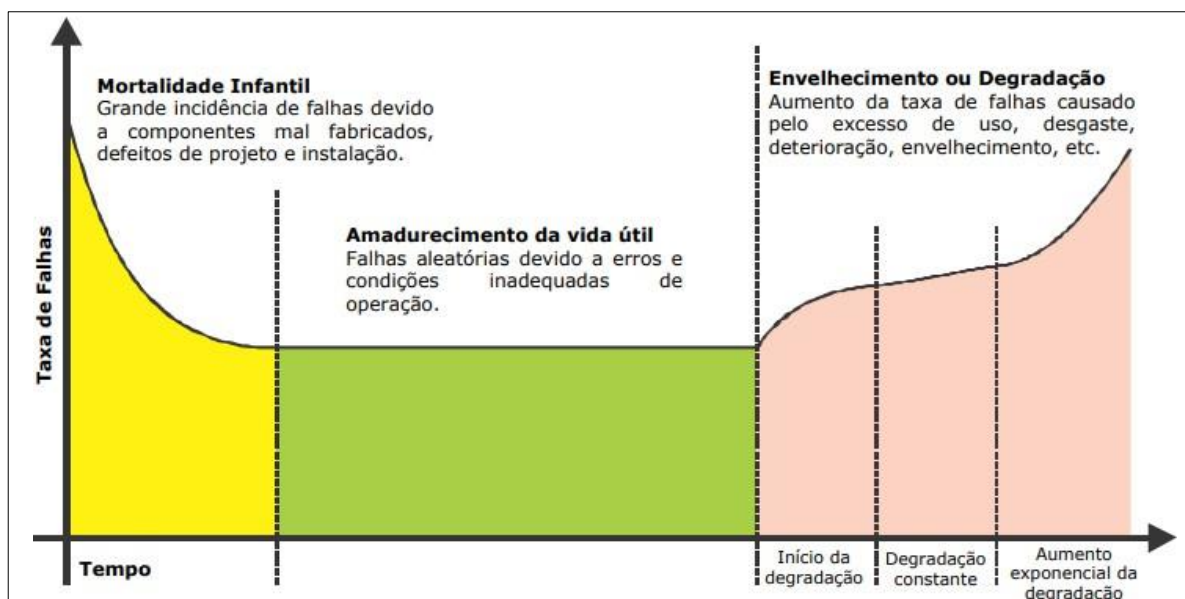
A primeira geração estende-se aproximadamente de 1940 a 1950, com o final da segunda guerra mundial. Neste período, a mecanização da indústria era ainda incipiente, utilizando equipamentos simples e sobredimensionados para as funções onde eram aplicados. Em consequência, a sociedade da época pouco dependia de seu desempenho, exigindo apenas que fossem restaurados quando apresentassem defeitos, os quais eram minimizados pelo sobredimensionamento. A atividade de manutenção, na forma planejada, praticamente inexistia, limitando-se a tarefas preventivas de serviço, tais como limpeza e lubrificação de máquinas, e tarefas corretivas para reparação de falhas. (Siqueira, 2014).

No que tange a segunda geração, Moubray (1999), traz que, as demandas durante o período de guerra (primeira geração), impulsionaram a necessidade de uma variedade de produtos, enquanto a disponibilidade de mão de obra industrial diminuiu drasticamente. Isso resultou em um aumento da mecanização, levando ao desenvolvimento de máquinas de diversos tipos. Como resultado, as indústrias passaram a depender quase exclusivamente dessas máquinas. Com essa crescente dependência, a minimização do tempo de inatividade tornou-se uma preocupação central para os engenheiros, levando ao surgimento das primeiras ideias sobre manutenção preventiva.

Neste mesmo período acreditava-se que todo item apresentava inicialmente uma taxa de falhas decrescente que posteriormente se estabilizava-se vindo a aumentar apenas no final da vida útil do item. (Moubray, 1999).

A figura 4 representa um gráfico conhecido como curva da banheira que ilustra essa teoria.

Figura 4: Curva da banheira



Fonte: Baran, 2011.

Sob a ótica de Siqueira (2014), a partir dos anos 70, houve uma aceleração significativa no processo de transformação das indústrias. A interrupção da produção tornou-se uma preocupação generalizada devido ao seu impacto na capacidade produtiva, aumento dos custos e consequências na qualidade dos produtos.

Esse problema foi agravado na manufatura devido à tendência global de adotar sistemas just-in-time, nos quais estoques mínimos significavam que mesmo pequenas interrupções na produção ou entrega poderiam paralisar toda a fábrica. As falhas agora também têm implicações sérias em termos de segurança e meio ambiente, especialmente considerando os crescentes padrões de exigência nessas áreas. Em algumas regiões do mundo, as empresas devem atender às expectativas de segurança e preservação ambiental ou enfrentam o risco de serem impedidas de operar. (Moubay, 1999).

Na Terceira Geração, o conceito de manutenção preditiva foi reforçado. Tornou-se mais evidente a interação entre as fases de implementação de um sistema (projeto, fabricação, instalação e manutenção) e a disponibilidade/confiabilidade. (Gurski, 2002)

3.1 MANUTENÇÃO CORRETIVA

Segundo Mishawka e Olmedo (1993), este é o procedimento realizado depois que a avaria já ocorreu. Esse tipo de manutenção é resultado da falta de planejamento e também

da inevitabilidade de algumas situações. O ideal é que seja aplicado apenas em equipamentos de menor relevância na produção, nos quais os custos anuais estimados de reparo e as falhas imprevistas sejam considerados aceitáveis.

3.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

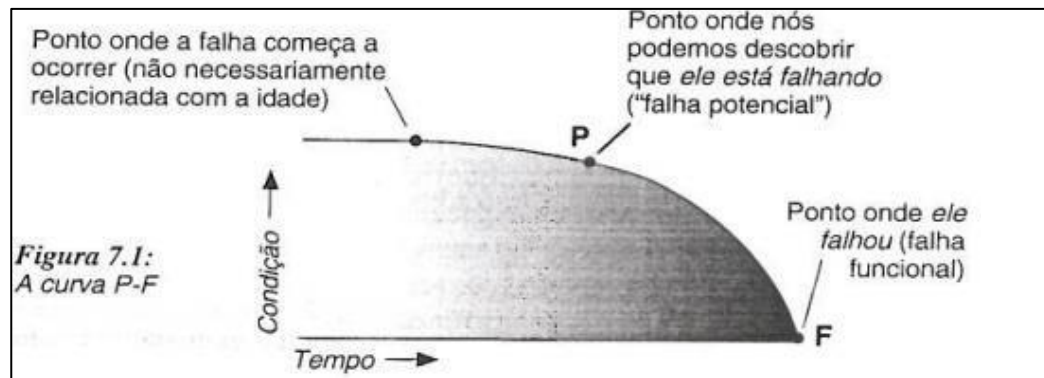
Esta modalidade de manutenção é realizada em intervalos regulares de tempo de vida. A frequência pode ser determinada por um ou vários indicadores de desempenho, como horas de operação, quantidade de peças produzidas, distância percorrida, entre outros. Geralmente é empregada em atividades de lubrificação, inspeções regulares obrigatórias e troca de componentes de baixo custo. As vantagens dessa abordagem incluem a previsibilidade dos custos de cada intervenção e a programação das paradas na produção. (Araújo, 2022).

3.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA

Esse tipo de manutenção baseia-se em inspeções periódicas nas quais fenômenos como temperatura, vibração, ruídos excessivos, etc. são observados através de instrumentos específicos. Essa análise permite a observação das reais condições do equipamento e o acompanhamento da evolução de um defeito, possibilitando o planejamento em curto prazo para uma intervenção de manutenção para troca de peças e a eliminação de tal defeito. Permite também indicar o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos, e as condições para que esse tempo de vida útil seja bem aproveitado. (Almeida, 2015).

A figura 5 ilustra o que acontece no estágio final da falha de um item através da chamada curva P-F. De acordo com Moubray (1999), a curva mostra como o item se deteriora até um ponto “P” e, se a potencial falha não for detectada e corrigida, continua a se deteriorar de forma acelerada, até atingir o ponto de falha funcional “F”.

Figura 5: Curva P-F.



Fonte: Moubray,1999.

3.4 MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL (MPT)

De acordo com Gregório, Santos e Prata (2018), trata-se de uma filosofia de surgimento relativamente recente na indústria, onde a equipe de manutenção busca estreitar cada vez mais a relação do operador com equipamento, sendo ele o primeiro a detectar alterações no funcionamento normal do equipamento.

A MTP pode ser descrita como um modelo de gestão focado na melhoria contínua do sistema produtivo por meio da eliminação de perdas, redução de paradas na produção e fortalecimento do relacionamento entre o operador e o equipamento. Segundo Kardec e Nascif (2002), a origem da TPM remonta a cerca de 1951, quando a Manutenção Preventiva, inicialmente desenvolvida nos Estados Unidos, foi introduzida no Japão pela empresa Nippon Denso KK, parte do Grupo Toyota. Antes disso, a indústria japonesa utilizava principalmente a manutenção corretiva, realizada apenas após a falha de máquinas ou equipamentos, o que gerava custos elevados e dificultava a melhoria da qualidade na produção. (Resende; Dias, 2014)

Na visão de Gregório, Santos e Prata (2018), a filosofia da MPT envolve um programa de capacitação para os operadores, que passam a participar do monitoramento da máquina durante suas atividades (prática de manutenção preditiva) e realizam tarefas de manutenção que não requerem grande expertise, como a substituição de filtros de óleo (prática de manutenção preventiva).

Os operadores assumem responsabilidades mais simples de manutenção, como limpeza, lubrificação, ajustes, substituição de lâmpadas e filtros, entre outras. Isso promove uma relação mais próxima entre o operador e o equipamento, criando um senso de "propriedade". Enquanto isso, os engenheiros se dedicam ao planejamento, projeto e

desenvolvimento de equipamentos que demandem menos manutenção, incluindo tarefas na área da mecatrônica (mecânica, elétrica, automação, etc).

3.5 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

Em seu trabalho, Lima (2013) afirma que a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) é um método empregado para determinar quais ações são necessárias para garantir que um item físico continue desempenhando suas funções pretendidas dentro de seu ambiente operacional atual. Durante esse processo, várias ferramentas podem ser empregadas. Inicialmente, essas ferramentas são utilizadas para quantificar custos significativos e a frequência de falhas. Em seguida, são aplicadas para resolver eficazmente os problemas identificados, incluindo técnicas como FMEA (Análise do Modo e Efeito de Falha), RCFA (Análise das Causas Raízes da Falha) e MASP (Método de Análise e Solução de Problemas).

A MCC pode ser entendida como um programa que integra diversas técnicas de engenharia para garantir que os equipamentos de uma planta industrial continuem desempenhando as funções para as quais foram projetados. Devido à sua abordagem lógica e sistemática, os programas de MCC são amplamente reconhecidos como a maneira mais eficaz de lidar com as questões de manutenção. Esses programas permitem que as empresas alcancem excelência nas atividades de manutenção, aumentando a disponibilidade dos equipamentos e reduzindo os custos relacionados a acidentes, defeitos, reparos e substituições. (Fogliatto; Ribeiro, 2009)

Para entender melhor os objetivos da MCC, convém conhecer bem o conceito de confiabilidade. A ABNT, por sua vez, define confiabilidade como: “Característica de um item eventualmente expressa pela probabilidade de que ela preencherá uma função dada, sob condições definidas e por um período de tempo definido”. (ABNT, 1994, p.7). Desta maneira, busca-se suprir a necessidade das indústrias em conhecer e controlar a vida útil de seus produtos, reduzindo custos sem o comprometimento da qualidade, da segurança ou da disponibilidade destes. Procura-se obter a garantia de que o produto exercerá sua função no período determinado de tempo com um mínimo de falhas. (Lima, 2013)

Segundo Moubray (1999), os programas de MCC devem abordar sete questões fundamentais:

1. Quais são as funções e os padrões de desempenho esperados para os equipamentos industriais?

2. De que maneiras os equipamentos podem falhar em cumprir essas funções?
3. Quais são as causas de cada falha funcional?
4. O que acontece quando cada falha ocorre?
5. Por que cada falha é relevante?
6. O que pode ser feito para prevenir ou evitar cada falha?
7. O que deve ser feito quando não é possível estabelecer uma atividade proativa adequada?

