



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

WESLEY GONÇALVES DOS SANTOS

**PANORAMA DA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE PARQUES
EÓLICOS NO BRASIL**

Fortaleza

2022

WESLEY GONÇALVES DOS SANTOS

PANORAMA DA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE PARQUES EÓLICOS NO BRASIL

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Fortaleza

2022

WESLEY GONÇALVES DOS SANTOS

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

S239p Santos, Wesley Gonçalves dos.
Panorama da operação e manutenção de parques eólicos no Brasil / Wesley Gonçalves dos Santos. – 2022.
76 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

1. Parque eólico. 2. Operação e manutenção. 3. Indicadores de desempenho. 4. Gestão da Manutenção. I.
Título.

CDD 621.3

PANORAMA DA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE PARQUES EÓLICOS NO BRASIL

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Aprovada em: __/__/__

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Jean Davi Simplicio de Queiroz
GOLDWIND BRASIL

*“Mas em todas estas coisas somos mais que vencedores, por meio daquele que nos amou.”
Romanos 8:37*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela vida e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos aos quais me deparei no decorrer da minha trajetória.

Aos meus pais, Sheila e Wellington, por todo o amor, carinho, cuidado e dedicação em minha formação. Jamais teria conseguido sem vocês e é por isso que eu lhes dedico tudo o que eu me tornei.

À minha namorada e futura esposa, Emanuelle, por todo o amor, cuidado, amizade, parceria, cumplicidade e compreensão, que foram fundamentais para a realização das diversas conquistas em minha vida.

Ao meu padrasto, Jesus, que participou e contribuiu para a minha formação, onde sempre será um grande exemplo para a minha vida.

Aos meus amigos Mario Anderson, Miguel Casemiro e Lucas Costa, que sempre estiveram presentes na minha trajetória acadêmica, onde evoluímos juntos e cooperamos para engrandecimento simultâneo de todos.

Ao Jean Davi, por toda a confiança, ensinamentos e contribuição para a minha evolução profissional e humana, e por ter auxiliado nos meus primeiros passos na vida profissional.

Ao meu orientador do TCC, Prof. Dr. Paulo Carvalho, por todo apoio, paciência e ajuda na elaboração e revisão do meu trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Fernando Antunes, por ter aceitado fazer parte da banca, e pelas contribuições e sugestões.

RESUMO

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a capacidade instalada de parques eólicos no Brasil atingiu a marca de 21,6 GW no final de 2021, com 795 parques eólicos e 9.176 aerogeradores em operação, alcançando a segunda posição na matriz de energia elétrica brasileira. A fase de operação e manutenção (O&M) é destaque no setor, pois é responsável por assegurar a operação dos parques eólicos de forma segura e confiável. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o panorama do setor de O&M de parques eólicos *onshore* no Brasil, para mostrar a importância da gestão de O&M no desempenho das usinas. Primeiramente, através de revisão na literatura, são apresentados os fundamentos da geração eólico-elétrica e os subsistemas que compõem um complexo eólico. Posteriormente são abordados, de forma abrangente, aspectos como gestão organizacional, planejamento da manutenção, gestão de contratos, cadeia de suprimentos e monitoramento da operação, que impactam no desempenho da gestão da O&M. São apresentadas as principais vantagens e desvantagens dos métodos de manutenção aplicados aos parques, com base nos custos e eficiência das atividades de manutenção, contemplando os custos de mão de obra e peças de reposição, qualidade da execução da manutenção e custo de não geração, causado pela indisponibilidade dos subsistemas. Por fim, é proposto um conjunto de indicadores para a análise de desempenho, agrupados pelas dimensões Financeira (5 indicadores), Energia Gerada (8 indicadores), Operação e Manutenção (5 indicadores) e Pessoas (2 indicadores). Dessa forma, conclui-se que uma boa gestão é capaz de minimizar os custos e otimizar o desempenho das atividades de O&M, sem comprometer a eficiência operacional dos parques eólicos.

Palavras-Chaves: Parque Eólico; Operação e Manutenção; Indicadores de Desempenho; Gestão da Manutenção.

ABSTRACT

According to the Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), the installed capacity of wind farms in Brazil reached the mark of 21.6 GW at the end of 2021, with 795 wind farms and 9,176 wind turbines in operation, reaching the second position in the matrix of Brazilian electricity. The operation and maintenance (O&M) phase stands out in the sector, as it is responsible for ensuring the safe and reliable operation of wind farms. In this context, the present work aims to analyze the panorama of the O&M sector of onshore wind farms in Brazil, to show the importance of O&M management in the performance of the plants. First, through a literature review, the fundamentals of wind-electric generation and the subsystems that make up a wind complex are presented. Subsequently, aspects such as organizational management, maintenance planning, contract management, supply chain and operation monitoring, which impact the performance of O&M management, are discussed in a comprehensive manner. The main advantages and disadvantages of the maintenance methods applied to parks are presented, based on the costs and efficiency of maintenance activities, including the costs of labor and spare parts, quality of maintenance execution and the cost of non-generation, caused by due to the unavailability of the subsystems. Finally, a set of indicators for performance analysis is proposed, grouped by the Financial dimensions (5 indicators), Energy Generated (8 indicators), Operation and Maintenance (5 indicators) and People (2 indicators). Thus, it is concluded that good management is capable of minimizing costs and optimizing the performance of O&M activities, without compromising the operational efficiency of wind farms.

Keywords: Wind Farm; Operation and Maintenance; Performance Indicators; Maintenance Management

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de potência típica de um aerogerador.	21
Figura 2 - Princípio de conversão de energia na fonte eólica.....	23
Figura 3 – Exemplo de complexo eólico dividido por parques.	24
Figura 4 – Equipamentos e componentes de um aerogerador.	26
Figura 5 – Rede de média tensão.....	27
Figura 6 – Subestação coletora.....	28
Figura 7 – Estrutura de uma linha de transmissão.....	30
Figura 8 - Esquema resumido do método de pesquisa.	31
Figura 9 – Indicadores que compõem as dimensões de desempenho.	34
Figura 10 - Estrutura da pesquisa.	38
Figura 11 - Estrutura da base de dados.....	39
Figura 12 – Técnicas de manutenção.	44
Figura 13 – Boroscopia em caixa de engrenagens.	49
Figura 14 – Inspeção termográfica.	50
Figura 15 – Análise de vibrações de um componente rotativo.....	52
Figura 16 – Relação entre impacto e ocorrências de falhas em parques eólicos.....	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Participação das fontes de energia na matriz elétrica brasileira em 2021.....	17
Gráfico 2 - Fator de Capacidade médio no Brasil em 2021.	23
Gráfico 3 - Dificuldades antes da contratação do serviço.	36
Gráfico 4 - Dificuldades durante a contratação do serviço.	37
Gráfico 5 - Dificuldades após a contratação do serviço.	37
Gráfico 6 - Divisão de alarmes por tipo de manutenção.	40
Gráfico 7 - Proporção de falhas em aerogeradores por subsistema.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre capacidade	18
Tabela 2 - Relação entre capacidade	18
Tabela 3 - Média do MTBF por alarme.....	40
Tabela 4 - Média do MTBF por alarme.....	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo dos indicadores adotados pelas empresas do estudo de casos.	32
Quadro 2 - Fatores de influência no desempenho de parques eólicos.....	33
Quadro 3 - Critérios de seleção de fornecedores por ordem de prioridade.	35

LISTA DE SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
BOP	<i>Balance of Plant</i>
CA	Custos Administrativos
CFTV	Circuito Fechado de Televisão
CGU	Custo de Geração Unitário
CMU	Custo de Manutenção Unitária
CO&M	Custos de O&M
CO2	Dióxido de carbono
COG	Centro de Operação de geração
CP	Curva de Potência
CTF	Custo Total de Falha
DE	Disponibilidade de Energia
DT	Disponibilidade de Tempo
EAP	Estimativa anual de produção
EB	Energia Bruta
EC	Energia Contratada
EL	Energia Líquida
EPE	Empresa de pesquisa energética
EPI	Equipamento de proteção individual
ET	Eficiência da Turbina
FC	Fator de Capacidade
FFT	Transformada rápida de Fourier

HC	Horas de Capacitação
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano do Município
ISP	<i>Independent Service Provider</i>
LU	Lucro Unitário
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
NF	Número de Falhas
O&M	Operação e manutenção
ONS	Operador Nacional do Sistema
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
PCH	Pequena central hidroelétrica
PEPC	Perdas Elétricas até o Ponto de Conexão
PIB	Produto interno bruto
PROINFA	Programa de Incentivo a Fontes Alternativas
RB	Receita Bruta
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SF6	Hexafluoreto de enxofre
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMD	Sistema de medição de desempenho
TC	Transformador de corrente
TMEF	Tempo Médio Entre Falhas
TMR	Tempo Médio de Reparo
TP	Transformador de potencial
TR	Taxa de Rotatividade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 MOTIVAÇÃO	19
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1.3 ORGANIZAÇÃO	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 FUNDAMENTOS DA GERAÇÃO EÓLICA	21
2.2 ESTRUTURA DE UM PARQUE EÓLICO	23
2.2.1 AEROGERADORES.....	24
2.2.2 REDE DE MÉDIA TENSÃO	26
2.2.3 SUBESTAÇÃO COLETORA	27
2.2.4 LINHA DE TRANSMISSÃO	29
3. ESTADO DA ARTE	31
4. GESTÃO DA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE PARQUES EÓLICOS	42
4.1 GESTÃO ORGANIZACIONAL.....	42
4.2 GESTÃO E PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO.....	43
4.2.1 MANUTENÇÃO CORRETIVA.....	44
4.2.1.1 PRINCIPAIS AVARIAS EM AEROGERADORES.....	45
4.2.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA.....	46
4.2.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	47
4.2.3.1 INSPEÇÕES.....	48
4.2.3.1.1 BOROSCOPIA.....	48
4.2.3.1.2 TERMOGRAFIA.....	49
4.2.3.1.3 INSPEÇÃO NAS PÁS.....	50
4.2.3.2 MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES	50
4.2.3.2.1 ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTE	51
4.2.3.2.2 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES.....	51
4.2.3.2.3 MONITORAMENTO DA TEMPERATURA	52
4.2.3.2.4 MÉTODOS BASEADO EM SCADA.....	52
4.3 MODELOS DE CONTRATO DE MANUTENÇÃO.....	53
4.3.1 CONTRATOS EM AEROGERADORES	54

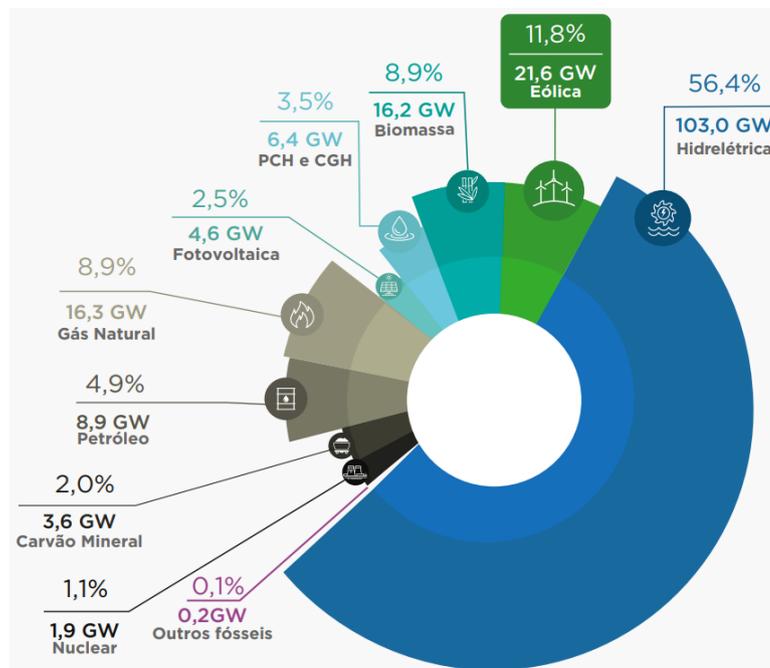
4.3.2 CONTRATOS NO BOP ELÉTRICO	55
4.4 CADEIA DE SUPRIMENTOS	56
4.5 MONITORAMENTO E CONTROLE DA OPERAÇÃO	59
4.6 INDICADORES DE DESEMPENHO	61
4.6.1 INDICADORES FINANCEIROS	61
4.6.1.1 RECEITA BRUTA - RB	61
4.6.1.2 CUSTOS ADMINISTRATIVOS – CA.....	62
4.6.1.3 CUSTOS DE O&M – Co&M.....	62
4.6.1.4 CUSTO DE GERAÇÃO UNITÁRIO - CGU	62
4.6.1.5 LUCRO UNITÁRIO – LU.....	63
4.6.2 INDICADORES DE ENERGIA GERADA.....	63
4.6.2.1 ENERGIA CONTRATADA – EC.....	64
4.6.2.2 ENERGIA BRUTA – EB	64
4.6.2.3 PERDAS ELÉTRICAS ATÉ O PONTO DE CONEXÃO – PEPC.....	64
4.6.2.4 ENERGIA LÍQUIDA – EL	65
4.6.2.5 FATOR DE CAPACIDADE – FC (%).....	66
4.6.2.6 DISPONIBILIDADE DE TEMPO – DT (%).....	66
4.6.2.7 DISPONIBILIDADE DE ENERGIA – DE (%)	67
4.6.2.8 EFICIÊNCIA DA TURBINA – ET (%).....	68
4.6.3 INDICADORES DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO	69
4.6.3.1 NÚMERO DE FALHAS – NF (FALHAS/ANO).....	69
4.6.3.2 TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS – TMEF (H).....	70
4.6.3.3 TEMPO MÉDIO DE REPARO – TMR (H).....	71
4.6.3.4 CUSTO TOTAL DE FALHA – CTF (R\$)	71
4.6.3.5 CUSTO DE MANUTENÇÃO UNITÁRIO – CMU.....	72
4.6.4 INDICADORES DE PESSOAS.....	72
4.6.4.1 HORAS DE CAPACITAÇÃO – HC (H/ANO)	72
4.6.4.2 TAXA DE ROTATIVIDADE – TR (%).....	73
CONCLUSÕES	74
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

Em 2001, a estimativa do potencial eólico no Brasil era de 143 GW, considerando torres de até 50 m de altura. Com o desenvolvimento do setor e aumento da altura das torres, esse potencial pode chegar a 350 GW (BRASIL, 2016). O Brasil tem vantagem em relação a outros países no aproveitamento do potencial eólico em função principalmente da velocidade média dos ventos (8,5 m/s no Nordeste e 7 m/s no Rio Grande do Sul) e na baixa variabilidade na direção em curto espaço de tempo (CAMARGO, 2015). Além disso, o Brasil conta com um fator de capacidade médio de 40,6%, notoriamente acima dos 34% do fator de capacidade médio mundial, podendo alcançar cerca de 60% durante a “safra dos ventos”, período que compreende julho a novembro (ABEÉOLICA, 2020). Por conta principalmente dessas características o país vem recebendo investimento massivo no setor ao longo dos últimos anos.

Considerando todas as fontes de geração de energia elétrica, em 2021, foram instalados 7,5 GW de potência e a eólica foi a que mais cresceu. Com isso, houve um aumento na participação da fonte eólica na matriz elétrica, alcançando a marca de 11,8% (ABEÉOLICA, 2021). O Gráfico 1 mostra a participação das principais fontes na matriz elétrica brasileira.

Gráfico 1 - Participação das fontes de energia na matriz elétrica brasileira em 2021.



Fonte: ABEÉOLICA (2021).

De acordo com dados da BNEF (Bloomberg New Energy Finance, 2021), o Brasil terminou o ano de 2021 com um investimento do setor eólico de US\$ 5,15 bilhões, que equivalem a R\$ 27,81 bilhões, representando 44% dos investimentos realizados em renováveis (solar, eólica, biocombustíveis, biomassa e resíduos, PCH e outros). Como consequência, o país teve um crescimento de 21,53% de potência em relação ao último ano, pois segundo dados da ABEEÓLICA (2021), a fonte eólica terminou o ano com 795 usinas em operação, com 21,57 GW de potência eólica instalada, frente aos 17,75 GW de capacidade instalada em 2020.