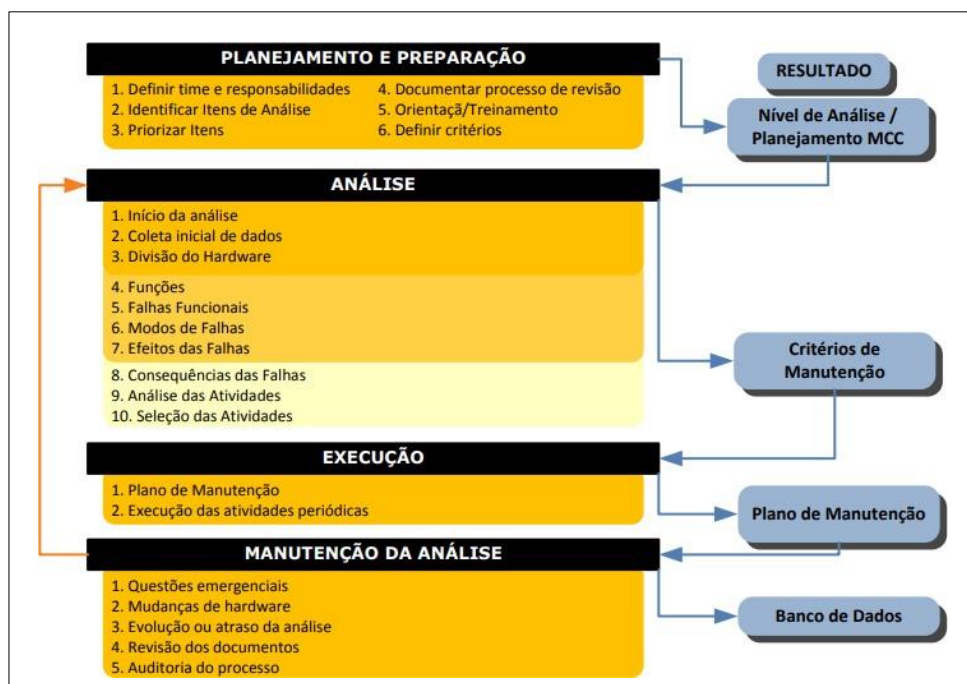
Alguns autores também destacam uma questão adicional que é

8. Qual a frequência ideal para as tarefas?

Sendo assim, Lima Junior e Rodrigues (2022) são enfáticos ao afirmarem que durante as etapas de implementação da MCC, inevitavelmente, surgem questões como: quais falhas devem ser tratadas com prioridade? Quais são as ações de manutenção mais apropriadas?. Dito isto, a Manutenção Centrada na Confiabilidade é uma metodologia que auxilia na priorização dessas ações, garantindo que os ativos possam desempenhar suas funções essenciais, levando em conta o ambiente e o processo em que estão inseridos.

Na figura 6 é ilustrado um fluxograma das etapas de aplicação da MCC.

Figura 6: Fluxograma de aplicação da MCC.



Fonte: Baran, 2011.

3.5.1 DIFERENÇAS ENTRE MCC E MANUTENÇÃO TRADICIONAL

A principal diferença entre a manutenção tradicional e a MCC está na abordagem. A manutenção tradicional é menos personalizada, seguindo intervalos fixos ou corrigindo falhas após sua ocorrência, sem considerar a criticidade dos componentes. Já a MCC possui uma abordagem estratégica, focando na confiabilidade e prevenção de falhas críticas, com planos de manutenção customizados baseados em análises detalhadas. Além disso, a MCC é dinâmica, revisada continuamente, enquanto a manutenção tradicional é mais reativa e menos flexível (Siqueira, 2009).

Baran (2011) destaca que, além de introduzir novos conceitos, a Manutenção Centrada na Confiabilidade traz uma nova perspectiva para a manutenção, diferenciando-se do modelo tradicional ao basear suas ações em novos objetivos. O Quadro 1 ilustra as principais expectativas de manutenção tanto na MCC quanto no modelo tradicional.

Quadro 1: Diferenças entre MCC e a manutenção tradicional.

| Características | Manutenção Tradicional | MCC |
|------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Foco | Equipamento | Função |
| Objetivo | Manter o Equipamento | Preservar a função |
| Atuação | Componente | Sistema |
| Atividades | O que pode ser feito | O que deve ser feito |
| Dados | Pouca ênfase | Muita ênfase |
| Documentação | Reduzida | Obrigatória e Sistemática |
| Metodologia | Empírica | Estruturada |
| Combate | Falhas | Consequências das Falhas |
| Normalização | Não | Sim |
| Priorização | Inexistente | Por Função |

Fonte: Baran, 2011.

Em seu livro, Siqueira (2005) afirma que na MCC, a documentação auditada é fundamental, pois garante a rastreabilidade e a transparência de todas as decisões tomadas durante o processo de manutenção, permitindo uma análise detalhada e justificada das estratégias adotadas. Isso contrasta com a manutenção tradicional, onde a documentação pode ser menos rigorosa e detalhada, dificultando a identificação de falhas

no processo ou a revisão de estratégias de manutenção.

A documentação auditada na MCC também facilita melhorias contínuas, fornecendo um histórico claro de ações e resultados, além de ser essencial para garantir conformidade com normas e regulamentações, algo que a manutenção tradicional nem sempre prioriza com a mesma ênfase.

4 TURBINAS EÓLICAS

As máquinas eólicas modernas são referidas como turbinas eólicas, sistemas de conversão de energia eólica ou aerogeradores para distingui-las das máquinas tradicionais. Em grande parte, os modernos aerogeradores são equipamentos utilizados para gerar eletricidade. Variam desde pequenos aerogeradores para produzir potências na ordem de dezenas ou centenas de kW, utilizadas principalmente em áreas rurais, até aerogeradores considerados de grande porte, que produzem potências na ordem de alguns MW e que normalmente estão interconectadas à rede elétrica. (Fadigas, 2011).

A evolução das turbinas eólicas modernas representa um avanço significativo na engenharia. Embora diversos caminhos tenham sido explorados para alcançar o design ideal de uma turbina, houve uma convergência, resultando na predominância de turbinas de eixo horizontal com três pás igualmente espaçadas.

Nessas turbinas, as pás estão conectadas a um rotor, que transmite a potência para o gerador através de uma caixa de engrenagens, ambos localizados dentro de uma estrutura chamada nacelle. Algumas turbinas optam por uma configuração sem caixa de engrenagens, utilizando uma unidade de conexão direta. A caixa de engrenagens pode representar até 25% do custo total de uma turbina eólica, antes da instalação, o que torna sua escolha crucial. A eletricidade gerada é então transmitida pela torre até o transformador e, posteriormente, ao ponto de conexão com a rede elétrica. (Pinto, 2013).

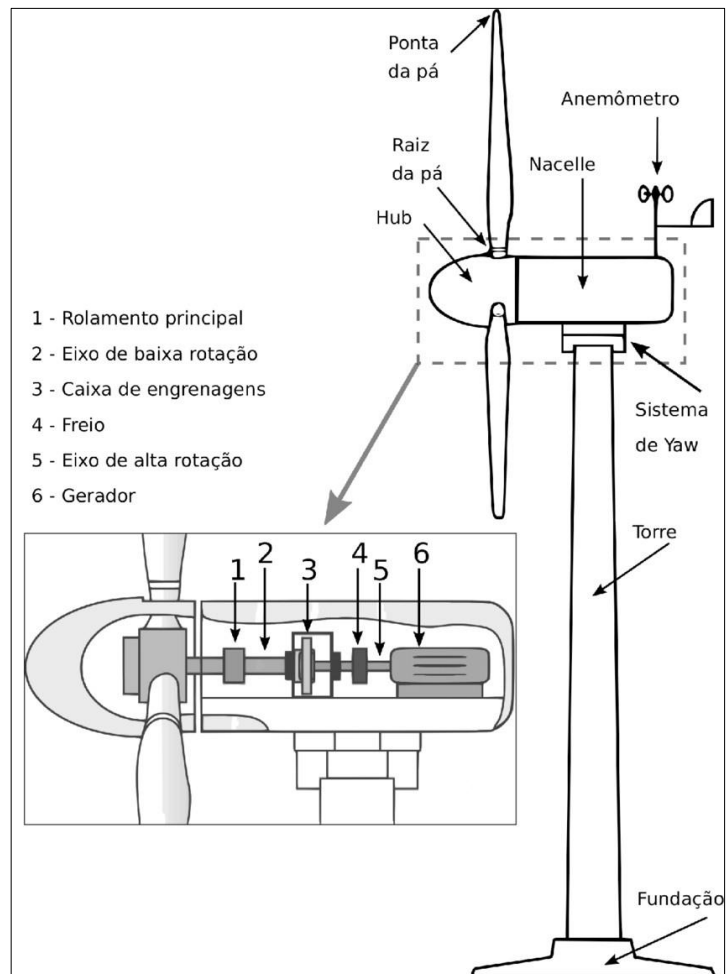
Os objetivos dos projetos de turbinas eólicas mudaram ao longo dos anos, passando da operação convencional para a aperfeiçoada, levando em conta o ambiente em que serão empregadas (onshore ou offshore) e o ambiente de mercado.

Além das turbinas eólicas estarem se tornando maiores, os conceitos dos projetos correspondentes evoluíram de velocidade fixa, controle de stall (a velocidade do vento superando a velocidade nominal do rotor, o escoamento do perfil da pá do rotor “descola” da superfície da pá, o que aumenta a força de arrasto do mesmo) e caixa de engrenagem para velocidade variável, controle de passo com ou sem caixa de engrenagens (Silva;

Azeredo, 2010).

A figura 7 mostra uma configuração de uma turbina eólica moderna convencional e seus principais equipamentos.

Figura 7: Esquema de componentes de uma turbina tradicional.



Fonte: Morim, 2019.

Desde o início do desenvolvimento das turbinas eólicas, diversas configurações foram propostas e construídas: turbinas com eixos vertical e horizontal; com uma, duas ou três pás; com ou sem caixa de engrenagens; com ou sem rotação das pás para controle de potência; e operação com velocidade fixa ou variável. (Vian, 2021)

Ainda segundo Vian (2021) os fabricantes de turbinas eólicas superaram desafios significativos de engenharia ao desenvolverem projetos economicamente viáveis e competitivos, mesmo em comparação com outras fontes de geração de energia. Após décadas de pesquisa, com avanços e conflitos, o design da turbina eólica moderna está se consolidando.

Atualmente, há consenso em relação à tecnologia que se baseia em turbinas de três pás, eixo horizontal, velocidade variável e controle do ângulo das pás para limitar a potência nominal do gerador.

5 FALHAS EM AEROGERADORES

Devido às condições climáticas a que estão submetidos, os aerogeradores operam sob cargas que são variáveis, complexas e dinâmicas. Além do próprio vento, que é um recurso natural instável, sujeito a rajadas e turbulência, outros fatores ambientais também podem impor maiores desafios aos equipamentos. Por exemplo, regiões com neve intensa ou, por outro lado, com temperaturas extremamente altas. Além disso, em áreas costeiras, a salinidade presente no ar acelera o desgaste dos componentes por corrosão. (Azeredo, 2023)

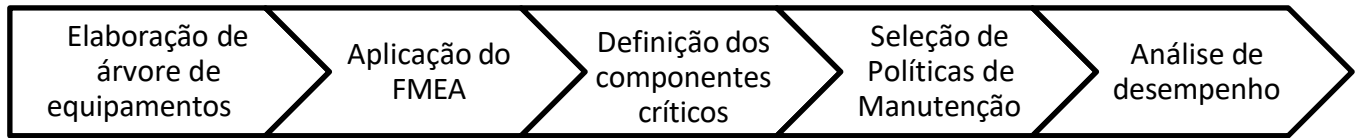
Em sua dissertação, Oliveira (2013) traz que, apesar dos avanços conquistados nos últimos trinta anos e dos esforços direcionados para aprimorar a confiabilidade operacional das turbinas, ainda persiste uma alta incidência de falhas em certos componentes. Embora todos os elementos sejam submetidos a rigorosos testes durante a fabricação para garantir alta qualidade, o rápido aumento da potência das turbinas e a demanda do mercado por essa tecnologia podem não ter permitido o tempo necessário para o desenvolvimento completo de alguns componentes

A relevância de um componente em um sistema é determinada por dois aspectos:

1. Onde está posicionado dentro do sistema;
2. Sua confiabilidade no momento específico da análise.

O cálculo da importância da confiabilidade é um passo adiante em relação ao cálculo da importância estrutural, pois leva em conta não apenas a posição do componente, mas também sua confiabilidade no momento da avaliação. (Fogliatto, 2009). Nesse contexto, a análise de desempenho de uma turbina é fundamental para calcular a confiabilidade dos equipamentos de um ativo como uma turbina eólica, esta análise geralmente é feita segundo os passos da figura 8 mostrada abaixo.

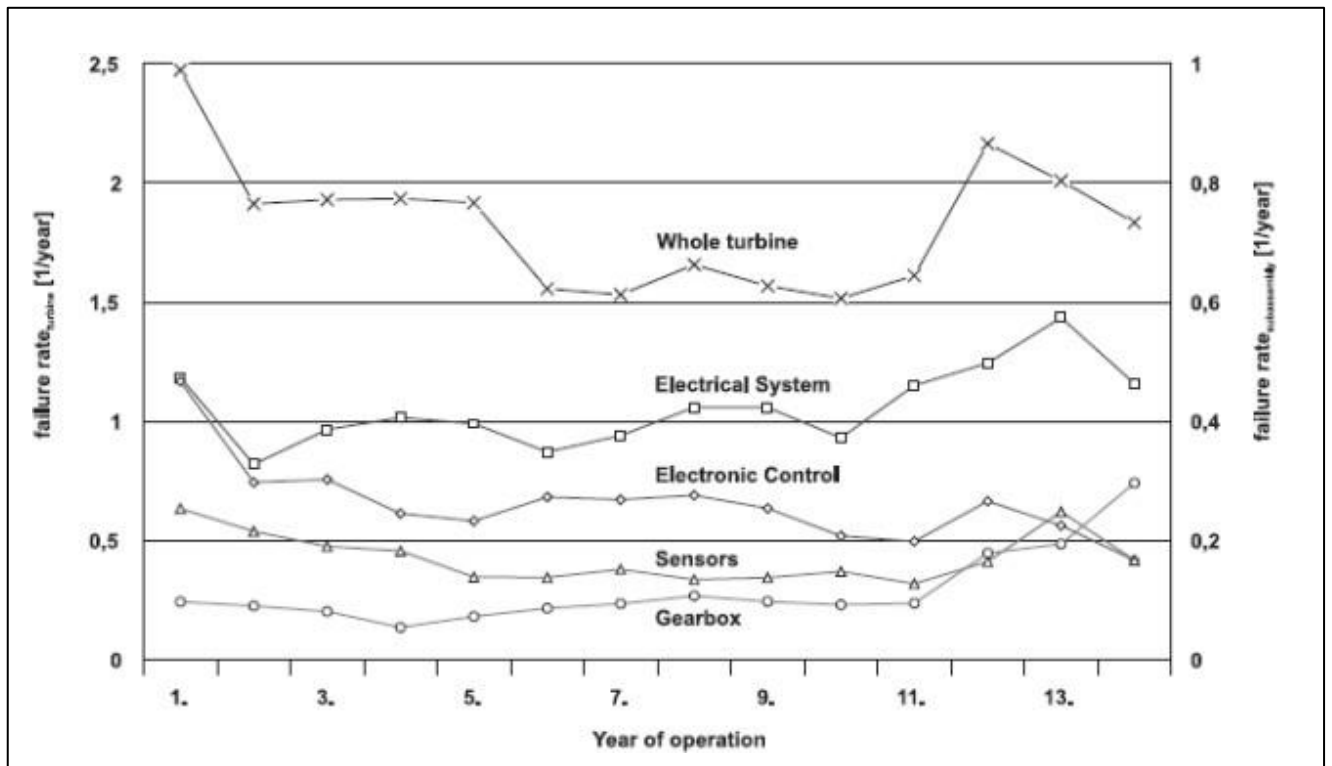
Figura 8: Passos para análise do desempenho dos equipamentos de uma turbina.



Fonte: Adaptado de Azeredo, 2023.

Oliveira (2013) traz ainda que, no que tange as falhas em aerogeradores, podem ser identificados principalmente três tipos de anomalias: elétricas, eletrônicas e mecânicas. A figura 9 mostra a incidência de falhas em diferentes sistemas de turbinas durante o tempo de operação, obtidos de relatórios da ISET Fraunhofer - Institute for Wind Energy and Energy Systems Technology.

Figura 9: Taxa de falhas dos sistemas de uma turbina.

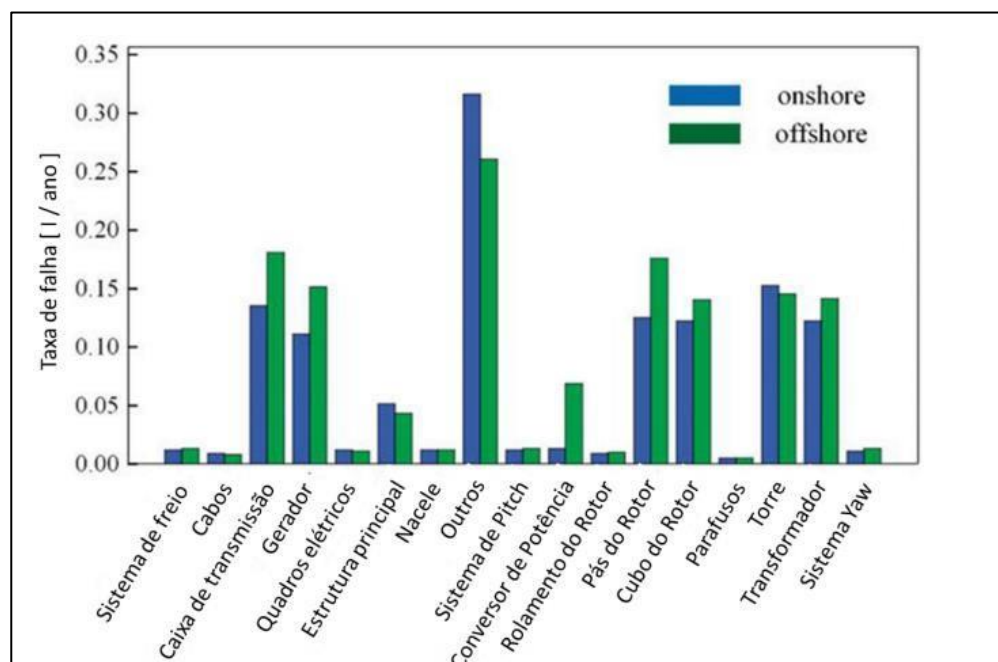


Fonte: Oliveira, 2013.

Em seus estudos, Zhu e Li (2018) também trazem informações acerca das falhas comumente encontradas em turbinas modernas. Segundo os autores, é possível observar que alguns componentes têm taxas de falha mais altas do que outros, como o gerador, a caixa de transmissão e as pás do rotor. Os mesmos componentes trabalhando no contexto offshore têm taxas de falha mais altas do que quando trabalhando onshore.

A figura 10 mostra um gráfico de comparação da taxa de falhas dos equipamentos sob as duas condições ambientais.

Figura 10: Taxa de falhas dos equipamentos de turbinas onshore e offshore.



Fonte: Adaptado de Carvalho, 2020.

5.1 FALHAS DE COMPONENTES ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS

As falhas elétricas ocorrem com alguma frequência e são as mais inesperadas, pois todo o equipamento utilizado (máquinas elétricas) encontra-se bastante maduro e estudado. Os geradores de indução e os transformadores por exemplo, são máquinas elétricas utilizadas há décadas, daí que se espere que estes equipamentos não apresentem problemas elétricos relevantes, embora a realidade demonstre o oposto. As falhas mais comuns estão relacionadas com as bobinagens, correntes de curto-circuito e problemas de isolamento. (Silveira *et al.*, 2011)

As principais perdas elétricas que ocorrem nos geradores são causadas devido a circulação de corrente elétrica nos seus rolamentos, uma vez que devido ao efeito Joule,

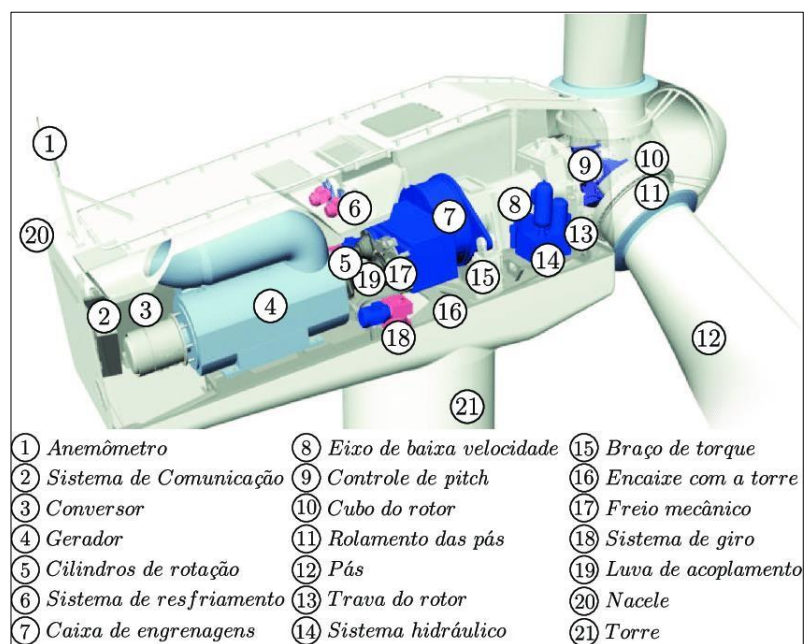
parte da energia é transformada em calor. Paralelamente, o fluxo magnético presente no núcleo do gerador, tanto no estator como no rotor, acabam provocando perdas por histerese, por corrente parasita e por saturação magnética, as quais também produzem calor. (Cabral, 2015)

A ocorrência deste tipo de problema pode ser explicada pela constante necessidade de aumento de potência das máquinas e a impossibilidade de acompanhar esse aumento de potência com o inerente aumento das dimensões dos equipamentos. Este fator leva à necessidade de utilização de novos materiais na construção dos equipamentos, que não se encontram ainda inteiramente testados. Quando ocorre uma falha num transformador ou no gerador, os custos envolvidos são bastante elevados e, normalmente, o problema é resolvido pela substituição do componente defeituoso. (Silveira *et al.*, 2011)

Ja para o caso dos componentes eletrônicos da turbina, a literatura diz que as falhas de natureza eletrônica são mais comuns do que as falhas elétricas, manifestando-se principalmente em sensores e placas eletrônicas. Um exemplo é a alta incidência de falhas nos anemômetros. Essas falhas eletrônicas podem ser desencadeadas por fenômenos atmosféricos, sendo particularmente frequentes quando o parque eólico é atingido por raios atmosféricos.

A Figura 11 nos mostra um layout interno de uma turbina onde é possível ver a localização de alguns dos componentes citados anteriormente.

Figura 11: Esquema da nacele de uma turbina convencional.



Fonte: CRESESB, 2014.

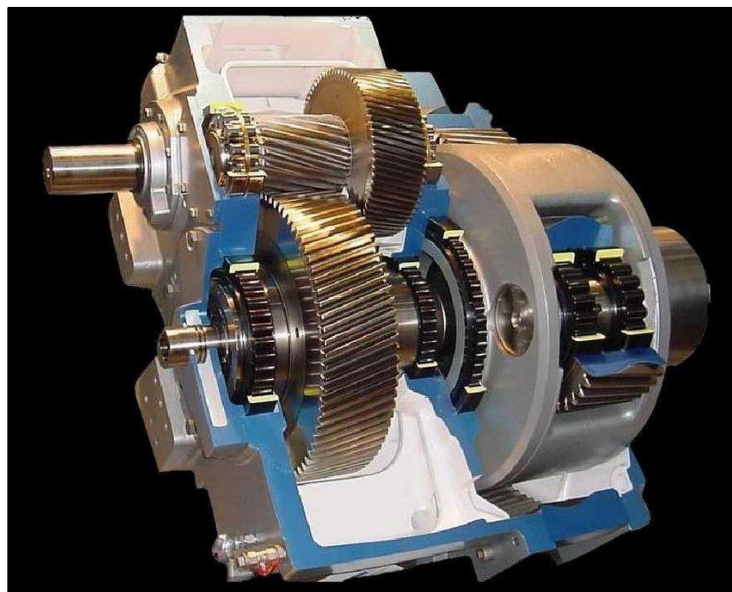
5.2 FALHAS MECÂNICAS

No que diz respeito as falhas mecânicas, seu potencial de falha está principalmente ligado à caixa de engrenagens e às pás. Com o aumento das dimensões das turbinas eólicas, elas passam a captar ventos de velocidades mais altas, resultando em forças significativas aplicadas às engrenagens. Essas forças intensas podem eventualmente causar a ruptura dos materiais envolvidos.

De acordo com Cabral (2015), a caixa de engrenagens ou multiplicadora desempenha a função de aumentar a velocidade de rotação. O custo da caixa de engrenagens aumenta conforme o número de engrenagens utilizadas. Este componente é o principal ponto de falha nas turbinas eólicas, e estudos recentes buscam desenvolver projetos de rotores eólicos com velocidades mais altas e caixas de engrenagens mais eficientes.

A caixa multiplicadora, é responsável pelo mecanismo de transmissão da energia mecânica do eixo do rotor (eixo principal) ao eixo gerador elétrico. Os rotores eólicos funcionam com velocidades tangenciais de ponta de pá da ordem de 60 a 100 m/s, praticamente independentes do tamanho do diâmetro. A velocidade de rotação do rotor da turbina eólica é limitada entre 15 a 200 rpm, por causa da vibração, do empuxo e ruído aerodinâmicos que são causados. A figura 12 mostra um exemplo de caixa multiplicadora de uma turbina eólica. (Cabral, 2015).

Figura 12: Caixa multiplicadora de uma turbina eólica.



Fonte: Paredes, 2014.

Monitorar a taxa de falha de cada componente oferece insights sobre o estágio de vida útil do equipamento, indicando se está dentro de sua expectativa de vida ou se está se aproximando do fim dela. Além disso, possibilita calcular a confiabilidade do equipamento, isto é, a probabilidade de o equipamento falhar em um determinado intervalo de tempo. (Carvalho, 2020)

Com o crescente número de turbinas eólicas, a indústria ainda precisa enfrentar inúmeros desafios. Vários componentes de turbinas eólicas estão sujeitos a falhas e é difícil e caro repará-los ou substituí-los. Por exemplo, rolamentos, inversores e caixas de engrenagens levantam problemas de manutenção. Ainda assim, os desafios da energia eólica ainda existem devido a: (1) mau desempenho e confiabilidade e (2) custos crescentes impulsionados por transporte, manutenção e assim por diante.

Para alcançar uma vida útil mais longa das turbinas eólicas e reduzir o custo de manutenção, o desenvolvimento de tecnologias para melhorar a confiabilidade das turbinas eólicas é uma consideração importante para o desenvolvimento futuro, especialmente para turbinas eólicas offshore. Portanto, medidas devem sempre ser tomadas para melhorar a confiabilidade destes equipamentos. (Zhu; Li, 2018).