O Brasil também é destaque ao analisar o cenário mundial. Ao final de 2021 o país ocupa a sexta posição entre os países com as maiores capacidade instalada, conforme a tabela 1. No ano de 2021 o desempenho é ainda maior, sendo o terceiro país que mais expandiu a sua capacidade no ano, como disposto na tabela 2 (GWEC, 2022). Isso mostra a força do mercado eólico brasileiro, que mesmo em meio a pandemia do coronavírus, apresentou ótimos resultados.

Tabela 1 - Relação entre capacidade Instalada acumulada até 2021 entre os países.

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

Fonte: GWEC (2021).

Tabela 2 - Relação entre capacidade Instalada em 2021 entre os países.

POSIÇÃO	PAÍS	Nova capacidade onshore instalada no ano (GW)
1	China	30,7
2	EUA	12,7
3	Brasil	3,8
4	Vietnã	2,7
5	Suécia	2,1
6	Alemanha	1,9
7	Austrália	1,7
8	Índia	1,5
9	Turquia	1,4
10	França	1,2

Fonte: GWEC (2021).

Em relação ao panorama no Ceará em 2021, entraram em operação 9 parques eólicos, o equivalente a 210 MW, que resulta em uma capacidade instalada acumulada de 2,5 GW. O estado também é destaque no volume de geração pois, em 2021, gerou 7,91 TWh de energia elétrica através da fonte eólica.

Além de ser uma fonte com reduzido impacto ambiental ao longo de sua implantação, a eólica não emite dióxido de carbono (CO₂) em sua operação. Segundo dados da ABEEÓLICA (2021), somente no ano de 2021 a fonte eólica evitou a emissão de 34,4 milhões de toneladas de CO₂, o equivalente a emissão anual de cerca de 34 milhões de automóveis. O estudo realizado pela GO Associados (2020) revela que a instalação e operação de parques eólicos também contribui para o aumento do Produto Interno Bruto (PIB) e do índice de

Desenvolvimento Humano do Município (IDHM), o que gera mais empregos e aumenta a qualidade de vida das pessoas.

1.1 Motivação

O crescimento das fontes renováveis no País é uma realidade. E a eólica, nos últimos anos, foi uma das que mais ganhou relevância na composição da matriz elétrica, deixando de ser uma fonte alternativa, tornando-se fundamental para o abastecimento energético do Brasil (EPE, 2021).

Mesmo com todos os avanços alcançados pela fonte eólica, o setor deve enfrentar diversos desafios para continuar crescendo. É necessária a consolidação da cadeia produtiva de fornecedores de bens e serviços para atender toda a demanda que o setor eólico exige, especialmente com um padrão de qualidade elevado e que atenda às principais normas internacionais.

Outro aspecto relevante e que impacta diretamente no sucesso da fonte eólica está relacionado à eficiência operacional das usinas. A gestão da operação e manutenção (O&M) tem como principal objetivo minimizar os custos totais por unidade de eletricidade gerada durante a vida útil do empreendimento (SANTIAGO, 2021). Entretanto, para alcançar tal objetivo em um mercado cada vez mais competitivo, exige-se o fortalecimento da gestão organizacional e investimentos em novas tecnologias, que buscam aumentar o desempenho e a confiabilidade dos parques eólicos.

Nesse contexto, o presente estudo tem como motivação expor as principais características do setor eólico na fase de operação, com o foco em mostrar o impacto da gestão da O&M no desempenho dos parques e as estratégias adotadas pelas empresas para fortalecer e tornar a fonte eólica ainda mais competitiva frente às demais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o panorama do setor de O&M de parques eólicos para mostrar a importância da gestão de O&M no desempenho das usinas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o panorama geral da O&M do setor eólico no Brasil;
- Definir as principais vantagens e desvantagens dos tipos de manutenção aplicados aos parques eólicos;
- Definir os principais indicadores para análise de desempenho, desde aspectos técnicos na execução das manutenções até atividades gerenciais que definem as estratégias de O&M aplicadas nos parques eólicos.

1.3 Organização

O presente estudo é composto por cinco capítulos, classificados da seguinte maneira:

Capítulo 1: Introdução geral do panorama da energia eólica no Brasil e no mundo, motivação para o desenvolvimento do trabalho, estabelecendo o objetivo geral, específicos e organização.

Capítulo 2: Revisão da literatura sobre os fundamentos de energia eólica e a estrutura física de um parque eólico em operação.

Capítulo 3: Estudo do estado da arte, analisando os principais fatores que impactam no desempenho da operação e manutenção, através de diversos estudos de caso.

Capítulo 4: Análise dos principais fatores relacionados à gestão da operação e manutenção de parques eólicos, abordando aspectos como gestão organizacional, planejamento da manutenção, cadeia de suprimentos, monitoramento da operação e indicadores de desempenho.

Conclusões: Nesse tópico é apresentado as principais conclusões obtidas pelo trabalho, com base nos objetivos gerais e específico.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

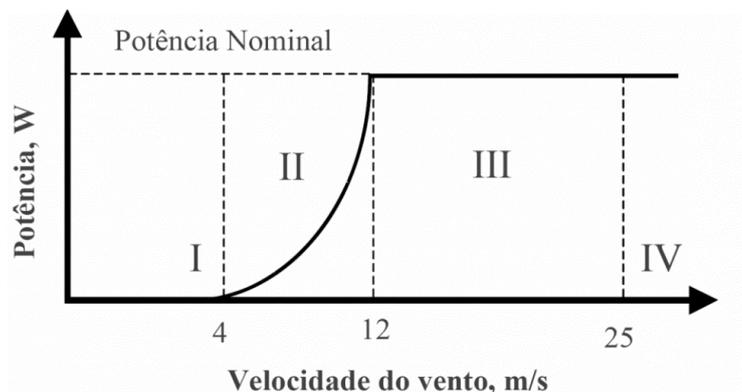
O presente capítulo destina-se a apresentar uma fundamentação teórica com base na literatura de geração de energia eólica. Serão apresentados conceitos fundamentais da energia eólica, atrelados principalmente a fase de operação das usinas. Além disso, o capítulo discorrerá sobre as características da estrutura de um parque eólico, pois a operação e manutenção é aplicada de maneira específica para cada subsistema.

2.1 Fundamentos da geração eólica

Segundo Pinto (2014), turbinas eólicas são equipamentos que absorvem parte da energia cinética do vento, convertendo-a em energia mecânica por meio das pás eólicas, que é convertida em energia elétrica através de um gerador elétrico acoplado ao rotor. As turbinas eólicas evoluíram conforme o avanço da tecnologia e da engenharia, que permitiu melhoras significativas no design, eficiência e capacidade instalada.

Com o desenvolvimento de muitos modelos de turbinas eólicas ao longo dos anos, na busca pelo design ideal, o que se consolidou no mercado são os aerogeradores de eixo horizontal com três pás uniformemente espaçadas (PINTO, 2014). As turbinas normalmente operam com velocidade de vento a partir de 3 m/s até 25 m/s, sendo esse definido como um valor limite que garante a integridade da estrutura e fundação do aerogerador. Os modelos atuais controlam a potência de energia gerada de acordo com a velocidade do vento, através do controle angular de ataque das pás, conhecido como controle de passo (*pitch control*). Esse sistema permite a construção da curva de potência típica do aerogerador, conforme a Figura 1.

Figura 1 - Curva de potência típica de um aerogerador.



Fonte: RESENDE (2018).

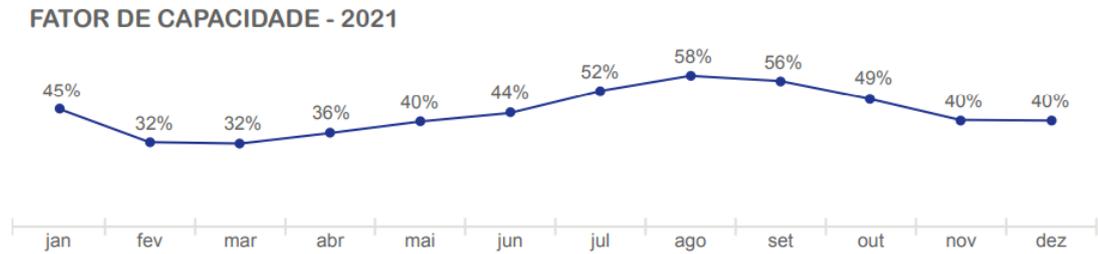
Segundo a IEC (2005) as características de performance de um aerogerador são determinadas por sua curva de potência (CP) e estimativa anual de produção (EAP). A curva de potência apresenta a relação em regime permanente entre a potência elétrica produzida pelo aerogerador e a velocidade de vento incidente na altura do cubo.

Pode-se dividir a CP em quatro regiões, em que cada uma possui características distintas. Na região I, o aerogerador não entra em operação, pois a velocidade de vento não tem energia suficiente para acionar o sistema. A região II permite a operação com potência variável, a depender da velocidade do vento. Já na região III, o aerogerador opera com a sua potência nominal independente da velocidade do vento variar, contanto que não saia da faixa estabelecida. Por fim, na região IV, o sistema de *pitch* atua no ângulo de ataque das pás, causando a parada da turbina. Isso é feito pois não seria viável financeiramente dimensionar a estrutura do aerogerador para suportar os esforços causados por essa condição, já que essas velocidades de vento ocorrem esporadicamente (RESENDE, 2018).

Outro aspecto importante e amplamente usado na indústria eólica é o fator de capacidade. Segundo Pavinatto (2005), o fator de capacidade geralmente é usado para comparar o desempenho de aerogeradores conjuntamente com as características do local da instalação. O seu significado pode ser interpretado como o percentual de aproveitamento, efetivo ou estimado, do total da potência máxima instalada. Em outros termos, significa a porcentagem da eletricidade gerada em relação a máxima produzida considerando uma operação constante à potência nominal. Esse índice mostra o quão forte é o potencial eólico brasileiro, que em 2021 apresentou um fator de capacidade médio de 40%, bem superior aos 34% da média mundial (ABEEÓLICA, 2021).

Durante a “safra dos ventos”, que corresponde ao período de julho a novembro do ano, o fator de capacidade brasileiro passa dos 50% (ABEEÓLICA, 2021). Esse fenômeno ocorre principalmente no Nordeste, que representa cerca de 90% da capacidade instalada no Brasil (BNB, 2020). Tal cenário torna a energia eólica ainda mais importante para o suprimento elétrico do país, pois assim a fonte consegue compensar de certa forma a escassez hídrica no segundo semestre do ano, que acaba diminuindo a produção de energia elétrica pelas hidroelétricas. O gráfico 2 mostra o fator de capacidade por mês no ano de 2021.

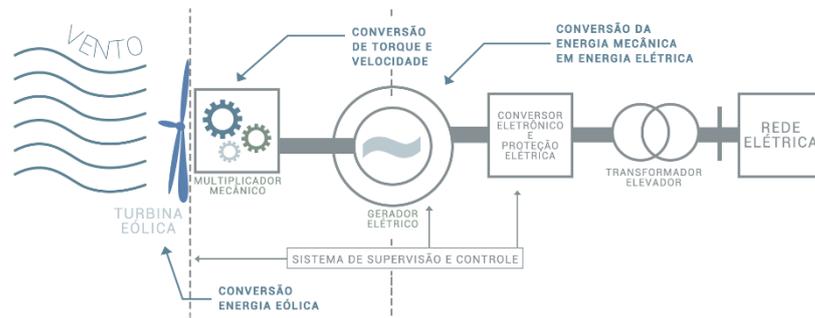
Gráfico 2 - Fator de Capacidade médio no Brasil em 2021.



Fonte: ABEEÓLICA (2021).

O princípio básico de funcionamento de um aerogerador consiste na conversão da energia proveniente dos ventos em energia elétrica. Essa conversão segue duas etapas: 1) primeiramente na turbina, que absorve uma parte da energia cinética disponível para conversão em energia mecânica, e 2) no gerador, que recebe a energia mecânica e a converte em energia elétrica (PINTO, 2014). A Figura 2 resume princípio da conversão de energia eólica.

Figura 2 - Princípio de conversão de energia na fonte eólica.

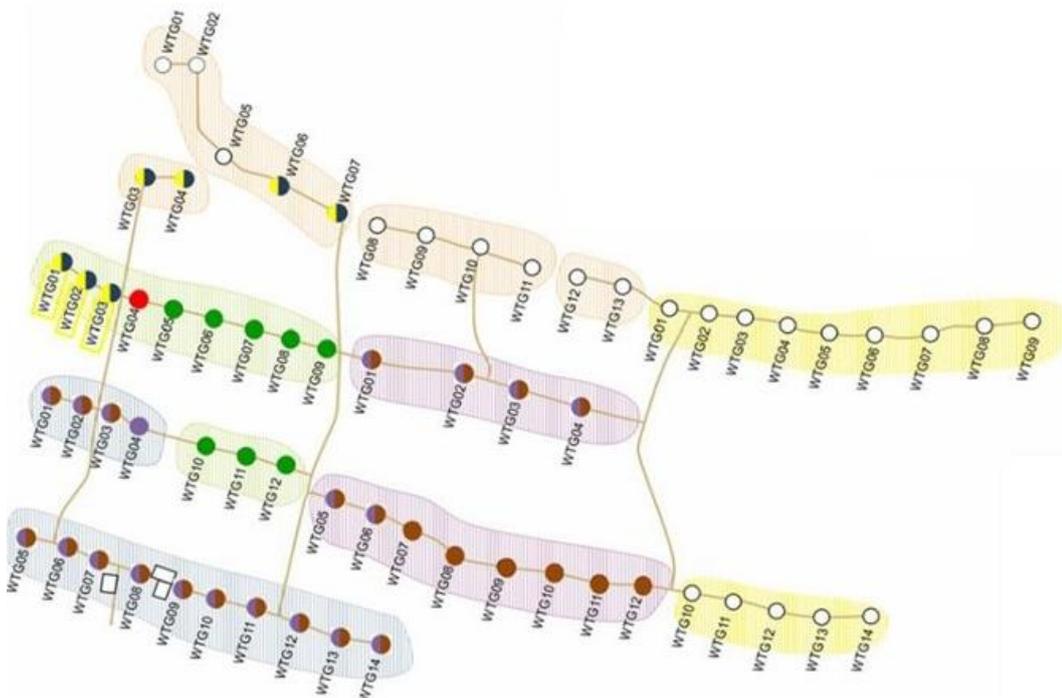


Fonte: VOLTA ENERGIA SUSTENTÁVEL (2020).

2.2 Estrutura de um parque eólico

Os parques eólicos ou complexos eólicos referem-se ao agrupamento de vários aerogeradores individuais conectados através de uma rede de distribuição e posteriormente na rede de transmissão de energia elétrica (SILVA, 2019). Geralmente os empreendimentos eólicos são denominados de complexo eólico, que agrupam um ou mais conjuntos de aerogeradores, chamado de parque eólico. A Figura 3 exemplifica essa divisão.

Figura 3 – Exemplo de complexo eólico dividido por parques.



Fonte: O próprio autor.

A estrutura básica de um parque eólico pode ser dividida em quatro subsistemas, que são: o aerogerador; rede de média tensão; subestação coletora; linha de transmissão. A seguir serão descritos as características e finalidades de cada subsistema.