6 METODOLOGIA

A fim de se obter uma melhor compreensão da aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade aplicada à turbinas eólicas, foi realizada uma revisão sistemática da literatura que, de acordo com Galvão e Ricarte (2020), consiste em compreender e organizar um extenso conjunto de documentos, examinando sua eficácia em determinado contexto.

A pesquisa é conduzida de forma a garantir sua replicabilidade por outros pesquisadores, com transparência na apresentação das fontes bibliográficas consultadas, detalhes sobre as estratégias de busca exigidas, critérios de seleção e exclusão de artigos, bem como o processo de análise de cada documento.

Para realizar o estudo, foi feita uma busca na base de dados de resumos e citações de literatura revisada por pares, a Scopus, pertencente a editora Elsevier. A revisão sistemática iniciou-se na busca através das palavras-chave “MCC AND Wind Turbine”, em artigos científicos entre os anos 2006 a 2024, com o intuito de analisar as principais técnicas empregadas na aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade em turbinas eólicas.

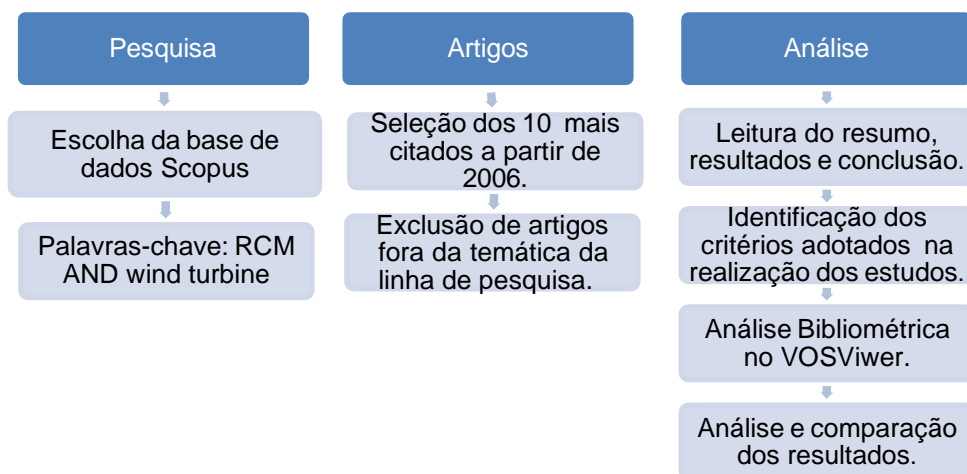
Posteriormente, através do software livre VOSViewer® foi realizada uma análise bibliométrica a fim de identificar clusters - grupos que se formam por afinidade ou proximidade - e correlacioná-los para identificar parâmetros como artigos mais influentes e autores mais citados, além de identificar as correlações entre os mesmos. Um cluster que liga vários outros no VOSViewer é um indicador de centralidade, interdisciplinaridade e importância dentro da rede de conhecimento, destacando temas, autores ou artigos que desempenham um papel crucial na estrutura e evolução do campo de estudo.

O critério de escolha dos artigos baseou-se primeiramente no número de citações dos mesmos fornecidos pela plataforma, ou seja, a escolha foi feita na ordem decrescente, com o intuito de acessar os 10 trabalhos mais difundidos sobre o tema, dentro da referida base de dados.

Posteriormente foram excluídos da seleção artigos que não corresponderam ao objetivo da pesquisa, ou seja, estudos fora do eixo temático do trabalho. Os artigos que não estavam disponíveis para o livre acesso também foram excluídos da seleção, passando a escolha para o artigo seguinte em ordem decrescente.

A figura 13 mostra um esquema que contém o passo à passo seguido para realizar a revisão sistemática.

Figura 13: Esquema de seleção dos artigos.



Fonte: O Autor, 2024.

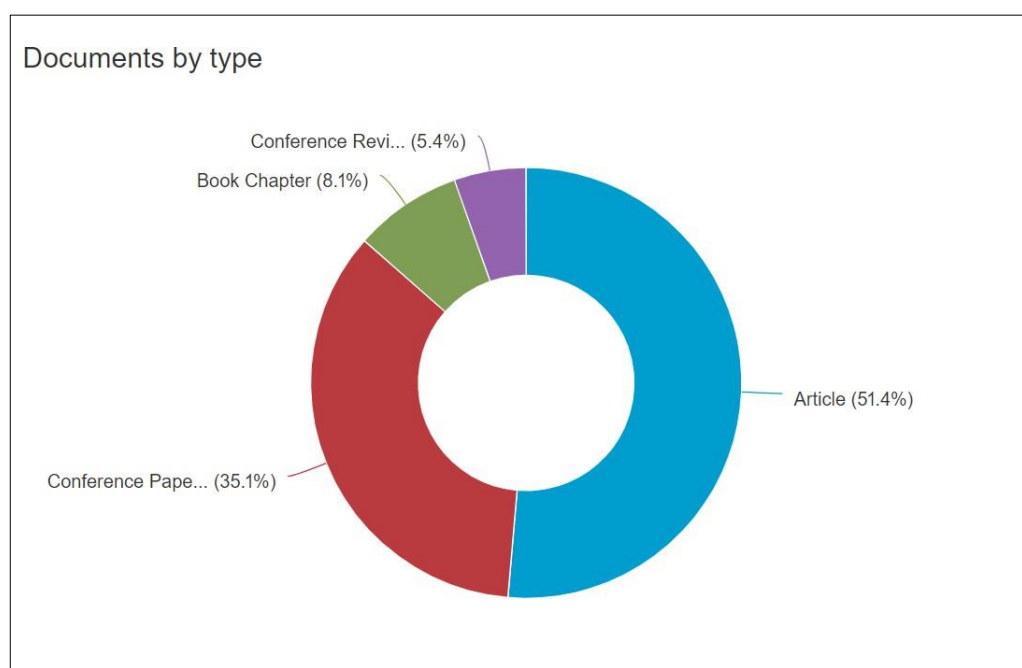
Os conteúdos dos artigos foram analisados na íntegra apenas no que tange aos resultados e conclusões dos estudos, bem como a metodologia adotada pelos autores.

7 REVISÃO SISTEMÁTICA

Como dito anteriormente, para a realização da revisão sistemática, a escolha dos artigos foi feita utilizando palavras-chave na plataforma de banco de dados de resumos e citações de artigos acadêmicos, Scopus. A busca através das palavras-chave “RCM AND Wind Turbine” resultou em 37 documentos encontrados, sendo 19 artigos científicos, 13 artigos de conferência, 3 capítulos de livros e 2 revisões de conferência.

A figura 14 traz os resultados da busca tomando como referência o tipo dos documentos encontrados.

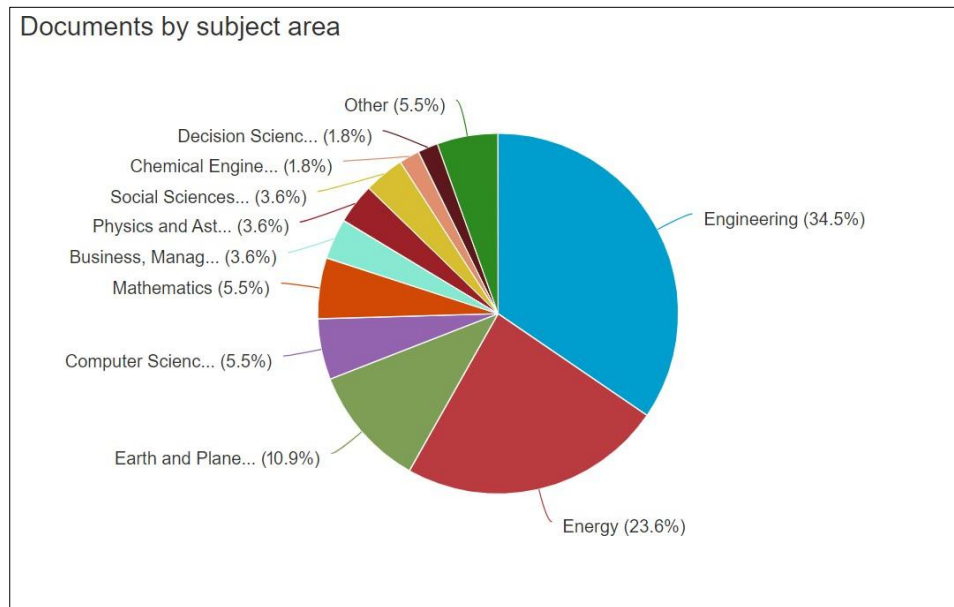
Figura 14: Classificação dos documentos encontrados por tipo.



Fonte: Scopus, 2024.

Num outro gráfico, também foi possível observar que os setores de engenharia (34,5%) e energia (23,6%) são os principais responsáveis pelos trabalhos no campo da MCC, como podemos ver na figura 15. Isso se deve ao fato que, uma eficiente gestão de ativos, significa grandes resultados financeiros para as empresas, justificando os grandes investimentos nesses setores para se alcançar estratégias de manutenção cada vez mais eficientes.

Figura 15: Classificação dos documentos por área

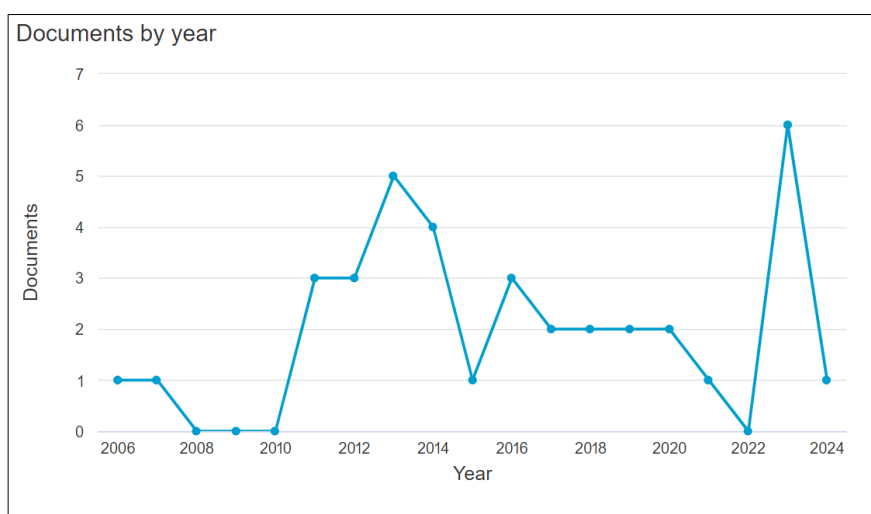


Fonte: Scopus, 2024.

7.1 EVOLUÇÃO DO TEMA NOS ÚLTIMOS 18 ANOS

Utilizando os trabalhos resultantes das buscas segundo os critérios citados anteriormente, inicialmente, foi feita uma análise da evolução do tema ao longo dos anos, com objetivo de acompanhar o andamento do grau de relevância do tema para engenheiros e empresas na comunidade internacional. A figura 16 nos mostra um gráfico da quantidade de documentos resultantes da busca *versus* seus respectivos anos de publicação.

Figura 16: Documentos versus ano de publicação.



Fonte: Scopus, 2024.

É possível observar que os anos de 2013 com 5 documentos e 2023 com 6 respectivamente, foram os anos onde ocorreram o maior número de publicações sobre o tema, havendo apenas no quadriênio 2017 - 2020 uma constância no número de publicações (2), além do triênio 2008 - 2010 com nenhuma publicação.

Nota-se que o número de estudos publicados apresenta uma oscilação considerável, um dos motivos que justificam a oscilação é o tempo necessário para colher e analisar os resultados, além da necessidade do tratamento dos dados das diferentes estratégias de manutenção adotadas pelos autores. No entanto, com a crescente demanda por energia advindas de matrizes renováveis, bem como dos surgimentos de novos sistemas de monitoramento de condições dos equipamentos, é provável que os números de publicações se mantenham estáveis no futuro.

Um dos motivos para a existência do baixo número de trabalhos relacionados ao tema é a preocupação com o sigilo por parte das empresas em relação aos dados de manutenção de seus equipamentos. Em um estudo acerca da gestão do conhecimento e da informação em organizações feito por Hoffmann, é possível observar que as empresas costumam manter sigilo sobre os dados de manutenção de seus equipamentos por diversas razões estratégicas e competitivas. Primeiramente, esses dados representam um ativo valioso que pode fornecer insights sobre a eficiência operacional, as falhas recorrentes e as práticas de manutenção que garantem a longevidade dos equipamentos. Compartilhar tais informações pode expor vulnerabilidades e fornecer vantagens competitivas aos concorrentes. (Hoffmann, 2018).