2.2.1 Aerogeradores

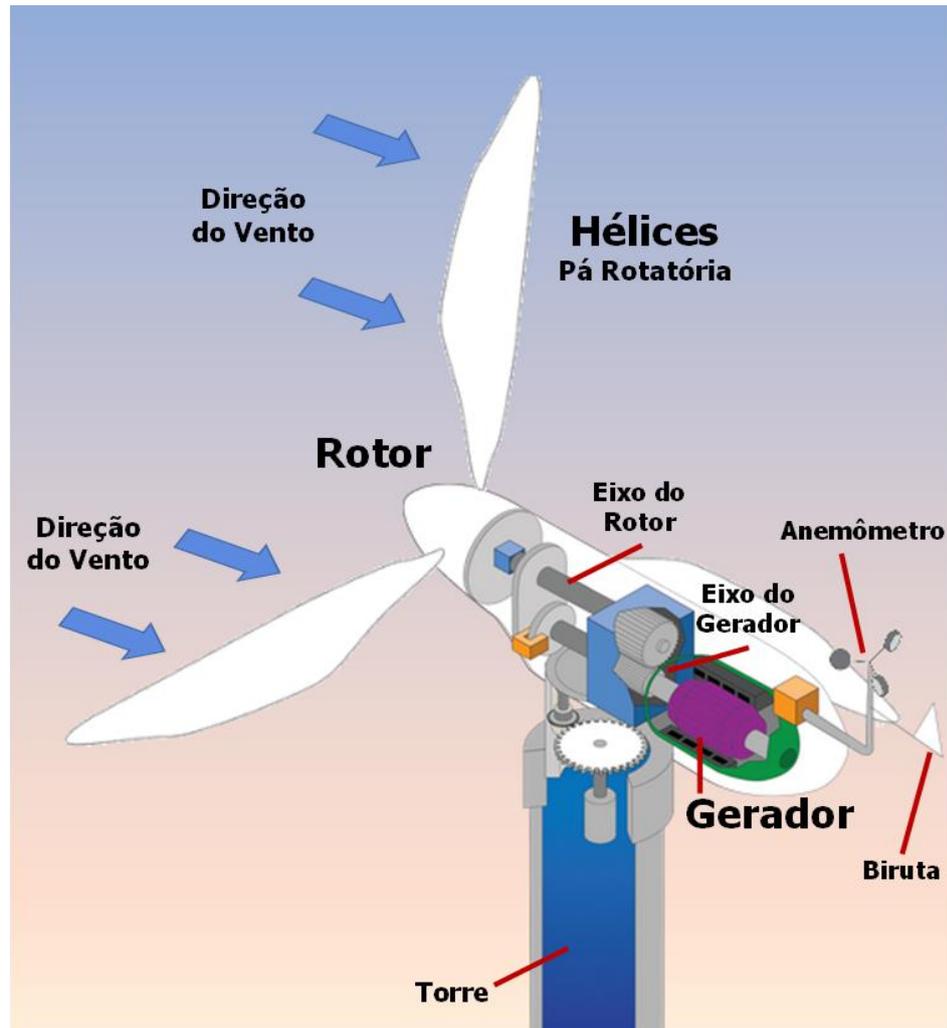
A turbina eólica, ou aerogerador, é uma máquina eólica que absorve parte da potência cinética do vento através de um rotor aerodinâmico, convertendo-a em potência mecânica de eixo (torque x rotação), que, por sua vez, é convertida em potência elétrica (tensão x corrente) através de um gerador elétrico (ALVES, 2016).

Os componentes em um aerogerador variam de acordo com o modelo e o fabricante. Alguns modelos não possuem caixa multiplicadora, denominados *direct drive*, em que o rotor é conectado diretamente ao gerador elétrico. O sistema elétrico também pode variar de acordo com o modelo, em que existem diversas topologias de eletrônica de potência que faz a interface do gerador com a rede elétrica. A seguir, serão apresentados os principais componentes presentes em um aerogerador e uma breve descrição sobre as suas funcionalidades.

- **Rotor:** É a estrutura que absorve parte da energia cinética do vento, sendo composto pelo conjunto das pás que são presas pelo hub. É por meio do rotor que se transfere a energia mecânica através do torque para o eixo principal.
- **Nacele:** Estrutura que comporta os componentes mecânicos e elétricos da turbina, como a caixa multiplicadora, gerador e sistemas eletrônicos. Sua finalidade é proteger esses componentes das condições ambientais.
- **Yaw:** Sistema responsável pela rotação da nacele. Com a mudança da direção do vento, o sistema de *yaw* rotaciona a nacele de modo a deixá-la perpendicular à direção de incidência do vento.
- **Torre:** É uma estrutura de aço ou concreto que permite posicionar a nacele e o rotor em elevadas alturas. Sua arquitetura mais comum é no modelo cônico tubular feito a partir de seções de aço.
- **Sistema de transmissão mecânico:** É composto pelo rolamento principal e a caixa multiplicadora. O eixo principal transmite o torque mecânico gerado a partir da rotação do rotor em baixa frequência. A caixa multiplicadora é responsável por elevar essa frequência até a rotação nominal do gerador. Alguns modelos de aerogeradores dispensam o uso de caixa multiplicadora, conectando o rolamento principal diretamente no gerador.
- **Sistema de conversão elétrico:** Contempla todos os componentes elétricos responsáveis pela conversão da energia mecânica em elétrica, conexão e controle com a rede.

Todos esses sistemas e componentes estão visíveis na Figura 4.

Figura 4 – Equipamentos e componentes de um aerogerador.



Fonte: CBIE (2020).

Antes de se conectar à rede de média tensão do parque, a tensão gerada pelo gerador, geralmente em 600 V é elevada para um nível de média tensão, a partir de 1 kV até o valor de 36,2 kV. A depender do modelo do aerogerador, a transformação de tensão acontece por meio de um transformador elétrico localizado na torre ou em uma cabine de alvenaria externa à torre, chamada de cabine unitária. A partir desse ponto a energia é coletada pela rede de média tensão.

2.2.2 Rede de média tensão

A rede de média tensão é responsável pelo escoamento da energia gerada nas turbinas até a subestação. É constituída por um ou mais circuitos, em que cada circuito interliga um grupo de aerogeradores. A Figura 5 mostra uma rede de média tensão aérea de um parque eólico.

Figura 5 – Rede de média tensão.



Fonte: ENERGY ELETRICIDADE (2021).

Os cabos elétricos que compõem os circuitos podem ser instalados em valas subterrâneas ou dispostos em via aérea, através de postes. Instalado de forma subterrânea, os cabos são menos expostos, pois sofrem menor influência do meio ambiente, como ventos, descargas atmosféricas, chuva, salinidade e animais, que podem provocar intervenções mais frequentes nas redes aéreas (TEIXEIRA, 2015). Entretanto, a impossibilidade de realizar inspeções visuais dificulta a localização e reparo de falhas, sendo necessária, muitas das vezes, a troca de toda a seção da rede defeituosa. Além disso, a rede subterrânea pode encarecer o projeto, pois é necessário o uso de cabos com maior isolamento.

2.2.3 Subestação coletora

Se trata de uma subestação elevadora, em que a sua função é elevar a tensão da rede de coleta do parque para transmissão de energia. Nesse processo, eleva-se, por exemplo, a tensão de 13,8 kV (rede coletora) para 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV ou 750 kV (linha de transmissão) dependendo da distância do transporte de energia (CARLETO, 2017). A Figura 6 mostra a subestação coletora em um complexo eólico, além dos seus alimentadores de média tensão.

Figura 6 – Subestação coletora.



Fonte: GOETZE LOBATO ENGENHARIA S.A. (2022).

A subestação é composta por equipamentos de proteção, manobra e controle que permitem o funcionamento em conformidade com o parque, bem como com a rede à qual a usina está interligada. Os equipamentos da subestação têm objetivos distintos, que em conjunto garantem as exigências operacionais estabelecido nas normas vigentes. A seguir, são apresentadas algumas considerações os principais equipamentos da subestação.

- **Barramentos:** Sua finalidade de interligar os circuitos existentes na subestação. A sua composição física deve atender às especificações técnicas do circuito e suportar os esforços de tração impostos pela estrutura da subestação.
- **Disjuntores:** Sua função de conduzir, interromper e definir correntes de carga, controlando as condições operacionais normais do sistema elétrico. Eles são controlados pelos relés, que são responsáveis pelo monitoramento dos parâmetros elétricos. Os disjuntores podem ser de diversos tipos, por exemplo: disjuntores a óleo, disjuntores a vácuo, disjuntores a ar comprimido e disjuntores a SF6.
- **Chave seccionadora:** Sua finalidade é realizar manobras de seccionamento e consequentemente isolar circuitos. Basicamente, a seccionadora é uma extensão do circuito de potência que, quando acionada, abre e fecha os contatos fixo e móvel, permitindo ou não a passagem de corrente elétrica.
- **Transformador de potencial:** Os TPs medem as tensões das fases e reduzem ela para níveis de tensão compatíveis de medida do circuito de controle. Ou seja,

fornecem tensões proporcionais aos circuitos de alta tensão que estão sendo medidos.

- **Transformador de corrente (TCs):** Semelhante ao TP, reduzem o nível de corrente do sistema e fornecem os valores proporcionais medidos aos equipamentos de medição, controle e proteção, como os relés digitais.
- **Transformador de força:** É o equipamento principal e mais crítico da subestação. Sua função é transformar o nível de tensão, podendo rebaixar ou elevar a tensão do sistema.

2.2.4 Linha de transmissão

Nos complexos eólicos, as linhas de transmissão permitem o escoamento da energia elétrica gerada até uma subestação do Sistema Interligado Nacional – SIN. Essa tecnologia é projetada em diversos níveis de tensão. No Brasil, os mais comuns são: 69, 138, 230, 500 e 525 kV (CRT-RJ, 2021).

A energia é conduzida por cabos condutores feitos de alumínio nu, com um a quatro condutores por fase. Estes, por sua vez, são suspensos pelas torres metálicas por meio de cadeias de ancoragem e isoladores, feitos de material dielétrico. As estruturas metálicas de sustentação dos cabos condutores são, normalmente, torres treliçadas em aço fabricadas com cantoneiras laminadas e ligadas através de parafusos. Essas devem ser dimensionadas para suportar os esforços provenientes dos ventos de alta velocidade, característica dos locais de implantação dos parques eólicos.

Além disso, a linha de transmissão realiza a comunicação de dados entre a subestação do parque eólico e subestação do Sistema Interligado Nacional. Essa emissão acontece por meio de um cabo tipo OPGW (*Optical Ground Wire*), que também possui a função de para-raios, protegendo contra descargas atmosféricas (BORDUCHI, 2013). A Figura 7 mostra os principais elementos que compõem a linha de transmissão.

Figura 7 – Estrutura de uma linha de transmissão.



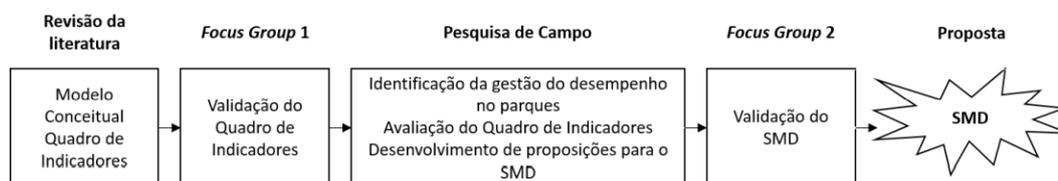
Fonte: Bichels (2017).

3. ESTADO DA ARTE NA GESTÃO DE O&M

A gestão da O&M de parques eólicos é fundamental para tornar a fonte eólica mais competitiva frente às outras fontes de energia. Analisar o desempenho de um empreendimento eólico é complexo e envolve diversos fatores. No presente capítulo é abordado o estado da arte dos principais fatores que afetam o desempenho da gestão da O&M de parques eólicos.

Dentre os problemas enfrentadas pelo setor eólico, tem-se a dificuldade em medir efetivamente o desempenho, visto que existem características específicas e distintas das outras fontes de energia. Na análise realizada por Santos, 2016, propôs-se um sistema de medição de desempenho (SMD) específico para o setor de energia eólica, com base em sistemas descritos na literatura. Foi realizado um estudo de caso através de uma abordagem qualitativa-quantitativa, utilizando técnica de coleta de dados a entrevista semiestruturada. O procedimento de pesquisa buscou identificar os condicionantes para a gestão de empreendimentos eólicos e formas de mensurá-los de forma a viabilizar a performance da operação e manutenção de parques eólicos. A Figura 8 apresenta um esquemático resumido do método de pesquisa usado no estudo.

Figura 8 - Esquema resumido do método de pesquisa.



Fonte: SANTOS (2016).

Partindo do estudo de caso de sete empresas proprietárias de parques eólicos, foi feita uma descrição detalhada de aspectos como: gestão interna dos parques, contratos de O&M, gestão da manutenção, ferramentas de suporte e indicadores de desempenho. Por meio disso, é feito uma análise e considerações para cada caso, expondo as principais características da gestão adotada pelas empresas e como isso impacta no desempenho do empreendimento eólico.

Outro ponto relente está relacionado com os indicadores utilizados pelas empresas para a medição de desempenho. O quadro 1 resume o uso dos indicadores encontrados na literatura. Os indicadores usados pelas empresas estão marcados em verde; os não utilizados estão em amarelo, mas que são relevantes para o setor; em cinza os indicadores fora do escopo de O&M e em vermelho são os considerados irrelevantes.

Quadro 1 - Resumo dos indicadores adotados pelas empresas do estudo de casos.

Dimensão	Indicador	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	
FINANCEIRA	Receita Bruta								
	Custos de O&M								
	Custo de Geração Unitário								
	Lucro Unitário								
ENERGIA GERADA	Capacidade de Geração Instalada								
	Capacidade de Geração Efetiva								
	Energia Contratada								
	Energia Bruta								
	Perdas até o Ponto de Conexão								
	Energia Líquida								
	Fator de Capacidade								
	Disponibilidade de Tempo								
	Disponibilidade de Energia								
	Fator de Perda de Produção								
	OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO	Nº de Falhas Internas							
		Nº de Falhas Externas							
		Tempo Médio Entre Falhas							
		Tempo Médio de Reparo							
Tempo de Resposta da Manutenção									
Indisponibilidade por Falha									
Custo de não Geração por Falha									
Custos de Contratos de Manutenção									
Custos de Manutenção Fora de Contrato									
Custo Total de Falha									
Nº de Ordens de Serviço Pendentes									
Porcentagem de Manutenções Preventivas									
Porcentagem de Manutenções Corretivas									
Custo de Manutenção Unitário									
PESSOAS		Nº de trabalhadores empregados em O&M							
	Horas de Capacitação								
	Taxa de rotatividade								
	Custo de Capacitação								

Fonte: SANTOS (2016).

A metodologia aplicada ao estudo de caso identificou outros indicadores relevantes para a análise, tais como: eficiência da turbina, custo nivelado de energia, indisponibilidade por eventos externos, entre outros. Outros indicadores não foram inseridos na proposta final por ser considerados fora do escopo da atividade de O&M.

A partir do estudo de caso definiu-se os condicionantes que influenciam diretamente e indiretamente no desempenho de parques eólicos. Os fatores estão relacionados à Confiabilidade de Prospecção, Qualidade da Construção, Aprendizagem Organizacional, Ferramentas de Suporte, e Coordenação da Cadeia Produtiva, conforme o esquema do quadro 2.

Quadro 2 - Fatores de influência no desempenho de parques eólicos.



Fonte: SANTOS (2016).