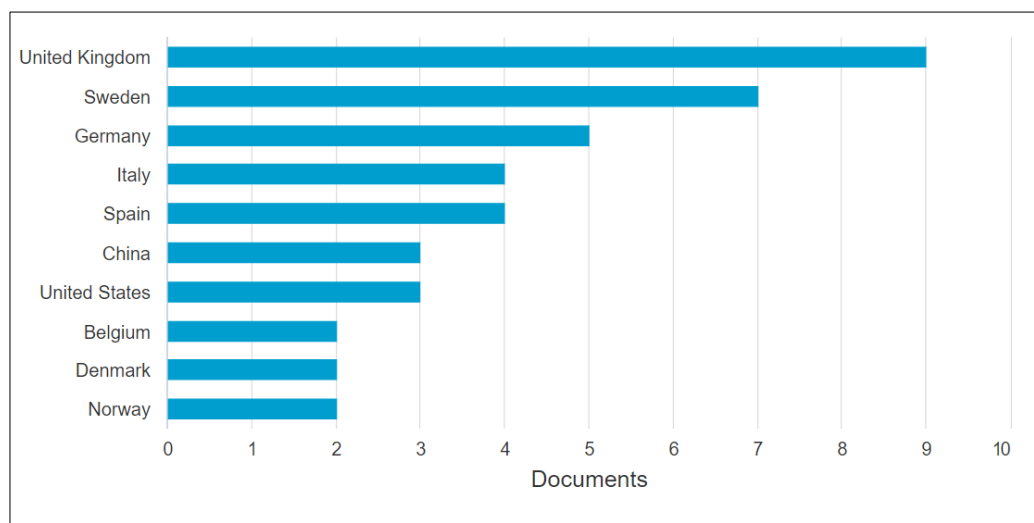
Além disso, em indústrias altamente reguladas ou com grandes investimentos em tecnologia, como a eólica, os dados de manutenção também podem revelar aspectos confidenciais das operações e das inovações tecnológicas utilizadas, o que reforça a necessidade de confidencialidade para proteger a propriedade intelectual e evitar litígios. Diante disso, o sigilo é uma prática comum para preservar a vantagem competitiva e assegurar o controle sobre informações críticas que podem impactar diretamente a sustentabilidade e a lucratividade das empresas.

7.2 PAÍSES QUE MAIS PUBLICARAM SOBRE O TEMA

Outro dado relevante analisado é o número de publicações por países, o que mostra os locais onde a manutenção e o gerenciamento de parques eólicos estão mais avançados. Isso é fruto de um constante investimento de empresas e universidades na questão da manutenção das turbinas, que por sua vez, desempenham papel importante na matriz energética desses países.

A figura 17 nos mostra um recorte do ranking dos países com a maior quantidade de publicações

Figura 17: Ranking de países versus número de publicações.



Fonte: Scopus, 2024.

Como podemos ver, o continente europeu lidera o número de pesquisas na área, sendo apenas China e Estados Unidos, os países fora do continente elencados na lista; Reino Unido, Suécia e Alemanha são os países de mais destaque. Outros países como, Rússia, Grécia e Portugal apesar de possuírem trabalhos publicados, não aparecem na

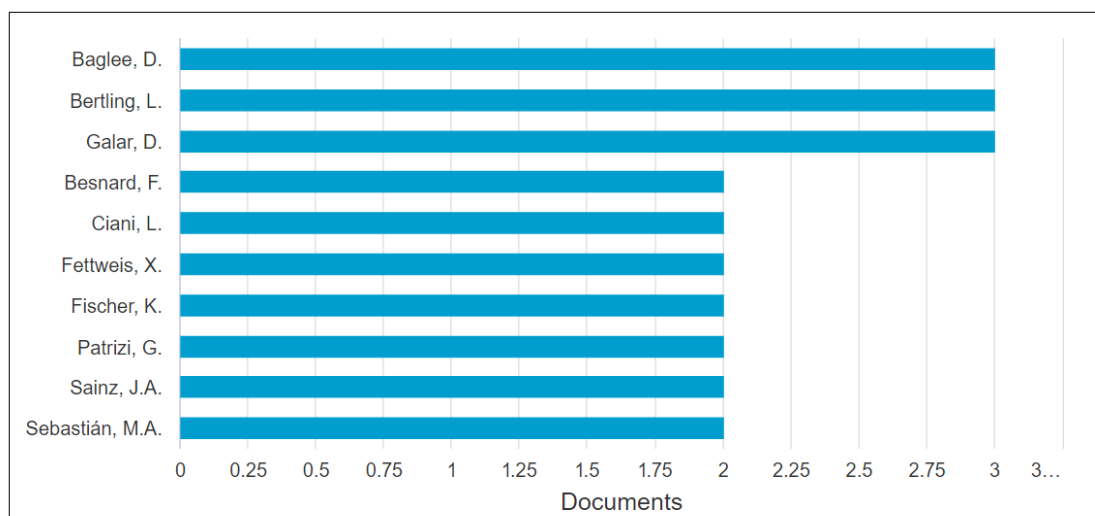
lista, que considerou apenas os países que possuíam 2 ou mais publicações.

7.3 ANÁLISE DOS AUTORES

Após a verificação dos países com o maior número de publicações, foi realizada a análise dos autores mais influentes na temática, considerando o número de citações dos seus respectivos trabalhos. De acordo com Mariano e Rocha (2017) que citam a lei do elitismo, as citações atribuem aos documentos importância à medida que são citados por outros autores; e a lei de Lotka estima o grau de relevância de autores em dada área do conhecimento. Ambas as leis são baseadas em citações e publicações.

A figura 18 abaixo ilustra os autores mais relevantes para o tema da pesquisa na base de dados escolhida.

Figura 18: Número de publicações por autores.



Fonte: Scopus

É importante salientar que, os resultados acerca dos números de publicações correspondem apenas à plataforma Scopus, outras bases de dados não foram levadas em consideração nesta pesquisa. Visto isso, podemos ver que Baglee, Bertling e Galar possuem alto grau de relevância no estudo das aplicações da MCC aplicada a aerogeradores e lideram o número de publicações (3).

7.4 ANÁLISE NO VOSViewer®

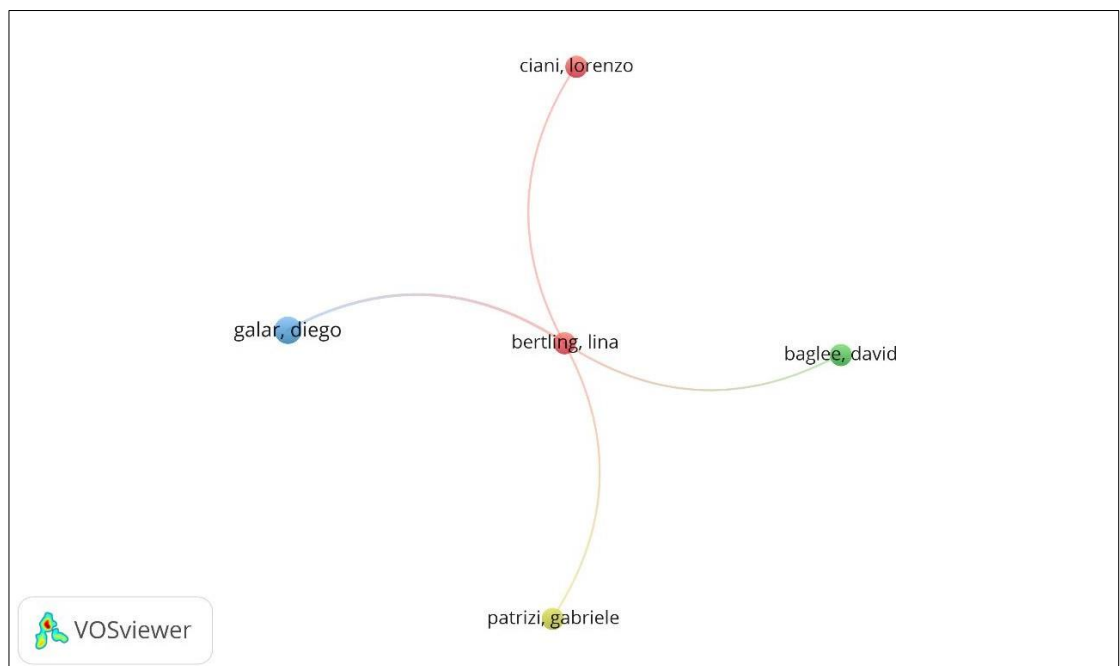
Correlacionar os autores mais citados e as palavras-chave permite identificar as principais tendências e áreas de foco na pesquisa sobre Manutenção Centrada na

Confiabilidade em turbinas eólicas, ajudando a compreender quais aspectos do tema são mais relevantes e estudados. Analisar os autores mais citados permite reconhecer os principais contribuintes para o campo. Isso é importante para fundamentar a pesquisa em estudos relevantes e respeitados, além de identificar possíveis lacunas ou áreas que necessitam de mais investigação.

O VOSViewer® facilita a visualização de redes de colaboração entre autores e a conexão entre diferentes estudos através de palavras-chave. Essa visualização ajuda a entender como o conhecimento está distribuído e interligado no campo de estudo. A criação de clusters é uma etapa essencial na análise de dados bibliométricos e na visualização de redes de conhecimento, especialmente ao usar ferramentas como o VOSviewer®.

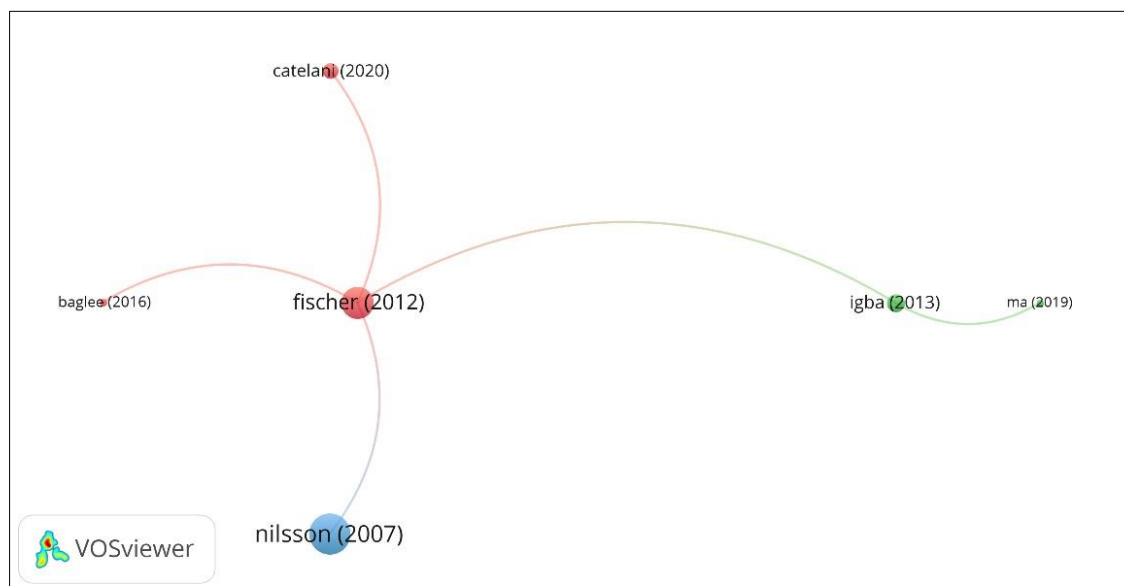
Nas figuras 19 e 20, é possível ver os resultados da busca pelos autores mais citados em trabalhos que possuem no mínimo 2 artigos publicados, assim como os documentos mais citados nas referências de outros trabalhos.

Figura 19: Diagrama de rede representando os autores mais citados em trabalhos.



Fonte: O Autor, 2024.

Figura 20: Diagrama de rede dos autores com artigos mais citados.



Fonte: O Autor, 2024.

Podemos observar que Bertling é o autor-chave na primeira busca, uma vez que está relacionado com diferentes grupos. Porém, quando se trata de documentos mais citados, o artigo de Fischer (2012) se encontra como o mais influente neste aspecto. No VOSviewer®, quando um cluster liga vários outros indica que o cluster atua como um ponto de conexão ou um *hub* na rede de conhecimento.

Na etapa da análise por palavras-chave foi possível identificar 41 clusters com as palavras mais citadas mostrando as principais linhas de pesquisa seguidas nos estudos. Podemos ver, na figura 21, que as principais palavras que motivam as pesquisas são “*Wind Power*” e “*Maintenance*”.

estabelecidos.

. Quadro 2: Artigos analisados segundo os critérios estabelecidos.

(continua)

| Título | Autor | Ano | Fator de Impacto | Citações | Componente | Ambiente |
|---|--|------------|-------------------------|-----------------|---|-----------------|
| Maintenance management of wind power systems using condition monitoring systems – Life cycle cost analysis for two case studies | Julia Nilsson, Lina Bertling | 2007 | 9,09 | 320 | Caixa de Engrenagens, Gerador, Transformador, Lâminas | Ambos |
| Reability-centered maintenance for wind turbines based on statistical analysis and practical experience | Katharina Fischer, François Besnard, Lina Bertling | 2012 | 8,89 | 193 | Caixa de velocidades, Gerador, Sistema elétrico, Sistema hidráulico | Onshore |
| The selection of a suitable maintenance strategy for wind turbine | Jesse A. Andrawus, John Watson, Mohammed Kishk, Allan Adam | 2006 | 1,59 | 82 | Não especificado. | Onshore |
| A Systems Approach towards Reliability-Centred Maintenance (RCM) of Wind Turbines | Joel Igbaa, Kazem Alemzadeh a, Ike Anyanwu-Ebo, Paul Gibbonsa, John Friisb | 2013 | 6,59 | 60 | Caixa de Engrenagens | Ambos |
| Wind turbine condition monitoring and reliability analysis by SCADA information | Wenxian Yang, Jiesheng Jiang | 2011 | 4,48 | 47 | Gerador, Caixa de Engrenagens, Lâminas | Ambos |

(conclusão)

| Título | Autor | Ano | Fator de Impacto | Citações | Componente | Ambiente |
|--|--|------------|-------------------------|-----------------|---|-----------------|
| Optimizing Maintenance Policies for a Yaw System Using Reliability-Centered Maintenance and Data-Driven Condition Monitoring | Marcantonio Catelani, Diego Galar, Lorenzo Ciani, Gabriele Patrizi | 2020 | 3,10 | 41 | Sistema Hidráulico, Caixa de engrenagens, sistema de controle. | Onshore |
| Intelligent integrated maintenance for wind power generation | D. Pattison, M. Segovia Garcia, W. Xie, F. Quail, M. Revie, R. I. Whitfield, I. Irvine | 2016 | 1,01 | 31 | Caixa de velocidade, Bomba de óleo da caixa de engrenagens, Rolamento da caixa de engrenagem. | Offshore |
| Methodology for the maintenance centered on the reliability on facilities of low accessibility | Sainz J.A., Sebastián M.A. | 2013 | 2,83 | 10 | Não especificado. | Ambos |
| A limited-scope reliability-centered maintenance analysis of wind turbines | Fischer K., Besnard F.; Bertling L | 2011 | 2,21 | 10 | Caixa de engrenagens, gerador e controle/conversor de corrente do rotor. | Ambos |
| A proposed maintenance strategy for a wind turbine gearbox using condition monitoring techniques | Baglee, D., Knowles, M., Kinnunen, S.-K., Galar, D. | 2016 | 0,40 | 9 | Caixa de engrenagens | Offshore |

Fonte: O Autor 2024.

O artigo de Nilsson e Bertling (2007) discute os benefícios da implantação de um sistema de monitoramento de condições (SMC) na análise do custo de vida útil de duas turbinas eólicas: uma localizada no parque de Olsvenne 2, em Gotland, Suécia, e outra no parque de Kentish Flats, no Reino Unido. A primeira está no ambiente onshore e a outra no offshore. Como principal resultado, os autores destacam a otimização do planejamento da manutenção das turbinas, o que aumentou a confiabilidade dos equipamentos. Isso é especialmente relevante considerando os desafios logísticos e os elevados custos de manutenção em ambientes offshore, que são particularmente hostis. A análise do custo de vida útil das turbinas foi conduzida considerando três diferentes estratégias de manutenção para os dois cenários mencionados. Inicialmente, foram apresentadas três estratégias onde tanto a manutenção preventiva quanto a corretiva foram impactadas. Em seguida, duas estratégias foram discutidas nas quais apenas a manutenção corretiva sofreu alterações. Por fim, foi analisada uma estratégia que afetou exclusivamente a perda de produção. As três últimas estratégias foram aplicadas apenas ao parque offshore, enquanto as três primeiras foram consideradas tanto para o parque offshore quanto para o onshore. O principal objetivo dos autores foi comparar os custos associados aos diferentes tipos de manutenção, bem como avaliar a redução do número de homem-dia necessária após a implantação de um sistema de monitoramento de condições. Os resultados das três primeiras estratégias indicaram que, para uma única turbina, a manutenção preventiva precisaria ser reduzida em 23% se apenas a manutenção preventiva fosse afetada. No caso do parque eólico, essa redução seria de 4,5%. Se tanto a manutenção corretiva quanto a preventiva fossem impactadas, a diminuição combinada necessária seria de 3,5% para a turbina individual e de 2,5% para o parque. Portanto, é essencial uma redução significativa na manutenção corretiva para que a implantação de um SMC seja justificada, especialmente no caso de turbinas localizadas em terra.

No trabalho de Fischer, Besnard e Bertling (2012), uma aplicação da metodologia MCC foi realizada nos modelos de turbinas eólicas V44-600kW e V90-2MW, envolvendo proprietários, operadores, prestadores de serviços de manutenção, fornecedores de monitoramento de condições, fornecedores de componentes de turbinas e pesquisadores acadêmicos. O foco do artigo foram os principais subsistemas e modos de falha que afetam a disponibilidade das turbinas, como caixa de velocidades, gerador e sistema elétrico e hidráulico. Foram identificadas as falhas funcionais mais relevantes, suas causas

e medidas preventivas, utilizando estatísticas de falhas e opiniões de especialistas. Nos dados obtidos, os autores observaram que a vibração desempenha um papel significativo como causa de falha mecânica em diversos componentes. Isso sugeriu que medidas voltadas para prevenir ou detectar precocemente danos em equipamentos como rolamentos são de extrema importância na MCC aplicada a aerogeradores. Além disso, concluiu-se que os modelos quantitativos de otimização de manutenção, que geralmente assumem falhas independentes de componentes, podem ocultar, com frequência, os benefícios do monitoramento de vibração. Os autores destacam ainda a importância de abandonar a prática comum de tomar decisões de manutenção com foco apenas em economias de custos imediatas, em vez de priorizar a minimização do Custo do Ciclo de Vida (LCC) a longo prazo. Para alcançar esse objetivo, os autores destacam o desenvolvimento e implementação de ferramentas de apoio à decisão baseadas em dados na gestão da manutenção.

Andraus *et al.* (2006) conduziram um estudo de caso aplicando MCC e análise do ciclo de vida de ativos (ALCA) em uma turbina de eixo horizontal genérica. No estudo, os autores analisaram uma estratégia de manutenção que combinava a Manutenção Centrada na Confiabilidade com a Análise do Ciclo de Vida dos Ativos para identificar as causas e os efeitos das falhas em turbinas eólicas. Ao expressar as consequências dessas falhas, especialmente nos componentes críticos da turbina, em termos financeiros, eles puderam avaliar as economias obtidas com a implantação da MCC, pois, de acordo com os autores a MCC por si só é limitado na determinação de quais estratégias de manutenção são as opções mais econômicas disponíveis. Para o estudo, os autores utilizaram dados de um parque eólico onshore de 26X600 kW (totalizando 15,6 MW) operando com uma média de 33% de capacidade cujo objetivo era responder as 3 últimas perguntas para implantar uma Manutenção Centrada na Confiabilidade. O histórico de falhas foi coletado do sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA) ao longo de seis anos. O SCADA registra as falhas, suas datas e horários, utilizados em conjunto com Ordens de Serviço (WOs) para identificar tipos de falhas e componentes envolvidos. A taxa de falha dos componentes críticos foi calculada e incluída na análise. Foram comparados os Valores Presentes Líquidos (VPL) das estratégias de Monitoramento Baseado no Tempo (TBM) e Monitoramento Baseado em Condições, além da avaliação dos aspectos não financeiros usando a técnica de avaliação ponderada (WE). A relação benefício-custo de cada opção foi calculada e a análise demonstrou que a escolha entre as estratégias de manutenção não pode depender apenas do VPL, já que

este considera apenas critérios financeiros, enquanto a seleção adequada depende das características individuais de falha das turbinas eólicas. Os resultados indicaram que o Monitoramento Baseado em Condições é a opção mais econômica, proporcionando uma economia total de £180.152 ao longo de um ciclo de vida de 18 anos.

No artigo de Igba *et al.* (2013) os autores investigaram o ciclo de vida dos componentes e subcomponentes da caixa de engrenagens das turbinas, visando identificar os dados essenciais para alinhar corretamente as fontes de dados com a para a correta aplicação de sistema de manutenção centrado na confiabilidade. Os mesmos destacaram a importância de facilitar o acesso e remontagem da caixa de engrenagens durante o projeto da turbina, especialmente para reparos na torre superior. Os custos significativos associados à manutenção desses equipamentos, especialmente em ambientes offshores, foram observados, destacando a necessidade de modificações nos projetos para otimizar o acesso aos dados de funcionamento. Por fim, os autores recomendam que as empresas criem um banco de dados de operação e manutenção para obter informações confiáveis sobre o histórico de falhas, com o auxílio de um sistema informatizado de Gestão de Manutenção (CMMS) integrado a outros bancos de dados do ciclo de vida em um banco de dados central de engenharia.

No estudo de Yang e Jiang (2011), o objetivo foi demonstrar como o sistema de Controle de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) em parques eólicos influencia na definição de uma estratégia de Manutenção Centrada na Confiabilidade. Os resultados revelaram que os dados provenientes do SCADA representam um recurso economicamente vantajoso para o desenvolvimento de um Sistema de gerenciamento de condição das turbinas eólicas, embora não possam diagnosticar falhas com precisão. O estudo destaca ainda a necessidade de atualização do SCADA para atender melhor à demanda por monitoramento de condições, sendo os dados essenciais para análises de confiabilidade em turbinas eólicas existentes e para o projeto de máquinas futuras mais confiáveis. Os autores afirmam que, apesar de a MCC ser uma estratégia complexa de operação e manutenção, ela se destaca como a mais eficaz e econômica para turbinas eólicas.

No artigo de Catelani, Ciani, Galar e Patrizi (2020) o foco foi a otimização de um plano de Manutenção para o sistema de guinada através de um sistema de Yaw utilizado em uma turbina eólica onshore de 2 MW. O mecanismo de guinada é uma parte essencial, pois uma correta orientação do rotor é fundamental para aumentar a produção de eletricidade. Com isso, o sistema de guinada sugerido é equipado com dois sistemas de

movimento ativo: um sistema hidráulico e um sistema eletromecânico. A implicação desta abordagem é que, se um dos sistemas falhar, o outro seria ativado evitando a indisponibilidade da turbina. Os principais sistemas de análise dos autores foram o sistema hidráulico, a caixa de engrenagens e o sistema de controle. Os autores concluíram que, com base nos resultados do estudo, apenas 5% das tarefas atribuídas são de manutenção corretiva, enquanto o Monitoramento Baseado em Condições constitui a maior parte das tarefas avaliadas. Os resultados destacam a importância do correto diagnóstico em sistemas complexos, propondo a implementação de medições e tecnologias de sensores para monitorar subsistemas críticos. Como exemplo, para o sistema hidráulico, os autores sugerem dois sistemas de Monitoramento Baseado em Condições: um com base na temperatura do óleo e outro na pressão hidráulica. Quando o sinal atinge um nível de alerta, o operador é notificado sobre uma possível falha iminente. Se o sinal alcançar um nível crítico, o sistema aciona um desligamento de emergência da turbina, evitando os danos nos componentes. Por último, os autores sugerem a implementação de um Monitoramento de Condições baseado em dados para o sistema de controle, tendo como foco a temperatura interna da turbina para garantir sua confiabilidade.

Pattison *et. al.* (2016) realizaram um estudo onde propõem uma nova arquitetura e sistema para dar suporte à Manutenção Centrada em Confiabilidade. O objetivo do estudo é demonstrar como diferentes métodos matemáticos podem ser integrados no desenvolvimento de uma solução abrangente para MCC, que é aplicada no contexto da geração de energia eólica offshore neste estudo. Na solução apresentada, as decisões são baseadas nas observações dos sensores instalados nas turbinas; o monitoramento de condições orienta os dados através da identificação de comportamentos anômalos; a modelagem de confiabilidade e manutenção (RMM) dá suporte à tomada de decisão, sugerindo diversas opções de manutenção e, finalmente, a equipe de manutenção proporciona uma decisão mais bem otimizada em termos de custo-benefício para a manutenção do parque eólico. O sistema proposto pelos autores, apresenta, pela primeira vez, a utilização e integração de técnicas avançadas de inteligência artificial. Um sistema de Manutenção Integrado inteligente baseado em dados, Aura, foi desenvolvido para atender às exigências de maximização das receitas geradas pela energia eólica offshore, operando entre 13 e 195 km da costa, assegurando a disponibilidade dos ativos através de um regime de manutenção preventiva. O sistema foi construído em três módulos, que correspondem às funcionalidades necessárias, e integrados e controlados pelo motor Aura. Um estudo de caso, utilizando 12 meses de dados SCADA e alarmes de um parque

eólico com mais de 100 turbinas, foi empregado para demonstrar o sistema. O foco específico foi em sete turbinas conhecidas por exibirem uma série de comportamentos anômalos. O estudo de caso demonstrou: a detecção automática de falhas nessas turbinas; os impactos dessas falhas na capacidade de operação das turbinas; a avaliação de diferentes ações de manutenção visando maximizar a disponibilidade; e a programação da manutenção e a atualização da capacidade de operação das turbinas em resposta às ações de manutenção.

No estudo de Sainz e Sebastian (2013), os autores exploraram a implementação de planos de manutenção em plantas de difícil acesso. Eles argumentam que, para uma aplicação completa e eficaz da MCC em instalações de acesso restrito, é essencial avaliar a confiabilidade da planta em questão utilizando os seguintes métodos: FMECA (Análise de Modos e Efeitos de Falha), RCA (Análise de Causa Raiz), modelagem matemática (como a análise de Weibull) e o uso de tecnologia instrumental para monitoramento de condições. Essas ações, juntamente com a implementação de ferramentas de medição de desempenho, como o OEE (Overall Equipment Effectiveness), fornecem informações precisas e confiáveis sobre a eficácia das tarefas e as melhorias nos processos produtivos. Os autores observaram que, para otimizar a detecção de falhas, é necessário instalar dispositivos de monitoramento contínuo que forneçam informações confiáveis e em tempo real. Parâmetros como vibração, temperatura e amperagem devem ser medidos por sensores que capturam as características operacionais de componentes importantes, como caixas de engrenagens, rolamentos e eixos. Finalmente, os autores concluem que, com a adoção dos métodos mencionados, é possível monitorar continuamente, medir, identificar e quantificar a eficiência do processo de manutenção, avaliando o impacto das falhas em toda a instalação e facilitando a avaliação da adequação de diferentes propostas de melhoria mesmo com as dificuldades associadas a baixa acessibilidade das instalações.