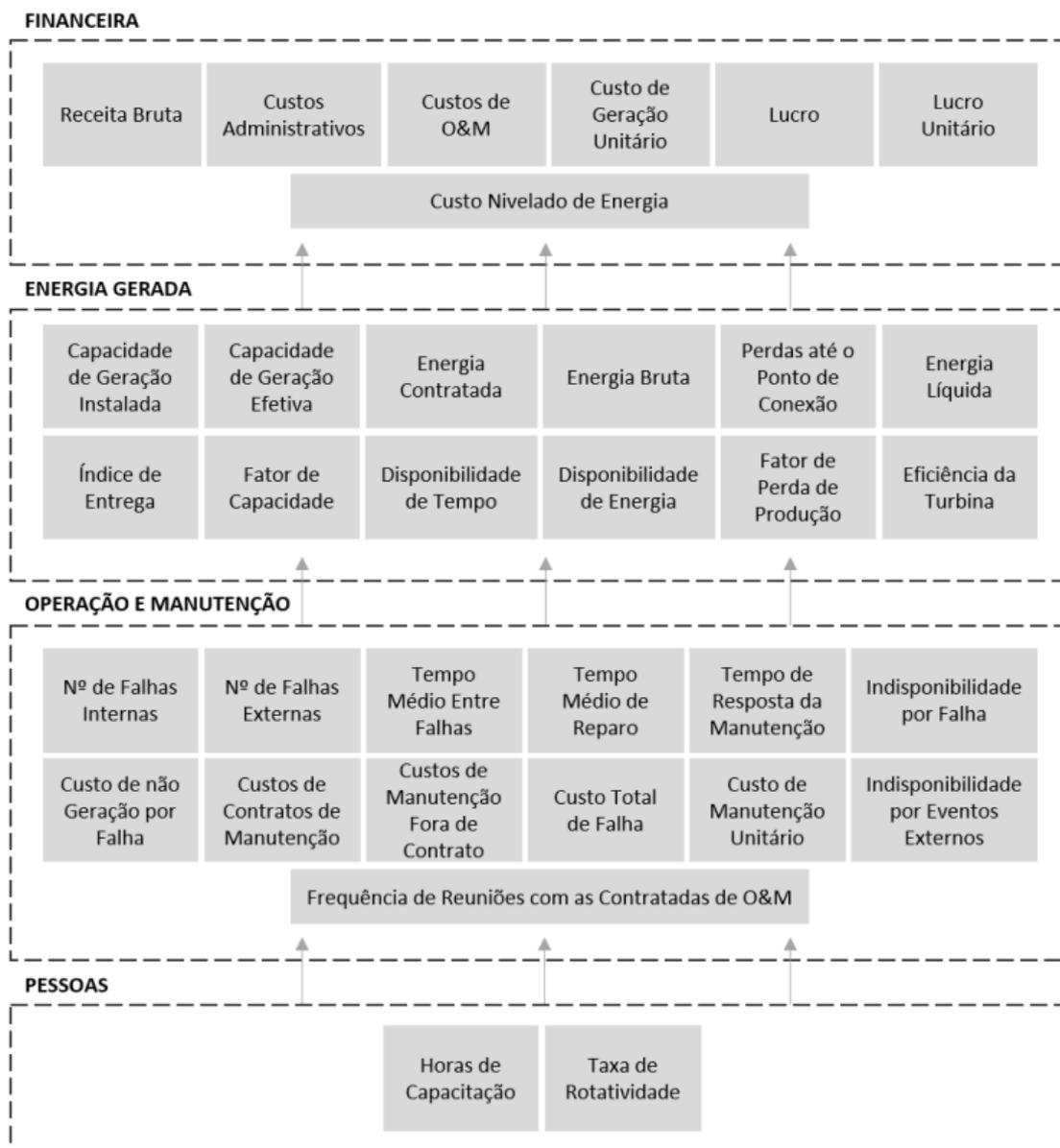
É feito uma análise detalhada dos condicionantes mapeados, com a utilização de exemplos práticos citados pelos entrevistados no estudo de casos. Santos faz considerações de forma sucinta sobre cada condicionante. A aprendizagem organizacional é o principal fator de influência no desempenho de um parque eólico, pois refere-se à expertise da empresa no setor, ao perfil da equipe responsável pelo O&M e na forma de gestão das atividades operacionais, com possibilidade de compartilhamento de informações entre diferentes empresas.

Em relação aos indicadores analisados, as empresas proprietárias dos parques eólicos fundamentalmente utilizam os mesmos. Os indicadores financeiros são mais apurados pela gestão estratégica, ou seja, o que proporciona uma visão sistêmica do processo negócio. Indicadores de energia são usados pelo nível gerencial, por gerentes e coordenadores, pois demonstram claramente a performance dos ativos.

A nível operacional, os indicadores da operação e manutenção são comumente usados, porém são mais impactantes no planejamento e controle em gestões com maior expertise. Por fim, os indicadores de gestão de pessoas são raramente usados, o que contrapõe a relevância identificada pelo autor na fundamentação teórica.

Por fim, é proposto um sistema de medição de performance para parques eólicos, com base na fundamentação dos condicionantes dispostos na figura 10 e apoiado em 4 dimensões de desempenho: Financeira, Energia Gerada, Operação e Manutenção e Pessoas. A figura 9 apresenta as dimensões de desempenho compostas pelos indicadores considerados relevantes para o setor. Em suas considerações, Santos (2016) destaca a importância do desenvolvimento do SMD específico para a área de geração eólica, pois o mesmo considera inputs fundamentais no O&M eólico, como ferramentas de suporte e coordenação da cadeia produtiva, para assim quantificar adequadamente o desempenho dos parques eólicos.

Figura 9 – Indicadores que compõem as dimensões de desempenho.



Fonte: SANTOS (2016).

Dentre as dificuldades a ser enfrentadas pelo setor eólico, está a dificuldade com a logística da cadeia de suprimentos, que afetam o desempenho dos parques eólicos desde a sua implantação até o descomissionamento. No estudo realizado por González, 2016, foi feita uma fundamentação teórica sobre a gestão de O&M e logística da cadeia de suprimentos e concluiu-se que a literatura caracteriza o tema de ordem técnica – pelas falhas e paradas que impactam na geração, ou de ordem contratual – através de indicadores de desempenho estabelecidos previamente em contratos de O&M. Porém, o estudo sugere a análise do problema de uma perspectiva gerencial, envolvendo os problemas e desafios da logística e cadeia de suprimentos do setor.

González (2019) realizou uma pesquisa descritiva-quantitativa com uma pesquisa do tipo survey ou pesquisa de levantamento, para sintetizar as principais dificuldades enfrentadas pelos gestores de O&M. Partindo do volume de parques eólicos em operação no Brasil, foi definida uma amostra para realizar a pesquisa. Foi elaborado um questionário e fornecido aos gestores de O&M participantes da pesquisa, representando 107 parques eólicos com capacidade total de 3 GW. Foram contemplados os seguintes pontos: Características dos parques eólicos; Critérios usados na seleção de fornecedores; Dificuldades enfrentadas antes da contratação de fornecedores; Dificuldades durante a realização de serviços pelos terceiros no parque eólico; Problemas após a realização de serviços. Por fim, foi realizado um tratamento de dados por meio de estatística descritiva e feito um cruzamento das informações obtidas por meio de Grupos Focais.

Com objetivo de identificar os critérios mais relevantes na definição da aquisição ou contratação de um fornecedor, foi definida uma ordem de prioridade, conforme o quadro 3. Os critérios pertencentes à dimensão “qualidade do serviço” foram considerados os mais impactantes, seguido do critério “Menor preço” dentro da dimensão de custo de O&M.

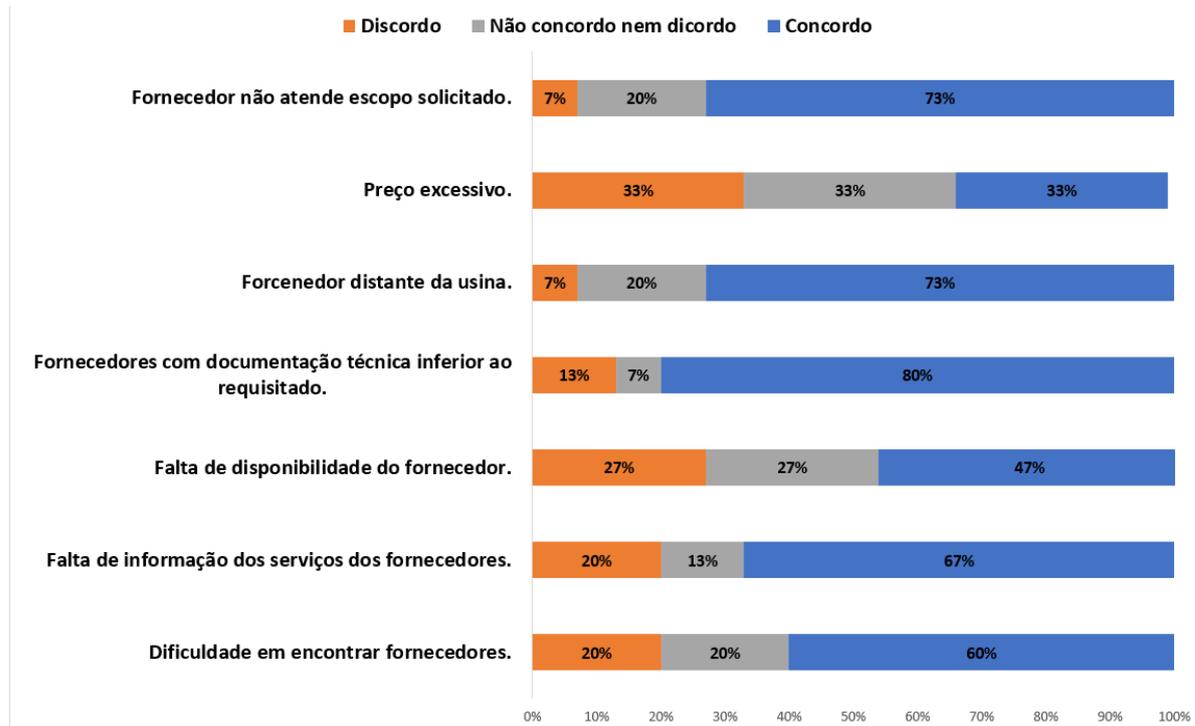
Quadro 3 - Critério de seleção de fornecedores por ordem de prioridade.

Critério	Ordem de prioridade
Maior qualidade na execução do serviço	1º
Maior confiabilidade na execução do serviço	2º
Menor preço	3º
Menor prazo na execução do serviço	4º
Fornecedores já conhecidos	5º

Fonte: GONZÁLEZ (2019).

As principais dificuldades enfrentadas antes da contratação do serviço, segundo a opinião dos gestores de parques eólicos, são: Fornecedores com documentação técnica inferior ao requisitado; Fornecedor não atende ao escopo estabelecido; Distância do fornecedor até a localidade dos parques eólicos. O Gráfico 3 descreve o índice de concordância dos entrevistados em relação as dificuldades antes da contratação do serviço.

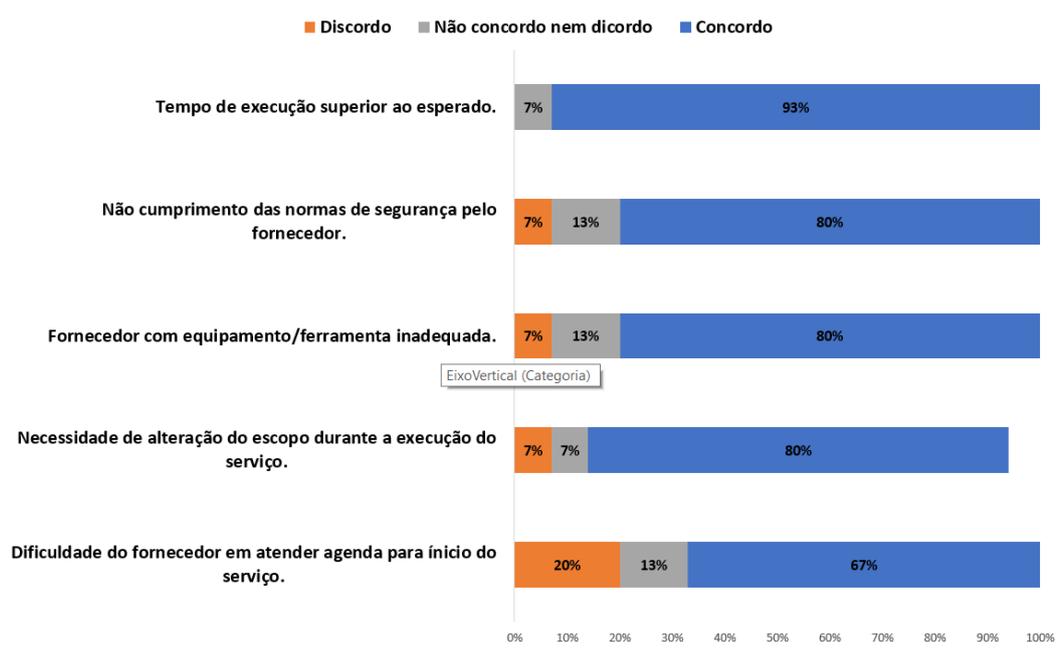
Gráfico 3 - Dificuldades antes da contratação do serviço.



Fonte: Adaptado (GONZÁLEZ, 2019).

Em relação às dificuldades enfrentadas durante a execução do serviço, na opinião dos gestores de O&M, os principais problemas enfrentados são: Tempo de execução superior ao estimado; Mudança do escopo durante a execução do serviço; Uso de equipamentos e ferramentas inadequadas. O Gráfico 4 mostra a opinião dos entrevistados em relação as dificuldades durante a contratação do serviço.

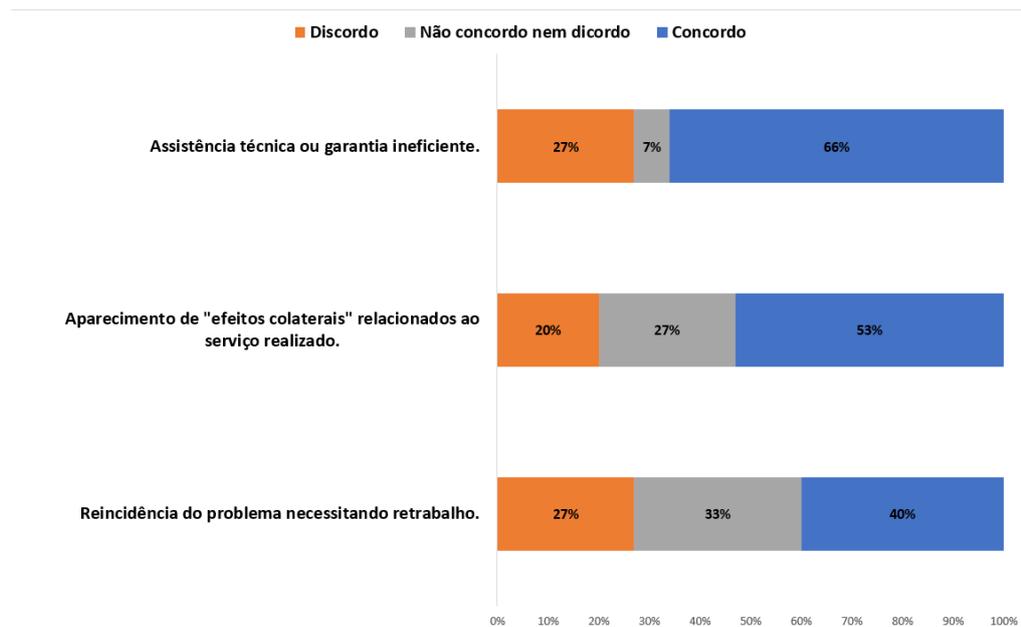
Gráfico 4 - Dificuldades durante a contratação do serviço.



Fonte: Adaptado (GONZÁLEZ, 2019).

Por fim, segundo os gestores, as dificuldades enfrentadas após a execução do serviço são recorrentes. Estes fatores impactam diretamente no sucesso da realização do serviço. O Gráfico 5 compila a opinião dos entrevistados em relação às dificuldades após a contratação do serviço.

Gráfico 5 - Dificuldades após a contratação do serviço.



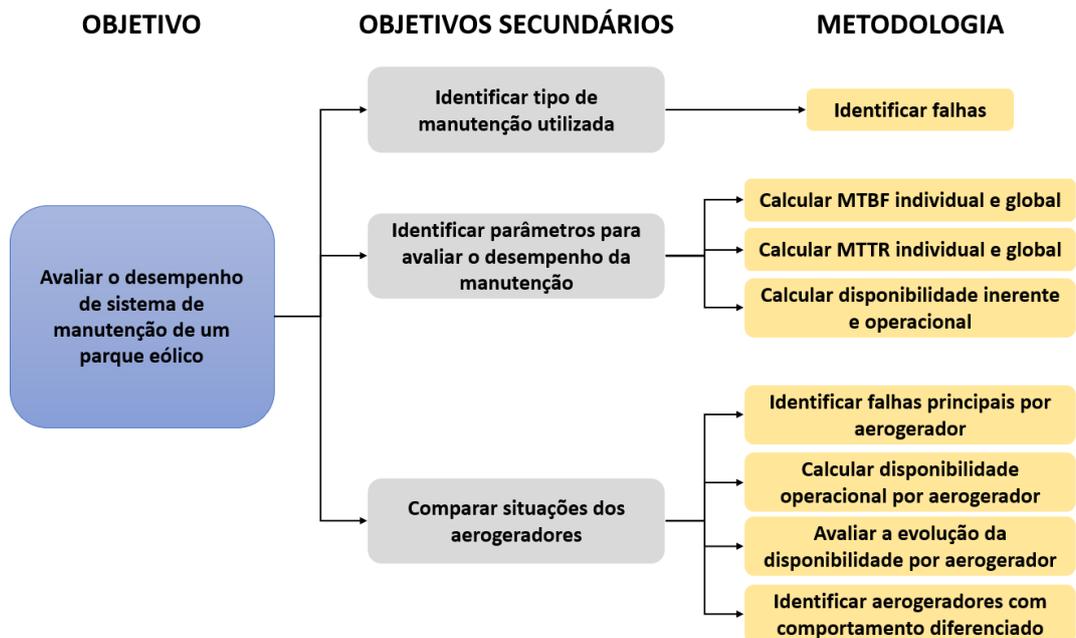
Fonte: Adaptado (GONZÁLEZ, 2019).