Fischer, Besnard e Bertling (2011) conduziram uma análise de Manutenção Centrada na Confiabilidade para turbinas eólicas Vestas V44-600kW e V90-2MW, envolvendo um grupo de trabalho diversificado. A metodologia seguiu as sete etapas tradicionais da MCC: definição do sistema, identificação de funções e falhas, seleção de itens críticos, coleta e análise de dados, FMECA, análise de causas de falha e seleção de ações de manutenção. As falhas das turbinas foram analisadas combinando dados estatísticos com a opinião de especialistas, priorizando subsistemas críticos. Foram utilizadas falhas de 32 turbinas V44-600kW (1996-2005) da Suécia e de 57 turbinas V90-

2MW (2004-2008) da Alemanha. A análise revelou que, seguir rigorosamente cronogramas e planos de manutenção aumenta a confiabilidade das turbinas, confirmando a adequação dos intervalos de seis meses. A falta ou execução inadequada da manutenção resultou em baixa disponibilidade e danos caros. O estudo destacou a necessidade de melhor treinamento para novos funcionários devido ao rápido crescimento do setor, enfatizando a importância de procedimentos corretos de instalação e alinhamento de componentes. Identificou-se também que decisões de manutenção são geralmente focadas em minimizar custos a curto prazo, em vez de considerar o custo total do ciclo de vida. A dificuldade em justificar investimentos preventivos, devido à complexidade de quantificar seus benefícios, foi apontada como um desafio. Os autores sugerem que métodos quantitativos baseados em dados podem otimizar a manutenção e promover uma abordagem mais eficiente e econômica a longo prazo. Para melhorar a obtenção desses dados os autores recomendam a estrutura de designação de componentes RDS-PP em conjunto com a estrutura de designação EMS como sistemas de monitoramento confiáveis para atividades de manutenção.

No estudo de Baglee et al. os autores desenvolvem uma unidade de processamento baseada em sensores para monitorar continuamente os sistemas lubrificados de turbinas eólicas, fornecendo dados em tempo real. Esse sistema permite à equipe em terra prever a degradação, antecipar problemas e tomar medidas corretivas antes que ocorram danos. A pesquisa combina a técnica de Manutenção Centrada em Confiabilidade com a técnica de monitoramento contínuo (MC), utilizando principalmente a análise de óleo. De acordo com os autores, a degradação do desempenho do óleo pode levar à deterioração rápida da lubrificação do motor, causando desgaste mecânico, corrosão e superaquecimento. Além disso, o óleo lubrificante pode indicar a condição de outros aspectos da operação, como a presença de partículas de desgaste, níveis de contaminantes e fuligem, que podem sinalizar problemas como a degradação dos rolamentos. Para investigar essas questões, uma configuração de teste foi desenvolvida na Universidade de Sunderland, baseada no sistema progressivo de sensores de óleo com identificação online estendida. Concluiu-se que, dado o caráter crítico da caixa de engrenagens, o uso do sistema proposto indicará a estratégia de manutenção ideal para minimizar custos e tempo de inatividade, melhorando a detecção de falhas e o agendamento da manutenção, permitindo reparos quando necessário.

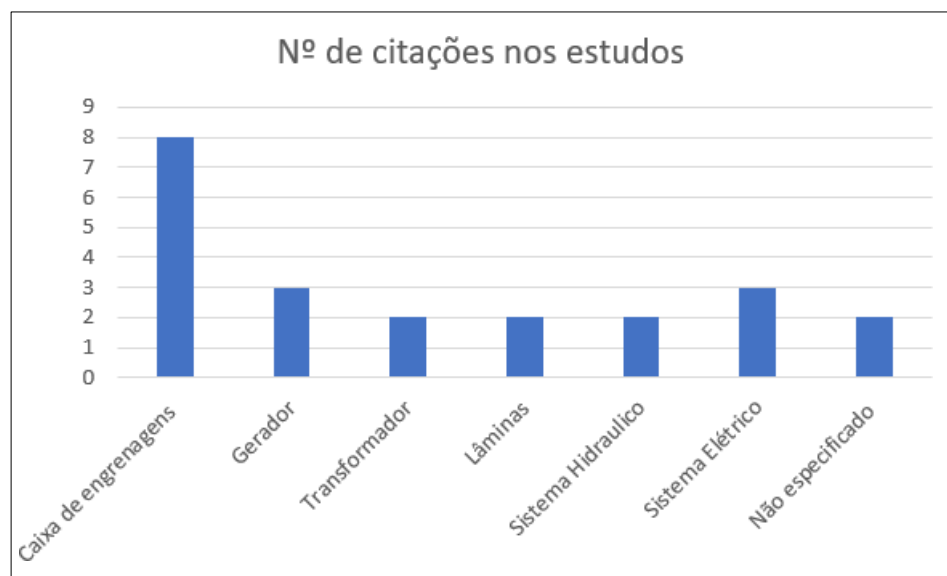
8 ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

Fica claro que, ao se limitar a base de dados Scopus, os resultados aqui obtidos possuem determinada limitação, uma vez que a base não aceita outros idiomas além do inglês e alguns trabalhos não podem ser acessados na íntegra. A utilização das palavras “RCM AND Wind Turbine” para a busca procurou filtrar, de modo claro, os resultados que tratassem de aplicações e estudos diretos da Manutenção Centrada na Confiabilidade a algum contexto industrial eólico que já está em pleno funcionamento, bem como trazer resultados claros que mostre as diretrizes fundamentais da manutenção das turbinas atualmente, tanto onshore quanto offshore.

Quanto as técnicas observadas, é possível perceber que existem equipamentos os quais são considerados críticos, cujas falhas podem significar uma parada total no funcionamento da turbina, assim como grandes danos aos seus sistemas, às pessoas e ao meio ambiente. Vale lembrar que o gerenciamento das falhas e o monitoramento das condições desses equipamentos ganhou destaque durante a observação dos artigos estudados, tendo em vista a grande complexidade de manutenção e logística envolvidos.

A figura 22 mostra o número de citações por equipamentos nos 10 artigos estudados.

Figura 22: Equipamentos mais citados nos artigos.



Fonte: Autor, 2024.

Como visto nos artigos estudados, as principais estratégias de MCC aplicadas a turbinas eólicas envolvem a implantação de sistemas de monitoramento de condições a

fim de monitorar em tempo real o mau funcionamento dos equipamentos e reduzir custos com paradas desnecessárias, especialmente em ambientes de difícil acesso como o offshore, demonstrado por Nilsson e Bertling (2007). O foco em componentes críticos como caixas de engrenagens e rolamentos, monitorados por sistemas de vibração e análise de óleo, se destaca em várias pesquisas, como a de Fischer *et al.* (2012) e Baglee *et al.*,(2016) que apontam a importância da detecção precoce de falhas nestes equipamentos.

A integração de dados fornecidos através sistemas SCADA para um monitoramento contínuo também é uma prática muito comum e recomendada. O trabalho de Yang e Jiang (2011), por exemplo, cita que essa integração facilita a criação de planos de manutenção mais eficientes e fomenta a criação de um banco de dados confiáveis que servirá para o histórico de falhas dos equipamentos. A utilização de ferramentas de apoio à decisão, modelagem de confiabilidade e métodos quantitativos para otimizar a manutenção preventiva, corretiva e baseada em condições é amplamente recomendada pelos autores, com destaque para o uso de inteligência artificial em ambientes offshore, discutido principalmente por Pattison *et al.* (2016). Por fim, a abordagem de Análise do Ciclo de Vida (LCC) e FMECA é bastante aplicada para avaliar o impacto das falhas e priorizar ações de manutenção, como demonstrado nos estudos de Andrawus *et al.* (2006) e Sainz e Sebastian (2013).

É importante destacar que uma busca rápida em outras bases de dados permite identificar que, no contexto atual, existem diversos sistemas de manutenção modernos para o gerenciamento da confiabilidade das turbinas e novos estão sendo avaliados a cada dia. No entanto, trazer à tona estes estudos não foi o objetivo deste trabalho, que se limitou apenas aos artigos mais citados da base de dados Scopus a fim de demonstrar as técnicas mais empregadas e difundidas na literatura.

9 CONCLUSÃO

Como o problema principal da pesquisa foi analisar os resultados dos artigos mais citados envolvendo a Manutenção Centrada em Confiabilidade de uma base de dados específica, este trabalho se propôs realizar uma revisão sistemática para determinar o quão avançado estão os estudos sobre o tema da manutenção centrada em confiabilidade em turbinas eólicas e quais as diretrizes a serem seguidas para alcançar as estratégias de manutenção mais eficientes.

Após a análise dos artigos mais citados na base de dados Scopus, foi possível identificar os modelos de manutenção atualmente adotados para implementar a gestão de ativos centrada na confiabilidade, com ênfase em turbinas eólicas. Foi possível fornecer ao leitor interessado, um ponto de vista acerca das aplicações mais consolidadas em diferentes contextos operacionais, podendo fornecer uma visão mais ampla para futuros trabalhos. Dessa forma, os objetivos da pesquisa foram cumpridos.

A metodologia da revisão sistemática permitiu filtrar os artigos assim como as informações relevantes de forma organizada com o objetivo de fornecer ao leitor informações úteis e de rápido acesso acerca dos resultados. Muito embora a Scopus permita publicações em diferentes idiomas, convém destacar a carência do Brasil em relação ao número de pesquisas, mesmo que o contexto eólico brasileiro tenha tido significativo crescimento nos últimos anos. Sendo assim, é de extrema importância o investimento em pesquisas para desenvolver tecnologias para melhor manutenção das turbinas no cenário nacional.

Como limitações da pesquisa podemos destacar a limitação a apenas uma base de dados para a coleta dos artigos, assim como a dificuldade do texto integral de alguns periódicos. Podemos destacar também o baixo número de artigos selecionados ocasionando a ausência de outros estudos relevantes. O critério de utilizar o número de citações como parâmetro de escolha também limitou os resultados, deixando de fora da análise artigos publicados recentemente e ainda pouco difundidos.

10 TRABALHOS FUTUROS

Diante das conclusões apresentadas, diversas oportunidades para trabalhos futuros se destacam. Primeiramente, recomenda-se:

- Expandir a revisão sistemática para incluir outras bases de dados como *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, e *Web of Science*, permitindo uma análise mais abrangente e comparativa dos estudos;
- Estudar o andamento das aplicações de MCC no cenário nacional, o que poderia contribuir significativamente para a competitividade e eficiência da indústria eólica brasileira.
- Verificar a aplicação de técnicas de inteligência artificial e *Machine Learning* para otimizar as práticas de MCC em aerogeradores, utilizando dados reais de

operação e manutenção. Buscar estudos que busquem integrar essas tecnologias podem oferecer soluções inovadoras e melhorar ainda mais a confiabilidade e a sustentabilidade das operações de energia eólica.

Além disso, considerando a observação da carência de pesquisas brasileiras sobre o tema, futuros estudos poderiam focar em incentivar e promover a pesquisa nacional, explorando especificamente o contexto das turbinas eólicas no Brasil.

Finalmente, recomenda-se que futuros trabalhos também abordem as limitações identificadas neste estudo, como o acesso restrito ao texto integral de certos periódicos, buscando colaborações institucionais que facilitem o acesso a uma gama mais ampla de publicações.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Manutenção mecânica industrial**: conceitos básicos e tecnologia aplicada. São Paulo: Saraiva, 2014.
- ANDRAWUS, Jesse A.; WATSON, John; KISHK, Mohammed; ADAM, Allan. The Selection of a suitable maintenance strategy for wind turbines. **Wind Engineering**, Delft, v. 30, n. 6, p. 471-486, dez. 2006. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1260/030952406779994141>
- ARAÚJO, Thiago Ticiano Aires de. **Operação, manutenção e análise de falhas em aerogeradores**. 2022. 88 f. TCC (Graduação em Engenharia de Produção) - Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/11837a31-1f76-4ce6-bcb2-b4f771ca4428/content>. Acesso em: 21 ago. 2024.
- AZEREDO, Giovana Camardelli Milhomens. **Metodologia baseada na Manutenção Centrada em confiabilidade (MCC) e sua aplicação em aerogeradores**: um estudo de caso. 2023. 149 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-14122023-143526/pt-br.php>. Acesso em: 05 jun. 2024
- BAGLEE, David; GALAR, Diego; KINNUNEN, Sini-Kaisu. A proposed maintenance strategy for a wind turbine gearbox using condition monitoring techniques. **International journal of process management and benchmarking**, Londres, v. 6, n. 3, p. 386-406, jan. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305077087_A_proposed_maintenance_strategy_for_a_wind_turbine_gearbox_using_condition_monitoring_techniques. Acesso em: 04 maio 2024.
- BARAN, Leandro Roberto. **Manutenção centrada em confiabilidade aplicada na redução de falhas**: um estudo de caso. 2011. 103 f. Monografia (Especialização em Gestão Industrial) - Especialista em Gestão Industrial: Produção e Manutenção, Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2011. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/23471/2/PG_CEGIPM_VII_2011_12.pdf Acesso em 07 jun. 2024.
- BRANDÃO, Roque Filipe Mesquita. Turbinas eólicas manutenção. **Neutro à terra**, Porto, v. 1, n. 8, p. 37-44, 09 jun. 2011. Disponível em: <https://parc.ipp.pt/index.php/neutroaterra/article/view/362/96>. Acesso em: 3 jul. 2024.
- CATELANI, Marcantonio; CIANI, Lorenzo; GALAR, Diego; PATRIZI, Gabriele. Optimizing maintenance policies for a yaw system using reliability-centered maintenance and data-driven condition monitoring. **IEEE Transactions on instrumentation and measurement**, Nova York, v. 69, n. 9, p. 6241-6249, set. 2020. Disponível em: <https://www-scopus-com.ez19.periodicos.capes.gov.br/record/display.uri?eid=2-s2.0-85089873478&origin=resultslist&sort=cp->

f&src=s&sid=7cb8ef61d94b94cf249bc83e2f74024c&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28rcm+AND+wind+turbine%29&sl=35&sessionSearchId=7cb8ef61d94b94cf249bc83e2f74024c&relpos=6. Acesso em: 15 jul. 2024.

CEVASCO, Debora; KOUKOURA, Sofia; KOLIOS, Athanasios J. Reliability, availability, maintainability data review for the identification of trends in offshore wind energy applications. **Renewable and sustainable energy reviews**, Glasgow, v. 136, n. 1, p. 1-21, fev. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120307012?via%3Dihub>. Acesso em: 25 ago. 2024.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Eólica**. Barueri: Manole, 2011. 288 p.

FISCHER, Katharina; BESNARD, Francois; BERTLING, Lina. Reliability-centered maintenance for wind turbines based on statistical analysis and practical experience. **IEEE Transactions on energy conversion**, Nova York, v. 27, n. 1, p. 184-195, mar. 2012. Institute of electrical and electronics engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tec.2011.2176129>

FOGLIATTO, Flávio Sanson; DUARTE, José Luis Ribeiro. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 267 p.

FONSECA, Gabriela; GREGÓRIO, Parreira; SANTOS, Danielle Freitas; PRATA, Auricélio Barros. **Engenharia de Manutenção**. São Paulo: Sagah, 2018. 196 p.

GALVÃO, Maria Cristiane Barbosa; RICARTE, Ivan Luiz Marques. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: CONCEITUAÇÃO, PRODUÇÃO E PUBLICAÇÃO. **Logeion: Filosofia da Informação**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p. 1-17, fev. 2019. Disponível em: <https://sites.usp.br/dms/wp-content/uploads/sites/575/2019/12/Revis%C3%A3o-Sistem%C3%A1tica-de-Literatura.pdf>. Acesso em: 05 maio 2024.

GONÇALVES JUNIOR, J.; RIBEIRO, M.; FRANCO, B. Custo de manutenção de ativos numa óptica operacional e estratégica no ambiente industrial. *In*: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 12., 2015, Resende. **Anais [...]** Volta Redonda: FASF, 2015. p. 1-13. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/23022234.pdf>. Acesso em 13 jun. 2024.

GURSK, Carlos Alberto. **Noções de confiabilidade e manutenção industrial**: curso de formação de operadores de refinaria noções de confiabilidade e manutenção industrial. Curitiba: Petrobras, 2002.

HOFFMANN, Wanda Aparecida Machado. Gestão do conhecimento e da informação em organizações baseados em inteligência competitiva. **Informação estratégica: Inteligência organizacional e competitiva**, Brasília, v. 45, n. 3, p. 31-43, fev. 2018. Disponível em: <https://revista.ibict.br/ciinf/article/view/4045/3564>. Acesso em: 17 ago. 2024.

IGBA, Joel; ALEMZADEH, Kazem; ANYANWU-EBO, Ike; GIBBONS, Paul; FRIIS,

John. A systems approach towards reliability-centred maintenance (RCM) of wind turbines. **Procedia computer science**, Bristol, v. 16, n. 1, p. 814-823, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2013.01.085>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257719561_A_Systems_Approach_Towards_Reliability-Centred_Maintenance_RCM_of_Wind_Turbines. Acesso em: 9 abr. 2024.

International energy agency. Energy System – Renewables. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind>. Acesso em: 1 set. 2024.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. Manutenção: função estratégica. 2a ed. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 341 pg.

LIMA JUNIOR, Antônio Luís; RODRIGUES, Orlânia Alves. **FMEA aplicado à manutenção**: revisão sistemática e análise crítica. 2022. 82 f. TCC (Graduação em Engenharia Automotiva) - Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasília, 2022. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/34041/1/2022_AntonioLimaJunior_OrlaniaRodrigues.pdf. Acesso em: 15 jul. 2024.

MARIANO, M. A.; ROCHA, F. J. **Revisão da literatura**: apresentação de uma abordagem integradora. *ResearchGate*, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319547360_Revisao_da_Literatura_Apresentacao_de_uma_Abordagem_Integradora. Acesso em: 8 set. 2024.

MISHAWAKA, Victor e OLMEDO, N. L. Manutenção - Combate aos Custos da Não Eficácia - A vez do Brasil. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1993.

MOUBRAY, John. **Reliability-Centered Maintenance**. 2. ed. Leicestershire: Butterworth-Heinemann, 1999. 448 p.

NILSSON, Julia; BERTLING, Lina. Maintenance management of wind power systems using condition monitoring systems—life cycle cost analysis for two case studies. **IEEE Transactions on energy conversion**, Nova York, v. 22, n. 1, p. 223-229, mar. 2007. Institute of electrical and electronics engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tec.2006.889623>. Disponível em: <https://www-scopus-com.ez19.periodicos.capes.gov.br/record/display.uri?eid=2-s2.0-33947708442&origin=resultslist&sort=cp-f&src=s&sid=760d5e47b9cd9e0947abdee003e6942e&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28rcm+AND+wind++turbine%29&sl=35&sessionSearchId=760d5e47b9cd9e0947abdee003e6942e&relpos=0>. Acesso em: 23 jul. 2024.

OLIVEIRA, Sérgio Filipe Pereira Saraiva de. **Análise do comportamento dos aerogeradores em situação de anomalia**. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) - Engenharia Electrotécnica - Sistemas Eléctricos de Energia, Isep, Porto, 2013. Disponível em: https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/6555/1/DM_SergioOliveira_2013_MEESE.pdf. Acesso em: 16 jun. 2024.

PAREDES, Manuel Antonio Minango. **Modelo para el análisis técnico-económico de la factibilidad de microcentrales eólicas para generación distribuida**. 2014. 108 f.

TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Quito, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281903643_Modelo_para_el_analisis_tecnico_economico_de_la_factibilidad_de_microcentrales_eolicas_para_generacion_distribuida Acesso em: 17 jul. 2024.

PATTISON, D.; GARCIA, M. Segovia; XIE, W.; QUAIL, F.; REVIE, M.; WHITFIELD, R. I.; IRVINE, I.. Intelligent integrated maintenance for wind power generation. **Wind Energy**, Glasgow, v. 19, n. 3, p. 547-562, 6 maio 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/we.1850>. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/we.1850?getft_integrator=scopus&src=getftr&utm_source=scopus. Acesso em: 1 ago. 2024. PINTO, Milton. Fundamentos de Energia Eólica. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2012. E-book. ISBN 978-85-216-2193-5. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2193-5/>. Acesso em: 04 set. 2024.

SAINZ, J.A.; SEBASTIÁN, M.A.. Methodology for the maintenance centered on the reliability on facilities of low accessibility. **Procedia Engineering**, Amsterdã, v. 63, p. 852-860, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.279>. Disponível em: <https://www-scopus-com.ez19.periodicos.capes.gov.br/record/display.uri?eid=2-s2.0-84888878494&origin=resultslist&sort=cp-f&src=s&sid=760d5e47b9cd9e0947abdee003e6942e&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28rcm+AND+wind++turbine%29&sl=35&sessionSearchId=760d5e47b9cd9e0947abdee003e6942e&relpos=13>. Acesso em: 17 ago. 2024.

SILVA, Balbiere Barbosa da; AZEREDO, Denis Paulo da Silva. Aerogeradores, conceitos das turbinas e suas principais tecnologias. **Bolsista de valor**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 239-242, 23 jan. 2012. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/view/1842>. Acesso em: 14 set. 2024.

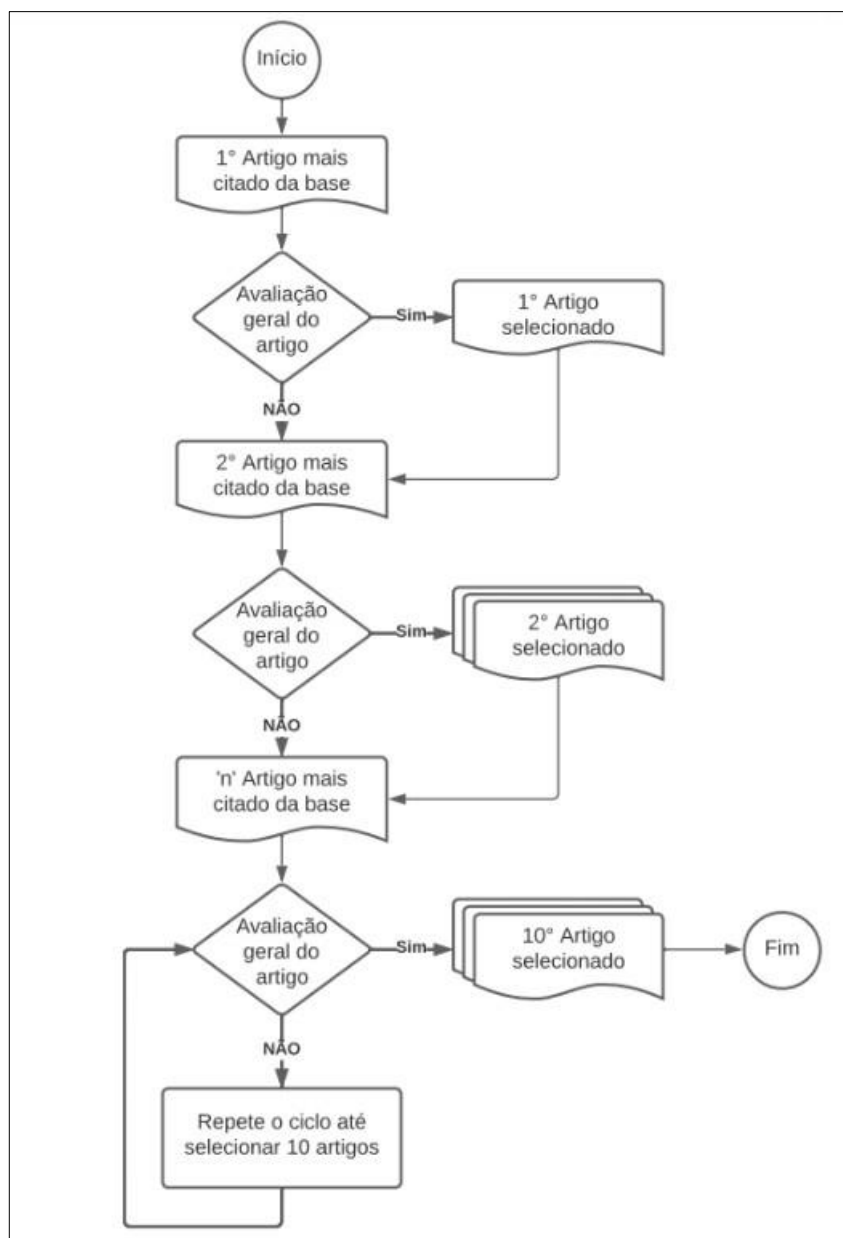
SIQUEIRA, Iony Patriota. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**: manual de implementação. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

VIAN, Ângelo; TAHAN, Carlos Marcio Vieira; AGUILAR, Guido Javier Rostegui; GOUVEA, Marcos Roberto; GEMIGNANI, Matheus Mingatos Fernandes. **Energia eólica fundamentos, tecnologia e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2021.

YANG, W.; JIANG, J. Wind turbine condition monitoring and reliability analysis by SCADA information. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANIC AUTOMATION AND CONTROL ENGINEERING*, 2., 2011, Hohhot. **Anais [...] Hohhot: Renewable Energy**, 2013. p. 365-376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.030>. Disponível em: Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5987329>. Acesso em: 25 abr. 2024.

ZHU, Caichao; LI, Yao. Reliability Analysis of Wind Turbines. *In: OKEDU, Kenneth Eloghene. Stability control and reliable performance of wind turbines*. Londres: Intechopen, 2018. p. 169-178.

APÊNDICE A – PASSO À PASSO DA SELEÇÃO DOS ARTIGOS



Fonte: Lima Junior e Rodrigues, 2022.