Após a análise dos resultados obtidos, concluí-se que a cadeia de suprimento é o melhor modelo para otimização das atividades de um parque eólico. Dessa forma, defende a importância do estudo em abordar os problemas e desafios enfrentados pelos gestores de parques eólicos sob a perspectiva de fornecimento de serviços.

Os parques eólicos fornecem diariamente uma grande quantidade de dados, principalmente a partir dos aerogeradores. A partir desses dados, podem ser extraídas informações valiosas sobre a situação do empreendimento eólico, que são fundamentais na tomada de decisão. O estudo desenvolvido por Candiotto, 2016, propõe a aplicação de uma metodologia, com bases nos dados operacionais, para assim avaliar o sistema de manutenção de um parque eólico.

A metodologia consiste basicamente na coleta de dados operacionais fornecido pelo sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Após isso, os dados são tratados para excluir eventuais inconsistências, que podem afetar a conclusão da análise. Posteriormente os dados são analisados sob a ótica amplamente abordado na literatura, como a classificação de alarmes e tipos de manutenção em aerogeradores. Por fim, é feito um tratamento estatístico nos dados para calcular indicadores de desempenho como MTBF, MTTR e disponibilidade. A Figura 10 sintetiza a estrutura da pesquisa realizada pelo autor.

Figura 10 - Estrutura da pesquisa.

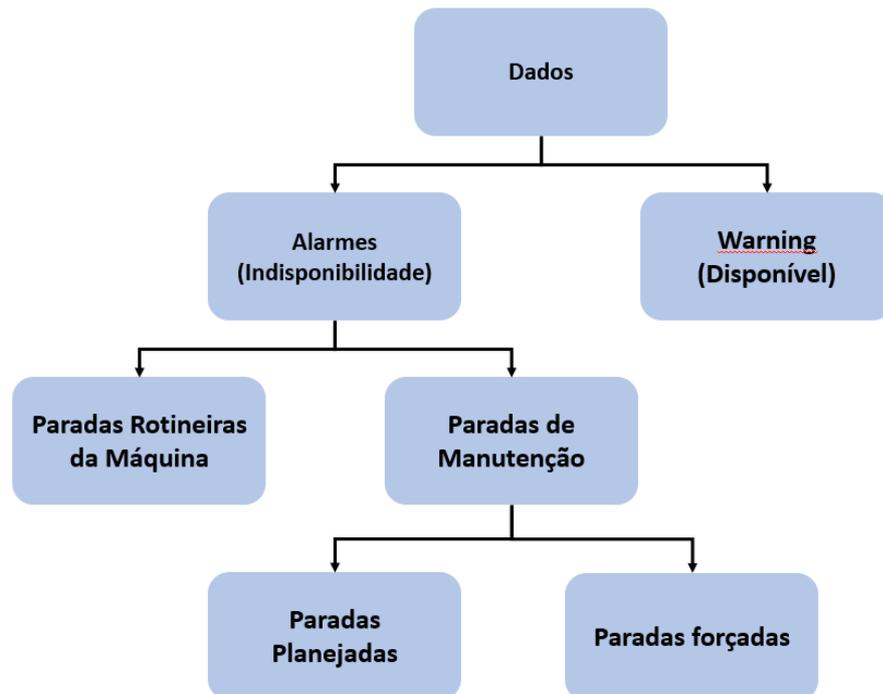


Fonte: Adaptado (CANDIOTTO, 2016).

Com a metodologia definida, fez-se um estudo de caso com dados obtidos junto a uma empresa atuante no mercado de geração de energia elétrica. A base de dados é proveniente de um complexo eólico de 24 aerogeradores de 2,35 MW de potência, restrita ao ano de 2015. Os registros dos dados apresentam os alarmes e avisos fornecidos pelo sistema SCADA.

De posse dos dados, foi realizado um tratamento para lidar com algumas situações. Os alarmes não relacionados a eventos de indisponibilidade e os repetidos foram retirados, além dos alarmes que são disparados por conta de paradas programadas, como lubrificação diária dos componentes – estes devem ser contabilizados como manutenções preventivas. A Figura 11 apresenta um diagrama de árvore com as possibilidades de tratamento dos dados.

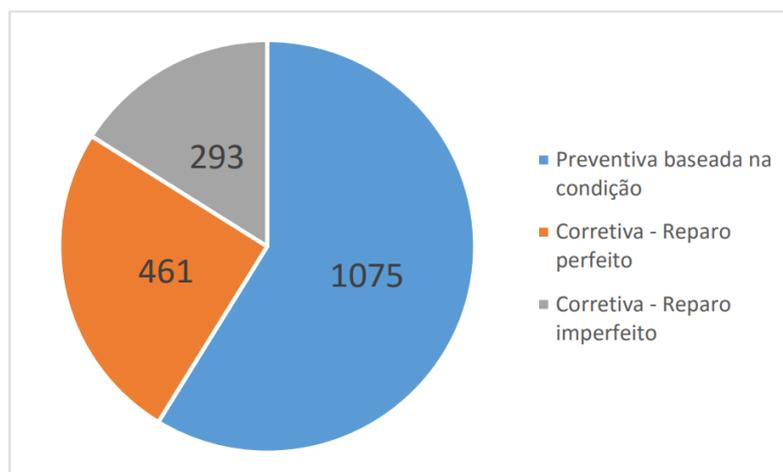
Figura 11 - Estrutura da base de dados.



Fonte: Adaptado (CANDIOTTO, 2016).

Após isso, é feita uma análise dos dados tratados com base no tipo de manutenção. Partindo dos dados referentes aos alarmes disparados, verificou-se que estavam distribuídos em 64 categorias de alarmes, porém 92% desse montante corresponde a um grupo de 12 tipos. Com essa primeira análise, foi possível calcular a proporção entre os tipos de manutenção usada. O Gráfico 6 mostra a quantidade de alarmes por tipo de manutenção.

Gráfico 6 - Divisão de alarmes por tipo de manutenção.



Fonte: CANDIOTTO (2016).

Candiotto (2016) destaca que a maioria dos alarmes são causados por conta de manutenções preventivas, que são realizadas por intervenção humana e por conta do sistema de supervisão que possibilita, através de diversos parâmetros calculados por sensores, avaliar a condição dos equipamentos e até intervir em alguns casos. Também é destacado a característica dos alarmes mais recorrentes, como por conta reorientação da nacelle para “desenrolar” os cabos internos – ocorrem por conta da rotação do aerogerador na busca pela direção do vento, alarmes relacionados a baixa velocidade do vento – nesse caso o vento fica abaixo da velocidade mínima necessária para a rotação do rotor.

Por fim, são calculados alguns indicadores de desempenho, como o tempo médio entre falhas (MTBF - *Mean Time Between Failures*), o tempo médio entre reparos (MTTR - *Mean Time To Repair*) e Disponibilidade. A Tabela 3 resume os valores médios do MTBF de todas as turbinas em relação aos principais alarmes e o desvio padrão.

Tabela 3 - Média do MTBF por alarme.

Alarme	Média dos MTBF por alarme (Hrs)	Desvio Padrão
10105	285,4	66,5
13902	499,0	119,0
1005	804,1	421,1
1007	952,5	226,0
8110	728,6	485,9

Fonte: CANDIOTTO (2016).

De forma semelhante, foram calculados os valores de MTTR por alarme e o desvio padrão. Com isso, pode-se observar a partir da Tabela 4 que a maioria dos valores de desvio padrão são superiores ao próprio valor do MTTR, o que significa uma grande dispersão dos valores, indicando que as falhas não atingiram o estágio da vida útil do equipamento.

Tabela 4 - Média do MTBF por alarme.

Alarme	Tempo médio de acionamento (seg)	Desvio Padrão
10105	39,36	147,45
13902	39,58	451,39
1005	10,95	26,24
1007	414,41	2.234,03
8110	5,50	3,71

Fonte: CANDIOTTO (2016).

Finalmente a disponibilidade operacional de todo o complexo é calculada e analisada. Com base no período analisado e no tempo de indisponibilidade, considerando todos os eventos que causaram paradas, a disponibilidade média geral do complexo eólico foi acima de 98%, o que representa um resultado muito satisfatório. Entretanto, o estudo ressalta que valores elevados de disponibilidade operacional não significam necessariamente um bom desempenho o parque eólico. Outro indicador mais preciso sobre o desempenho é a disponibilidade energética, que mensura a disponibilidade dos aerogeradores para gerar energia elétrica em relação ao máximo possível para a condição de vento disponível. Esse fator pode ser impactado por diversas situações, como limitações de potência por parte do ONS, paradas emergenciais em épocas com ventos elevados, entre outras.

Após a análise feita, Candiotto (2016) concluí que é possível avaliar o desempenho da manutenção realizada em um parque eólico apenas com os dados de operação. Entretanto, ressaltou que as limitações estatísticas, como dados incompletos, divergentes e pequenas amostras podem camuflar os resultados obtidos.

4. GESTÃO DA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE PARQUES EÓLICOS

A operação dos parques eólicos ocorre a partir do comissionamento das turbinas até o fim da vida dos aerogeradores, que normalmente dura 20 anos. A gestão de O&M é responsável por assegurar um bom desempenho de todos os sistemas que compõem os empreendimentos eólicos, como os aerogeradores, rede de média tensão, subestação e linha de transmissão. Esse capítulo tem como finalidade abordar os principais fatores que influenciam a gestão da O&M.

4.1 Gestão organizacional

Segundo Santos (2016), a estrutura organizacional dos parques eólicos geralmente é composta por uma equipe compacta, que varia de acordo com o porte da empresa proprietária do empreendimento e do escopo dos contratos de O&M das turbinas e BOP (*Balance of Plant*) elétrico. Normalmente a maior parte da equipe fica locada no parque eólico, ou simplesmente *site*, composta por um gerente, um supervisor e uma equipe técnica. O escopo das atividades da equipe de O&M vão desde o monitoramento, supervisão e controle dos equipamentos até a intervenção nas turbinas de forma preventiva ou emergencial (FARIAS, 2020).

Partindo da gestão da O&M, os gerentes geralmente possuem formação em engenharia e são os responsáveis por um ou mais parques eólicos pertencentes à mesma empresa (SANTOS, 2016). Dentre as atividades atribuídas ao gerente incluem a gestão de contratos com os fornecedores de peças, componentes e serviços, gestão da equipe técnica e acompanhamento dos macros indicadores para cumprimento de contratos e comercialização de energia. Além disso, a depender do porte da empresa, podem ser atribuídas à mesma gerência atividades administrativas, como a gestão de contratos com empresas terceirizadas de segurança patrimonial e gestão ambiental, contratação de treinamentos para a equipe e gestão de contratos de seguro dos ativos.

A nível da direção da empresa, geralmente a diretoria acompanha os resultados financeiros, mas não se envolve em decisões puramente técnicas. Entretanto, empresas especializadas em geração, que têm um grande portfólio de empreendimentos de energias renováveis, dispõem de uma diretoria técnica para acompanhar de perto a operação das usinas e tomar decisões que podem impactar no desempenho de todo o complexo.

Dentre as atribuições do supervisor, tem-se o planejamento e controle da manutenção de responsabilidade do proprietário da usina, através da criação do plano de manutenção,

acompanhamento das atividades, elaboração de relatórios técnicos e acompanhamento dos indicadores de desempenho. O supervisor se reporta diretamente ao gerente, através de relatórios e reuniões. Além disso, o supervisor é responsável por acompanhar algumas atividades críticas que empresas terceiras realizam, como a troca de grandes componentes nas turbinas ou manutenções que ocorrem na subestação local.

Por fim, a equipe técnica é responsável por executar as atividades de manutenção de acordo com o plano de manutenção definido pelo supervisor. Por questões contratuais, os fabricantes dos aerogeradores responsáveis pela manutenção não permitem a participação ativa dos técnicos da equipe do proprietário (SANTOS, 2016). Então, dessa forma, a equipe técnica local fica responsável pela manutenção dos sistemas elétricos, como pelas atividades de manutenção da rede de média tensão e nos equipamentos da subestação.

4.2 Gestão e planejamento da manutenção

A gestão da manutenção é fundamental tanto para o desempenho operacional como para o financeiro. Os dois aspectos são afetados negativamente em caso de uma gestão ineficiente da manutenção, pois as avarias que ocorrem nos subsistemas de um parque eólico diminuem o tempo de operação das turbinas e a geração. Além disso, as falhas tornam os custos com manutenção onerosos, pois necessitam de mão de obra, peças e sobressalentes para a realização do reparo.

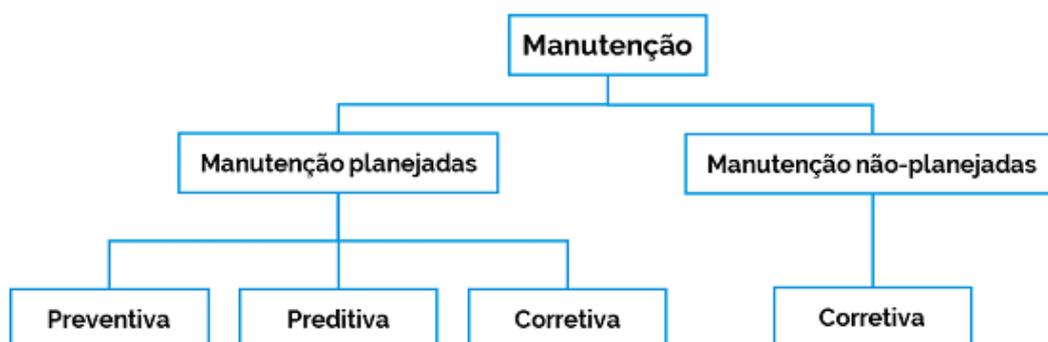
Segundo Azevedo (2015), os principais componentes do aerogerador são os que causam maior prejuízo financeiro por conta de dois principais fatores: o elevado tempo de parada, principalmente em sistemas de engrenagem como a caixa multiplicadora; e do custo de manutenção, pois esses componentes são complexos e necessitam de mão de obra qualificada para a execução dos reparos.

Por conta da complexidade dos sistemas que compõem todo o processo de geração de energia elétrica através da fonte eólica, as empresas responsáveis pela O&M dos parques utilizam técnicas de manutenção que atendem as especificidades do setor, alinhado as necessidades do cliente (SILVA, 2017). O uso de estratégias de manutenção busca encontrar o equilíbrio entre o custo e a confiabilidade dos equipamentos, ou seja, gastar o menos possível e garantir uma quantidade reduzida de falhas, paradas prolongadas e acidentes.

Pautado nesse objetivo, as principais técnicas de manutenção aplicadas em parques eólicos são: corretiva, preventiva e preditiva. Além disso, essas técnicas podem ser classificadas

como planejadas ou não-planejadas. A figura 12 mostra a divisão entre as principais técnicas de manutenção aplicadas em parques eólicos.

Figura 12 – Técnicas de manutenção.



Fonte: FIELD CONTROL (2022).

A seguir serão abordadas as características de cada tipo de manutenção, quando aplicadas em parques eólicos.

4.2.1 Manutenção Corretiva

Segundo a NBR 5462 (1994), a manutenção corretiva é efetuada após a ocorrência de uma pane, com o objetivo de recolocar um equipamento em condições de executar uma função requerida. Em parques eólicos, esse tipo de manutenção pode ser aplicado em todos os subsistemas, desde que seja identificado uma falha.

Geralmente, a manutenção corretiva é aplicada em equipamentos com avarias que impossibilitam o seu funcionamento, ou seja, indisponíveis para completar o processo de geração (FARIAS, 2020). Nos aerogeradores, quando ocorre esse tipo de falha apenas essa turbina deixa de produzir, não impactando significativamente na geração do complexo eólico. Entretanto, falhas repentinas em algum sistema do BOP têm um impacto relevante do desempenho, pois podem deixar algumas ou até mesmo todas as turbinas indisponíveis para produção.

A identificação das falhas é feita principalmente pelo sistema SCADA, que ao identificar a avaria atua para parar o sistema afetado. Com isso, é disparado um alarme para a interface de monitoramento, indicando o equipamento está em pane. Dessa forma, uma equipe

de técnicos é direcionada imediatamente ao sistema afetado para realizar a manutenção necessária.

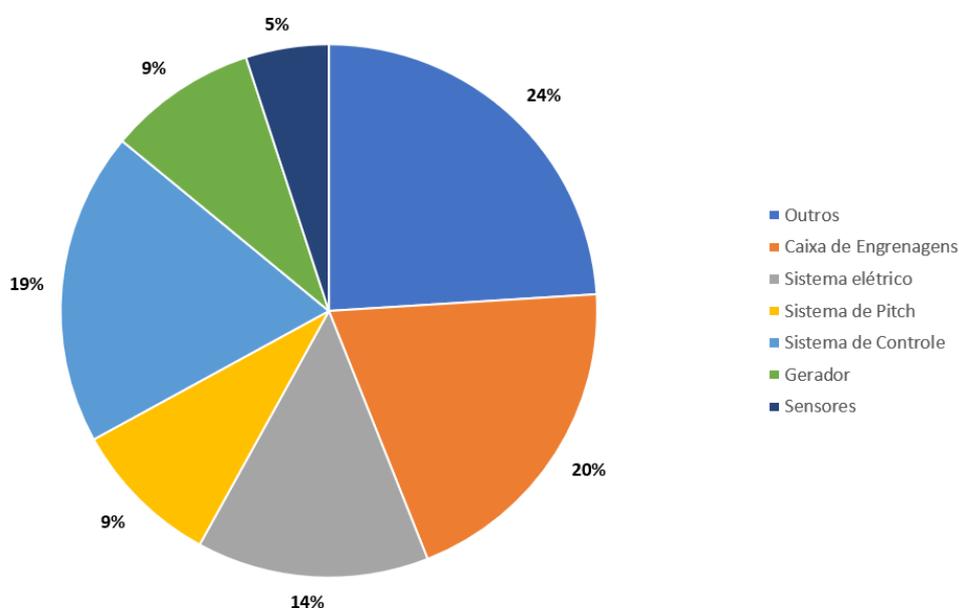
A manutenção corretiva pode ser aplicada basicamente de três formas: manutenção de reparo perfeito, em que é feita uma restauração do equipamento ou componente afetado de forma a deixá-lo no estado original; manutenção de reparo mínimo, pois permite apenas que o equipamento retorne a operar, porém não retorna aos parâmetros de confiabilidade anterior; manutenção de reparo imperfeito, trata-se de um reparo eficaz, mas não tem a capacidade de elevar a vida útil do equipamento (CANDIOTTO, 2016).

A seguir serão abordadas as principais avarias que ocorrem em aerogeradores.

4.2.1.1 Principais avarias em aerogeradores

Segundo Soares (2010), os principais sistemas de aerogeradores com caixa multiplicadora que sofrem falhas são: sistema de controle, gerador, sistema de controle do ângulo das pás caixa multiplicadora, sistema elétrico e os sensores. O gráfico 7 mostra a proporção de falhas por subsistema do aerogerador.

Gráfico 7 - Proporção de falhas em aerogeradores por subsistema.



Fonte: Adaptado (SOARES, 2010).

A quantidade de avarias nos sistemas de controle é expressiva e geralmente ocorrem por conta falhas em instrumentos de medição, tais como sensores de vibração, temperatura, pressão, velocidade de rotação, anemômetros, etc. Os defeitos nos sensores são causados por ajustes

equivocados ou desajustados por conta de intempéries que ocorrem ao longo do período de operação (OLIVEIRA, et al, 2015).

Em relação ao sistema elétrico, as avarias ocorrem por conta de falhas ou fadiga em relés, contactores, disjuntores, entre outros. Além disso, fatores como umidade, sujeira ou manutenção ineficiente podem facilitar as falhas nesses componentes. As avarias de grande escala ocorrem principalmente no gerador, caixa multiplicadora e pás. No gerador, falhas ocorrem devido a defeitos no isolamento, mau contato nos terminais e falha no isolamento do estator (OLIVEIRA, et al, 2015).

A caixa multiplicadora sofre avarias por conta de problemas relacionados à degradação e conseqüentemente rotura das rodas dentadas e defeitos nos rolamentos, causados principalmente por lubrificações inadequadas. Nas pás, as principais avarias são causadas por rolamentos desgastados e problemas no sistema de *pitch* no ajuste do ângulo de ataque. Ademais, fatores como impacto de raios ou aves podem causar avarias nas pás, que geralmente demandam dias para que seja reparado.

4.2.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, com o objetivo de reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um equipamento (NBR 5462, 1994). Em parques eólicos, a manutenção preventiva é a estratégia mais usada para manter a integridade dos equipamentos e componentes, a partir de um plano de manutenção elaborado pelo supervisor de O&M. Dentre as principais ações, pode-se destacar a lubrificação dos sistemas mecânicos, tensionamento dos parafusos, limpeza, troca de componentes desgastados, etc. Na manutenção preventiva, geralmente são trocados alguns itens de acordo com o tempo de uso, como freios mecânicos, amortecedores, baterias de *pitch*, entre outros (REIS, 2015).

A manutenção preventiva é basicamente classificada em três estratégias distintas: manutenção baseada no tempo, manutenção baseada no tempo de operação e manutenção baseada na condição (CANDIOTTO, 2016). A seguir são descritas as características de cada estratégia.

- Manutenção baseada no tempo: Nesse caso, a manutenção é executada de acordo com um cronograma estabelecido, com intervalos de tempo entre as intervenções.
- Manutenção baseada no tempo de operação: Esse tipo de manutenção atua de acordo com o tempo de operação do equipamento, geralmente medido em horas. No caso dos aerogeradores, essa estratégia é bem comum após o comissionamento do início da operação ou quando é trocado um grande componente, como caixa multiplicadora ou gerador.
- Manutenção baseada na condição: Consiste na atuação de acordo com o estado atual do equipamento. Caso sejam identificadas anomalias nos parâmetros monitorados, uma equipe atua de forma preventiva, em busca de evitar uma possível falha. O sistema SCADA é uma ferramenta fundamental para aplicar esse tipo de manutenção.

As manutenções preventivas são especialmente importantes para sistemas em que a falha implica em grande impacto no custo de manutenção. No caso dos aerogeradores, uma falha não causa um impacto relevante na operação de todo o parque. Entretanto, quando ocorre uma falha em um sistema do BOP, esse evento pode impactar na parada de um grupo de aerogeradores ou de todo o complexo eólico. Nesse caso, a principal consequência consiste na indisponibilidade de geração, que impacta significativamente na receita da empresa.

Nesse cenário, a manutenção preventiva ganha destaque, pois ao atuar previamente sobre os equipamentos mais propensos a falhas, mitiga-se o risco de falhas e aumenta a segurança da operação. Além disso, outra grande vantagem é a flexibilidade desse tipo de manutenção, que pode ser planejada para acontecer em períodos com ventos mais baixos, de forma a minimizar as perdas de receita por conta das paradas (FARIAS, 2020).

4.2.3 Manutenção Preditiva

Manutenção preditiva consiste na aplicação de técnicas de análise para identificar sintomas de uma falha que pode acontecer, possibilitando uma atuação prévia. Através da aplicação da manutenção preditiva, juntamente com o histórico de avarias, é possível detectar novas falhas em estágio inicial, conhecer a causa-raiz e determinar a vida útil do equipamento (SEQUEIRA, 2012).

As formas de aplicação de manutenção preditiva em parques eólicos se resumem às seguintes técnicas: Inspeções e Monitoramento de Condições (OLIVEIRA, et al, 2015). A seguir são apresentadas as principais características das técnicas de manutenção preditiva para cada grupo.

4.2.3.1 Inspeções

As inspeções são normalmente aplicadas nos aerogeradores, no qual é possível comprovar o estado dos componentes avaliados. Realizam-se as inspeções diretamente no equipamento ou componente, o que na maioria das vezes exige a parada da turbina. Além disso, as informações obtidas pelas inspeções expressam as condições de momento do equipamento, dificultando a obtenção de modelos de tendências de falhas. Dentre as inspeções realizadas no contexto de parques eólicos, pode-se destacar: boroscopia ou endoscopia industrial, termografias e inspeção em pás.

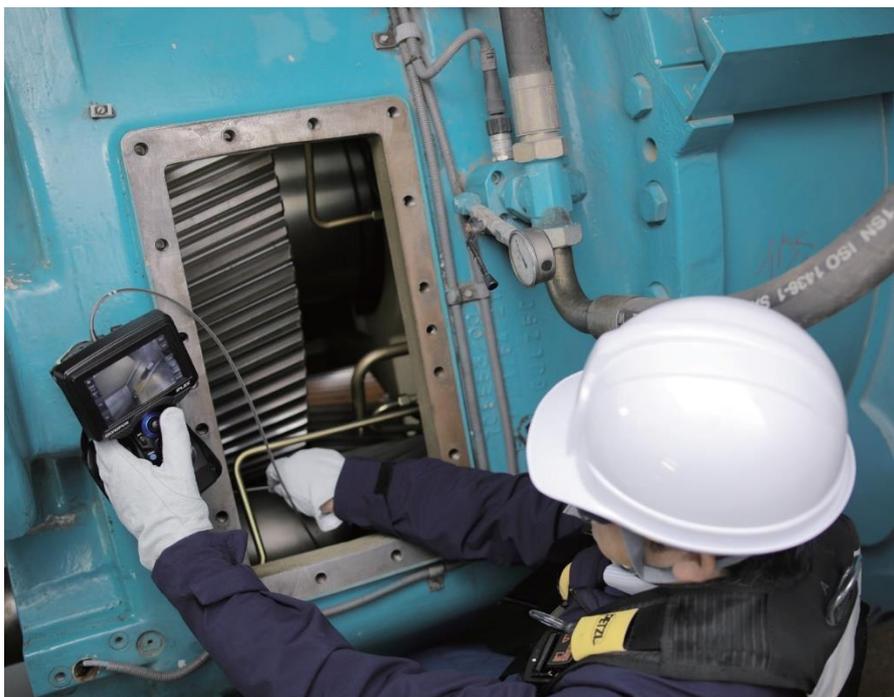
4.2.3.1.1 Boroscopia

A boroscopia, também conhecida como endoscopia industrial, é um método de inspeção para avaliação de equipamentos ou componentes através da captação e transmissão de imagens. É utilizada amplamente no plano de manutenção preditiva de aerogeradores, principalmente nas inspeções realizadas na caixa multiplicadora.

Segundo Azevedo (2015), os rolamentos e engrenagens das turbinas eólicas sofrem dano contínuo o que faz com que haja geração de estilhaços e detritos, que com o tempo em operação podem causar danos irreversíveis. É nesse contexto que o emprego da boroscopia é fundamental, pois através da sua aplicação é possível identificar falhas em estágio inicial, possibilitando a atuação prévia da equipe de manutenção.

A ferramenta usada nesse tipo de inspeção chama-se boroscópio, composto por uma câmera na ponta de uma sonda, um sistema de controle e monitoramento, que permite visualizar a imagem que a câmera está capturando. Sua principal vantagem consiste em poder ver e inspecionar o interior de máquinas e equipamentos, sem a necessidade de desmontar (MATTEDE, 2020). A figura 13 mostra o procedimento de uma boroscopia em caixa de engrenagens.

Figura 13 – Boroscopia em caixa de engrenagens.



Fonte: DAVIS (2018).

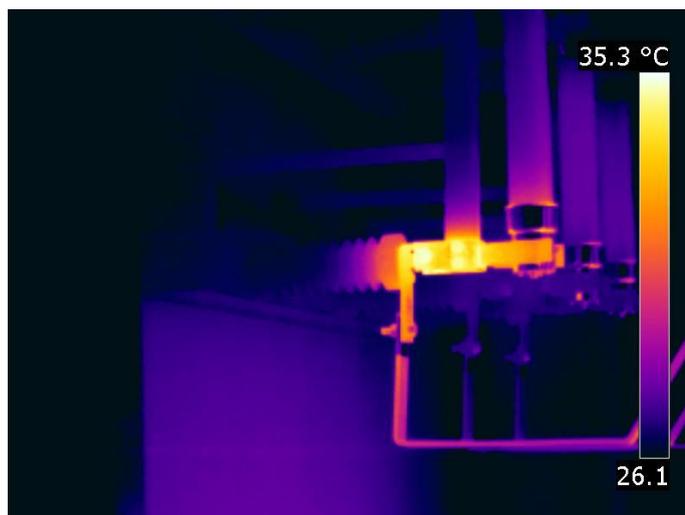
4.2.3.1.2 Termografia

Em uma usina eólica, boa parte do BOP elétrico não possui sensores que permitem o monitoramento contínuo da temperatura. Nesses casos, a aplicação de inspeções termográficas é fundamental para evitar falhas nos componentes e até mesmo risco de incêndios. A termografia em sistemas elétricos é a responsável pela medição de temperatura dos condutores, conexões e componentes de proteção, quando estes estão energizados, sendo caracterizada como um ensaio não-destrutivo capaz de evidenciar muitas falhas (INSP, 2021).

A principal vantagem da termografia na manutenção de sistemas elétricos é na possibilidade de identificar falhas ou anomalias em a necessidade de intervenção física no sistema analisado, aumentando a agilidade na manutenção e diminuindo os riscos a equipe, além do fato de não interromper a operação do equipamento (GUIMARÃES, 2019).

A aplicação da termografia é feita com o uso do termovisor, um dispositivo térmico capaz de medir a radiação infravermelha da emissão de calor de um sistema, convertendo-a em para um espectro de luz visível, permitindo assim a análise no nível de temperatura de um ponto específico. O equipamento auxilia na detecção de problemas relacionados a corrente e resistência elétrica, que podem ser provocados por fatores como, conexões frouxas, corrosão, oxidação, entre outros (GUIMARÃES, 2019). A figura 14 mostra o resultado de uma inspeção termográfica em um sistema elétrico.

Figura 14 – Inspeção termográfica.



Fonte: INSP (2021).

4.2.3.1.3 Inspeção nas Pás

As pás são constituídas por um compósito de fibra de vidro, resina epóxi, entre outras resinas utilizadas na composição. A parte interna da pá é feita de uma estrutura logariana reforçada com espuma de poliuretano envolto na fibra de vidro (OLIVEIRA, et al, 2015).

Na estrutura da pá, deve ser feita uma inspeção, tanto interna quanto externa visando verificar a existência de avarias. Na parte interna, as principais são: rachaduras na resina de ligação, desacoplamento na estrutura interna e presença de ar. Já na parte externa, as avarias podem ser fissuras na superfície, ou fendas causadas por impacto de raios ou aves.

Ademais, a inspeção deve observar a presença de sujeiras na borda de ataque, para evitar a queda na produtividade do dispositivo, analisar as condições dos parafusos e do torque, verificar o sistema de lubrificação dos rolamentos e se o posicionamento da ponta da pá encontra-se correto.

4.2.3.2 Monitoramento de Condições

A técnica de manutenção preditiva com base no monitoramento das condições consiste em monitorar parâmetros específicos de operação, principalmente dos aerogeradores. Para isso, utilizam-se sistema de monitoramento e aquisição de dados, geralmente em complemento com o SCADA fornecido pelo fabricante do aerogerador, para detectar possíveis avarias ou tendências de falhas. Também é possível coletar a amostra de elementos para realizar a análise da condição. As principais técnicas aplicadas no monitoramento de conduções são: análise de

vibrações, análise de óleo lubrificante, monitoramento da temperatura e métodos baseados em SCADA.

4.2.3.2.1 Análise de óleo Lubrificante

Esse método tem como objetivo identificar a condição do óleo usado no sistema de lubrificação de sistemas rotativos. Segundo Reis (2017), o principal fator responsável por avarias em caixas multiplicadoras é a degradação do óleo lubrificante, causada pela presença de impurezas, altas temperaturas, contato com as partículas de água presentes e pelo desgaste da estrutura do compartilhamento.

O método consiste na verificação do óleo através da análise de viscosidade, da presença de conteúdo ácido ou água, da temperatura, de oxidação, de desgaste e contagem de partículas sólidas. O conjunto desses fatores são capazes de identificar a presença de fendas na estrutura das engrenagens e rolamentos, que em conjunto com a aplicação da boroscopia podem apontar precisamente o estado interno da caixa multiplicadora (MÁRQUEZ et al., 2012).

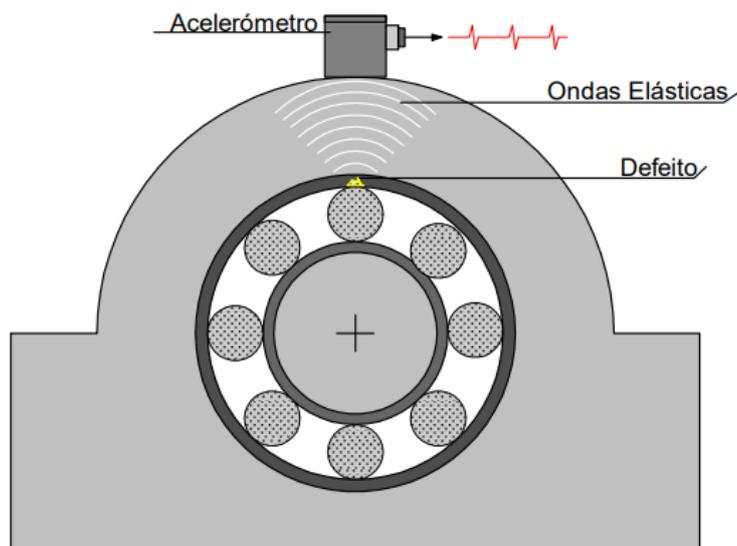
O resultado da análise de óleo permite o gestor de O&M tomar a decisão mais apropriada para diminuir o risco de avaria. A depender do estado do óleo, pode ser feita a filtragem, conhecida como *flushing*, que circula o fluido em um sistema fechado com energia, velocidade e temperatura controladas, para que haja a remoção das partículas sólidas presentes.

4.2.3.2.2 Análise de vibrações

As principais causas de vibração em aerogeradores são provenientes de problemas mecânicos, como desequilíbrio, desalinhamento, rolamentos defeituosos, problemas em engrenagens, folgas, lubrificação deficiente e ressonâncias (SEQUEIRA, 2012). O método de análise de vibrações é empregado em alguns componentes do aerogerador, como pás, rolamentos, caixa de engrenagens, freios mecânicos e gerador (GAMIDI, 2009).

A análise é feita com base no monitoramento das vibrações, que busca identificar as variações de frequência no sistema afetado. A metodologia mais comum baseia-se na amplitude de vibração e na velocidade de rotação do componente, são calculadas e comparadas medições para identificar o módulo de falha. A aquisição dos dados de vibração é obtida por meio de sensores como o acelerômetro, podendo ser no domínio do tempo (*time waveform*), em que a amplitude de onda da vibração varia, ou no domínio da frequência (FFT), em que se descrevem as amplitudes máximas correspondente às frequências de vibração presentes (HANLY, 2016). A figura 15 mostra a obtenção dos dados de vibrações proveniente de uma falha em rolamento.

Figura 15 – Análise de vibrações de um componente rotativo.



Fonte: SEQUEIRA (2012).

A partir dos dados obtidos e com o uso de métodos computacionais, pode-se analisar o comportamento das ondas de vibração para determinar se existe uma falha. Entretanto, esse método de análise limita-se a identificar anomalias em tempo real, o que dificulta determinar falhas em estágio inicial (MANGUEIRA et al, 2020).

4.2.3.2.3 Monitoramento da temperatura

O monitoramento da temperatura é amplamente utilizado no setor eólico, pois a variação da temperatura em alguns componentes é um grande indicativo de falha. Segundo a norma da IEEE (1986), alguns componentes do aerogerador apresentam variação de temperatura de operação padronizadas, portanto, os componentes que operam acima dessa faixa podem estar sofrendo um processo grave de deterioração.

Os principais componentes que são monitorados quanto à temperatura são: rolamentos do sistema de conversão mecânica, bobinas do gerador e o próprio óleo lubrificante. Os dados de temperatura são coletados pelo sistema SCADA, através de sensores como os de termo resistência, termopares e pirômetros. A medição da temperatura sofre muita influência do meio externo, como variações na velocidade de rotação, viscosidade do óleo, entre outros, esse tipo de medição se torna mais assertivo quando usado em conjunto com outros métodos de detecção de falhas, como a análise de vibrações (SIMÕES, 2018).

4.2.3.2.4 Métodos baseado em SCADA

Além dos outros métodos, pode-se aplicar a manutenção preditiva através dos dados de operação, principalmente do aerogerador. A aquisição dos dados da turbina é feita pelo sistema

SCADA, que além de ser usado como uma ferramenta de operação também é um repositório de dados precioso que armazena o histórico das turbinas. Alguns métodos de inteligência artificial são capazes de identificar padrões de comportamento e prever possíveis falhas nos componentes monitorados.

A análise dos dados de temperatura dos rolamentos do sistema mecânico é um dos métodos mais comuns de manutenção preditiva (SILVA, 2017). Os fabricantes dos componentes rotativos das turbinas disponibilizam as faixas de temperatura aceitável de operação, assim esses valores servem de referência para identificar potenciais falhas, pois os componentes que operam acima desses níveis tendem a se desgastar mais rapidamente.

Outras estratégias de análise de dados estão sendo incorporadas ao setor de geração eólica, para aumentar o desempenho dos ativos através de previsões em conjunto com estratégias de O&M (RIBEIRO et al, 2019). Com o desenvolvimento acentuado da Ciência de Dados, metodologias como *Big Data*, *Machine Learning* e *Business Intelligence* estão sendo fundamentais para a gestão de O&M.

Por fim, vale ressaltar que os custos com a aplicação de estratégias de manutenção preditiva têm custos iniciais elevados, pois exige o de ferramentas computacionais, a aquisição de instrumentos de medição e deve dispor de uma mão de obra específica para a sua execução (SILVA, 2017). Entretanto, esse tipo de manutenção tende a ser vantajoso no longo prazo, pois a medida em que se dispõe de mais dados de operação os métodos aplicados passam a ser mais assertivos, evitando a avaria nos componentes e consequentemente diminuindo as perdas de receita por longas paradas.

4.3 Modelos de contrato de manutenção

Para executar as atividades de manutenção, as empresas proprietárias de parques eólicos firmam contratos de prestação de serviço com empresas terceirizadas. Geralmente são firmados contratos de manutenção específicos para um subsistema da usina, como para o conjunto de aerogeradores, rede de média tensão, subestação e linha de transmissão (SANTOS, 2016).

A partir do contrato é definido o escopo das atividades de responsabilidade da terceirizada, o subsistema contemplado e o modelo de atuação. Além disso, são realizadas reuniões para discussão dos resultados alcançados, através de indicadores de desempenho e metas estabelecidas. A seguir são apresentadas as principais modalidades de contrato de O&M de acordo com o subsistema do parque eólico.

4.3.1 Contratos em aerogeradores

Na etapa do desenvolvimento do empreendimento eólico, geralmente o investidor firma um contrato de O&M com o fornecedor das turbinas. Esse cenário de O&M é vantajoso principalmente no início da operação, pois o fabricante possui um profundo conhecimento sobre as particularidades do seu produto e tem relação ativa com os principais fornecedores dos componentes (SANTOS, 2016). No contrato celebrado, define-se a atuação de ambas as partes com relação a manutenção dos aerogeradores. Existem diversos tipos de escopo atribuído para o fabricante, podendo ter uma responsabilidade completa na manutenção dos equipamentos, denominada *full service*, ou contratos de atuação parcial.

Nos contratos *full service*, o fabricante é responsável por coordenar as atividades de O&M, executar as manutenções preventiva e corretivas, fornecer as peças e sobressalentes, incluindo os grandes componentes, e dispor de mão de obra especializada para a realização das atividades. Em relação aos escopos parciais, o fabricante realiza as manutenções preventivas e pequenas corretivas, ficando sob responsabilidade do proprietário realizar as grandes corretivas, como substituição de caixa multiplicadora, gerador e pás.

Na maioria dos contratos são definidas metas de operação, do qual o fabricante é responsável por atingir os valores estabelecidos, estando sujeito a sofrer multas financeiras em caso de não alcançar as metas, ou de receber bônus quando a performance do empreendimento for acima dos valores estabelecidas no contrato. Dentre as metas estabelecidas, a mais usada é disponibilidade de tempo; geralmente é estabelecida a disponibilidade dos aerogeradores entre 97% e 98%. Há contratos que são negociados levando em conta a disponibilidade energética, que mede a porcentagem de energia gerada em relação a máxima possível. Essa métrica é mais relevante para o proprietário, pois impacta diretamente nos ganhos com a venda de energia (SANTOS, 2016).

Além disso, os contratos de O&M pelo fabricante variam em relação ao tempo de duração. Geralmente a duração desses contratos vigoram nos primeiros anos de operação, variando entre 2 e 5 anos, que compreende o tempo de garantia dos principais componentes (OLIVEIRA, et al, 2015). Após esse período, o proprietário decide se estende a duração do contrato com o fabricante, terceiriza para uma ISP (*Independent Service Provider* - prestadores de serviço independente) ou se estabelece um programa de manutenção interno, denominado de *in-house*.

No Brasil, essas outras modalidades de O&M têm ganhado espaço entre os investidores, principalmente com o fortalecimento da cadeia de suprimentos. Ademais, as empresas proprietárias têm aumentado a escala de ativos, e conseqüentemente têm adquirido mais conhecimento acerca dos seus empreendimentos e assim buscam participar ativamente das atividades de O&M. Nesse aspecto os *ISP* têm vantagem, pois oferecem mais flexibilidade para atuar em conjunto com a equipe técnica do proprietário. Em conjunto, as partes analisam e definem a estratégia de manutenção nas turbinas, com o objetivo de minimizar os custos e aumentar a confiabilidade dos equipamentos, além de permitir transferência de conhecimento técnico e gerencial entre as partes.

Outro modelo que tem ganhado espaço no setor eólico é a O&M *in-house*, ou simplesmente a primarização dos serviços de manutenção. No Brasil, esse modelo foi impulsionado pelo encerramento das atividades da Suzlon em 2017, um fornecedor de aerogeradores e serviços de O&M, com 700 MW em operação (COSTA, 2017). A partir de então, alguns proprietários passaram a assumir total gestão sobre a atividade de O&M nas turbinas. Dentre as principais vantagens desse modelo, pode-se destacar um maior domínio e independência na atividade operacional, com uma gestão estratégica específica; maior qualidade na execução dos serviços de manutenção, através da adoção das melhores práticas do setor; menor custo financeiro, quando comparado com os custos de contrato com o fabricante. Entretanto, mesmo ao adotar esse modelo, o proprietário precisa ter o apoio do fabricante para três principais atividades: fornecimento de componentes específicos, serviços especializados de engenharia e manutenção dos softwares de monitoramento e supervisão (BALSANOBRÉ, 2020).

4.3.2 Contratos no Balance of Plant elétrico

O *Balance of plant (BOP)* elétrico de um parque eólico compreende toda a estrutura responsável por escoar a energia gerada pelas turbinas, composta pela rede coletora de média tensão, subestação e linha de transmissão. Os contratos firmados de operação e manutenção do sistema elétrico podem ser ainda mais variados. Normalmente as manutenções de baixa complexidade são de responsabilidade da equipe interna do parque, bem como a realização de algumas inspeções preditivas, como termografias em pontos críticos ou medições de resistência elétrica. Para as demais atividades, os proprietários celebram contratos de O&M com empresas

especializadas, que possui o *know-how* necessário para realizar as manutenções mais complexas (SANTOS, 2016).

Geralmente essas empresas cuidam da manutenção na subestação, que por se tratar do subsistema mais crítico para o funcionamento da usina, conta com um escopo de manutenção robusto. Dentre as atividades de manutenção preventiva, pode-se citar a limpeza dos equipamentos, reaperto nas conexões dos disjuntores, transformadores, cabos e barramentos. Além disso, diversas análises e testes devem ser feitos, como teste de resistência de isolamentos dos disjuntores, teste de resistência dos contatos e o tempo de fechamento e abertura. No transformador, por se tratar do equipamento mais importante da subestação, é verificada a relação de transformação de tensão, medição da resistência de isolamento e do enrolamento, medição do fator de potência, teste nos radiadores de resfriamento e coleta de amostra de óleo para execução do teste de rigidez dielétrica em laboratório.

Na rede elétrica, a manutenção é realizada através de inspeções visuais em componentes como isoladores, para-raios, muflas e chaves seccionadoras. Também são realizadas inspeções termográficas nas conexões, a procura de pontos com elevadas temperaturas, que consequentemente promove maior risco a operação. Por se tratar de um subsistema complexo e perigoso para realizar as atividades de manutenção, os proprietários dos parques contratam empresas terceirizadas, que dispõem de mão de obra especializada, ferramentas e equipamentos necessários para executar a manutenção.

As empresas que possuem diversos ativos de geração eólica tendem a assumir o BOP elétrico de parques integralmente. Essa estratégia reduz os custos de manutenção e aumenta a flexibilidade em relação às intervenções, possibilitando, por exemplo, que seja realizada a manutenção preventiva na linha de transmissão e na subestação no mesmo período, diminuindo a indisponibilidade do sistema por conta de paradas para manutenção.

4.4 Cadeia de suprimentos

O amadurecimento do setor eólico no Brasil é um fenômeno recente, visto que a apenas em 2009 com os leilões de venda de energia do PROINFA teve início o desenvolvimento e implantação dos parques em grande escala. Nesse contexto, desenvolveu-se uma cadeia de bens e serviços voltada as necessidades desse setor. Os principais itens que compõem a cadeia produtiva são os aerogeradores e os itens de infraestrutura elétrica e civil do parque eólico, como as fundações, linhas de distribuição e subestação. Dentre todos os bens, os aerogeradores

são os mais críticos na cadeia de suprimentos, pois correspondem a cerca de 75% do custo total do empreendimento (ABDI, 2014).

Os serviços que fazem parte da cadeia produtiva do setor de energia eólica podem ser classificados de acordo com a fase do projeto. Segundo a ABDI (2014), a cadeia de suprimentos varia de acordo com as seguintes fases: serviço de desenvolvimento de projetos de parques eólicos; serviços de apoio à negociação com clientes e fornecedores, serviços de apoio na pré-construção; serviços de implantação dos parques – instalação das turbinas e execução da obra civil e elétrica; serviços de operação e manutenção; serviços associados à certificação dos aerogeradores e treinamento técnico. A depender do porte, alguns fornecedores de bens e serviços atuam em mais de uma fase dos projetos elétricos como, por exemplo, os fabricantes das turbinas, que além de fornecer os aerogeradores podem atuar na fase de O&M (ABDI, 2014).

O fortalecimento da cadeia de suprimentos voltada à operação e manutenção tem se intensificado rapidamente, pois essa fase destaca-se por estar presente em toda a vida útil do empreendimento eólico, com o aumento dos parques em operação simultaneamente. Como a maioria dos equipamentos do parque é constituída por componentes mecânicos e elétricos, é requerido um planejamento de engenharia de manutenção específico para cada subsistema, fundamentado nas melhores práticas de gestão de manutenção e operação (OLIVEIRA, et al, 2015). Dessa forma, a cadeia de suprimentos na O&M tem como principal característica o fornecimento de peças e componentes de reposição, ferramentas, sobressalentes e serviços especializados.

Segundo Oliveira (2015), a demanda de bens e serviços na fase de O&M pode ser dividida em específicos, especializados e comuns. Os serviços específicos referem-se aqueles aplicados especialmente ao setor eólico, com procedimentos adaptados conforme a necessidade da área. Os serviços especializados representam as atividades que precisa de conhecimento técnico específico, mas que é aplicado em outros setores. Por fim, os serviços comuns são aqueles que não precisam de uma mão de obra especializada, facilitando o processo de contratação de fornecedores. A seguir serão apresentados alguns serviços para cada grupo.

Serviços específicos:

1. Consultoria ambiental;
2. Manutenção dos aerogeradores;
3. Manutenção do BOP elétrico;

4. Predição de vento e geração;
5. Boroscopia dos componentes mecânicos da turbina;
6. Manutenção das torres anemométricas;
7. Treinamento/formação no setor eólico;
8. Inspeção de saída de garantia dos aerogeradores.

Serviços especializados:

1. Manutenção de linha de transmissão;
2. Manutenção preventiva na subestação;
3. Coleta de resíduos contaminados das manutenções;
4. Coleta e análise de óleo dos transformadores;
5. Serviços de comunicação via rádio;
6. Serviços de guindaste e caminhões muncks;
7. Treinamentos de segurança do trabalho (NR10, NR35, etc.);
8. Serviços relacionados a condições de contingência;
9. Vigilância patrimonial;
10. Sistemas de segurança (CFTV, alarmes, etc.);
11. Fornecimento, inspeção e calibração de equipamentos e ferramentas necessárias à manutenção;
12. Fornecimento e inspeção de EPI's;
13. Serviços de exames médicos admissionais, demissionais e periódicos para as atividades específicas realizadas em um parque eólico;
14. Assessoria jurídica para gestão dos contratos de arrendamento das terras;
15. Fornecimento de uniformes apropriados para os serviços de risco.

Serviços comuns:

1. Limpeza e manutenção dos acessos e áreas internas;
2. Manutenção predial;
3. Serviço de paisagismo;
4. Confecção e instalação de placas de sinalização e identificação;
5. Serviços de informática e suporte técnico;

No fornecimento de serviços especializados e comuns, o país já conta com uma cadeia de suprimentos robusta, que já atua há décadas em outros ramos industriais. Em relação aos serviços específicos, o setor eólico brasileiro está em fase de consolidação, acelerado pelo volume de parques que está em operação. Entretanto, ainda há diversas dificuldades e enfrentadas pelos contratantes e fornecedores dos serviços presente na fase de O&M. Segundo GONZÁLEZ (2019), os principais problemas enfrentados pelos gestores de parques eólicos são a dificuldade de encontrar fornecedores qualificados, falta de informações dos serviços prestados.

Do lado dos fornecedores, a falta de estabelecimento de contratos de médio e longo prazo dificulta o planejamento estratégico de atuação, que acabam ocorrendo picos de fornecimento por conta de um elevado número de solicitações em determinados períodos do ano, comprometendo os preços, prazo e qualidade dos serviços (ABDI, 2014).

4.5 Monitoramento e controle da operação

Do ponto de vista do proprietário, o principal objetivo de um empreendimento eólico em operação é proporcionar um retorno financeiro que justifique o alto investimento para projeto e implantação. Esse retorno financeiro está diretamente relacionado com o desempenho do parque, através do volume de produção de energia elétrica. Nesse contexto, o monitoramento e controle contínuo da operação não é fundamental apenas para medir o desempenho, mas para atuar de forma a otimizar a geração (BARROS, 2019).

Para monitorar e controlar todo o complexo eólico, é necessário um sistema computacional que faça a coleta e análise dos dados de operação em tempo real, para que assim seja possível otimizar a geração de eletricidade. O sistema SCADA é responsável por realizar essas atividades. Em relação às turbinas, esse recurso é desenvolvido pelo próprio fabricante, que também presta serviço de manutenção e atualização do sistema.

Dentre as diversas funções que o SCADA possui, as principais são: comunicação entre os aerogeradores, subestação e torre meteorológica do parque eólico; execução de comandos de partida, parada, *reset* e *reboot* nos aerogeradores; parada ou limitação de potência por conta de condições meteorológicas ou de rede elétrica. Além disso, é possível adquirir dados operacionais das turbinas, como parâmetros elétricos, mecânicos, alarmes, variáveis climáticas e até mesmo relatórios estatísticos de performance do parque (BARROS, 2019). A seguir estão listados os dados principais disponibilizados pelo sistema SCADA.

- Tensão e corrente elétrica;
- Potência ativa e reativa;
- Velocidade e direção do vento na altura da nacelle;
- Temperatura e pressão na nacelle;
- Velocidade de rotação do rotor;
- Tempo de operação;
- Ângulo de passo das pás (ângulo de *pitch*);
- Ângulo da direção da nacelle;
- Energia produzida;
- Alarmes e eventos registrados, com data, hora, duração e descrição do problema.

Por conta do volume e variedade de dados, geralmente os proprietários contratam softwares especialistas para analisar, interpretar e gerar indicadores técnicos e gerenciais para compreensão do desempenho dos aerogeradores. Algumas empresas também fornecem soluções de predição de falhas através dos dados operacionais adquiridos pelo sistema SCADA, ajudando na gestão da manutenção das turbinas.

As empresas proprietárias de complexos eólicos estão aumentando o volume dos ativos em operação, com parques em diversas localidades e com diferentes fabricantes de turbinas. Essa combinação aumenta a complexidade do monitoramento e controle da operação, pois exige o controle de múltiplos sistemas supervisórios com diferentes características. Além disso, o controle da operação precisa de uma equipe especializada e de estrutura para abrigar as atividades de monitoramento. Por conta disso, os proprietários têm implantado Centros de Operação de geração, normalmente chamado de COG, para centralizar toda as atividades de monitoramento e controle de seus ativos de geração, com funcionamento 24 horas por dia. O centro de operação conta com tecnologia baseada no Eclipse Software, que substituí diversos sistema SCADA por apenas um sistema integrado e padronizado, garantindo agilidade na tomada de decisão, segurança e alta performance da geração. Ademais, essa solução realiza cálculo de diferentes indicadores de desempenho e permite categorizar todos as paradas das unidades geradoras, possibilitando que os proprietários dos parques auditem os contratos de O&M dos aerogeradores e do sistema elétrico.

4.6 Indicadores de desempenho

Na fase de operação, empregam-se diversos indicadores para medir a performance de um empreendimento eólico. O estudo realizado por Santos (2016), descreve os principais indicadores usados pela gestão dos parques, sendo esses agrupados pelas seguintes dimensões: Financeira, Energia Gerada, Operação e Manutenção e Pessoas. A seguir é explanado sobre cada indicador, de acordo com a sua dimensão.

4.6.1 Indicadores Financeiros

A dimensão Financeira agrupa os indicadores relacionados ao retorno financeiro para os investidores, sendo crucial para a competitividade da energia eólica frente as demais fontes de energia. Os principais indicadores são: Receita Bruta, Custos Administrativos, Custos de O&M, Custo Unitário e Lucro Unitário.

4.6.1.1 Receita Bruta - RB

A receita bruta de um empreendimento eólico é o valor recebido pelo volume de energia líquida entregue ao cliente.

$$RB = EL * PV \quad 1$$

Em que:

RB: Receita bruta;

EL: Energia Líquida;

PV: Preço unitário da venda de energia.

O preço de venda unitário varia de acordo com o contrato de comercialização e geralmente sofre reajuste anual com base no índice de inflação (IPCA). Nos casos que o empreendimento não entrega o volume de energia estabelecido no contrato do ACR, parte da receita é ressarcida por insuficiência de lastro. Em contratos do ACL, caso isso ocorra a contratada deve adquirir energia de outro agente gerador para compensar a insuficiência da sua geração.

4.6.1.2 Custos Administrativos – CA

Os custos administrativos envolvem os custos que não estão relacionados diretamente com as atividades de operação e manutenção, como custos com pessoal próprio, custos jurídico e contábil, despesas com materiais administrativos, entre outros.

$$CA = \sum C_n \quad 2$$

Onde:

CA: Total do custo administrativo.

C_n : Custos Individuais relacionado as atividades administrativas.

4.6.1.3 Custos de O&M – $C_{O\&M}$

Os custos de O&M referem se aos custos dos contratos de manutenção, contratação de serviços terceirizados e outros custos como reposição de peças e sobressalentes.

$$C_{O\&M} = CCM + CST + OC \quad 3$$

Onde:

$C_{O\&M}$: Custo de O&M;

CCM: Custos de Contratos de Manutenção;

CST: Custos de Serviços Terceirizados;

OC: Outros custos operacionais.

4.6.1.4 Custo de Geração Unitário - CGU

Refere-se ao custo total por cada unidade de energia gerada.

$$CGU = \frac{CA + C_{O\&M}}{EB} \quad 4$$

Em que:

CGU: Custo de Geração Unitário;

CA: Custos Administrativos;

$C_{O\&M}$: Custos de O&M;

EB: Energia Bruta gerada.

O custo de geração unitário é uma ótima métrica para verificar se o parque eólico é ou não rentável para os investidores. Além disso, esse indicador pode ser usado para comparar diferentes empreendimentos pertencentes ao mesmo proprietário, possibilitando análises e decisões relativas a investimentos. Geralmente grandes complexos eólicos possuem um custo de geração unitário menor quando comparado com complexos menores, visto que toda a infraestrutura elétrica e de mão de obra é compartilhada pelas unidades geradoras, evidenciando que a fonte eólica é cada vez mais rentável quando implantada em escala.

4.6.1.5 Lucro Unitário – LU

O lucro unitário de um parque eólico, como em outros empreendimentos de geração, é condicionado pelo preço de comercialização da energia e pelos custos operacionais e administrativos. Essa métrica é obtida pela seguinte equação:

$$LU = \frac{RB - I - CA - C_{O\&M}}{EB} \quad 5$$

Onde:

LU: Lucro Unitário;

RB: Receita Bruta;

I: Impostos;

CA: Custos Administrativos;

CO&M: Custos de O&M;

EB: Energia Bruta gerada.

4.6.2 Indicadores de Energia Gerada

Os indicadores de energia gerada estão relacionados com o resultado operacional dos parques. As atividades operacionais aplicadas na operação e manutenção têm como objetivo maximizar a geração, ou seja, aumentar a produtividade dos parques. Os principais indicadores usados desse grupo são: Energia Contratada, Energia Bruta, Perdas Elétricas até o Ponto de Conexão, Energia Líquida, Fator de Capacidade, Disponibilidade de Tempo, Disponibilidade de Energia e Eficiência da Turbina.

4.6.2.1 Energia Contratada – EC

Esse indicador está relacionado à quantidade de energia que deve ser entregue pelo empreendimento eólico durante toda a sua vida útil. Esse montante é definido no contrato de comercialização de energia, devendo ser cumprido sobre risco de sofrer penalidades financeiras. O volume de energia contratado é estimado pela empresa proprietária do projeto, com base nos estudos de prospecção e certificação do empreendimento.

Com base na capacidade de geração estimada pela certificação do parque, é estabelecido um valor inferior a este para a energia contratada e dessa forma aumenta-se as chances de otimização da entrega de energia.

$$EC < CGE * t \quad 6$$

Onde:

EC: Energia Contratada;

CGE: Capacidade de Geração Efetiva;

t: Período de geração de energia.

4.6.2.2 Energia Bruta – EB

Esse indicador mede a quantidade de energia gerada pelos aerogeradores em determinado período, desconsiderando as perdas que ocorrem no sistema elétrico.

$$EB = \sum EGT \quad 7$$

Onde:

EB: Energia Bruta;

EGT: Energia gerada nas turbinas do parque.

4.6.2.3 Perdas Elétricas até o Ponto de Conexão – PEPC

As perdas elétricas até o ponto de conexão ocorrem na rede de média e alta tensão e nos postos de transformação. São medidas através de medidores de energia, geralmente instalados na subestação coletora do parque e na subestação da transmissora.

As perdas elétricas no parque geralmente são estimadas na fase de projeto através, por exemplo, da distância e material dos condutores e dados dos equipamentos elétricos. Normalmente o acompanhamento desse indicador serve para identificar possíveis anomalias na rede elétrica do parque, já que em condições normais o valor de energia perdida é praticamente o mesmo.

$$PEPC = EB - EL - PRB \quad 8$$

Onde:

PEPC: Perdas Elétricas até o Ponto de Conexão;

EB: Energia Bruta;

EL: Energia Líquida;

PRB: Perdas na Rede Básica.

4.6.2.4 Energia Líquida – EL

A energia líquida refere-se ao volume de energia entregue ao consumidor final. Esse volume é considerado para determinar o valor da receita bruta do empreendimento.

$$EL = EB - PEPC - PRB \quad 9$$

Em que:

EL: Energia Líquida;

EB: Energia Bruta;

PEPC: Perdas Elétricas até o Ponto de Conexão;

PRB: Perdas na Rede Básica.

A produção de energia líquida é considerada para verificação do cumprimento do contrato de comercialização de energia e geralmente é acompanhado mensalmente pela direção. Geralmente esse indicador é usado para comparar o desempenho atual do parque comparado com o seu histórico, juntamente com o perfil de vento no período. A curva formada pela geração líquida ao longo do tempo indica a sazonalidade do vento, fundamentando a gestão e planejamento das atividades de manutenção.

4.6.2.5 Fator de Capacidade – FC (%)

O FC é o principal indicador usado para quantificar a qualidade de um empreendimento eólico. Esse indicador mostra a relação entre a geração real em um determinado período pela capacidade máxima de produção considerando o mesmo período.

$$FC = \frac{EB}{CGI * t} \quad 10$$

Onde:

FC: Fator de capacidade;

EB: Energia Bruta;

CGI: Capacidade de Geração Instalada;

t: Período analisado.

O principal condicionador do FC é o vento presente no terreno onde o parque está localizado, pois quanto maior e mais constante for a velocidade do vento incidente nos aerogeradores, mais próximo o FC estará da sua geração nominal. Entretanto, outros fatores influenciam no FC, como o tipo de turbina, que a depender do modelo, principalmente no que concerne ao comprimento das pás e as características elétricas e mecânicas dos componentes, pode fazer um melhor aproveitamento do vento.

4.6.2.6 Disponibilidade de Tempo – DT (%)

A DT é o indicador mais usado na gestão de parques eólicos e pode ser aplicado em diferentes situações. Geralmente é calculado separadamente a disponibilidade de tempo do conjunto de turbinas e do sistema elétrico.

$$DT = \frac{TOP}{TTP} \quad 11$$

Onde:

DT: Disponibilidade de Tempo;

TOP: Tempo de Operação no Período;

TTP: Tempo Total no Período.

A DT é um dos indicadores mais utilizados para medição do desempenho de parques eólicos. A maioria dos contratos de manutenção é baseada na DT, em que os responsáveis pelas atividades se comprometem em atingir um valor mínimo, normalmente entre 97% e 98%. O principal condicionante desse indicador é o tempo de parada, seja pelas turbinas ou pelo sistema elétrico.

No caso das turbinas, quanto mais otimizada for as atividades de manutenção e menor a quantidade de falhas inesperada maior será o valor da DT. O controle desse indicador muitas vezes se diverge quando comparado os valores determinados pela contratada e pela gerência do parque, pois ocorrem divergências com relação às paradas e falhas consideradas de responsabilidade da contratada, o que costuma gerar discussões entre as partes. Com base nas soluções de sistemas supervisórios explanados no tópico 4.5, pode-se padronizar o cálculo desse indicador e diminuir as divergências de valores.

Em relação à disponibilidade do sistema elétrico, essa não é considerada nos contratos de manutenção das turbinas, mas é fundamental para garantir um bom desempenho do complexo. As paradas nesse sistema têm grande impacto na geração, pois uma simples manutenção na subestação pode deixar todo o parque indisponível para geração, mesmo que as turbinas estejam disponíveis.

Portanto, é fundamental que a gestão analise a DT sob os diferentes sistemas, para identificar o principal causador de perdas de performance.

4.6.2.7 Disponibilidade de Energia – DE (%)

A DE é um indicador que mostra a relação entre a geração real em um período de tempo com a geração máxima que poderia ser alcançada em condições normais, sem quaisquer problemas, alarmes, paradas, etc. Para determinar a geração teórica, ou seja, a geração com DT em 100%, considera-se a curva de potência real de cada turbina e a velocidade de vento nos anemômetros e torres anemométricas próximos ao ponto analisado. Com isso, a DE é calculada pela seguinte equação:

$$DE = \frac{GER}{GET} \quad 12$$

Onde:

DE: Disponibilidade de Energia;

GER: Geração de Energia Real;

GET: Geração de Energia Teórica.

Esse indicador é mais assertivo na análise de desempenho de parques eólicos, pois mostra as perdas de geração por conta das deficiências na gestão da manutenção. Entretanto, esse indicador ainda é pouco utilizado, principalmente no que se refere aos contratos de O&M, pois a forma de determinar o potencial de energia gerada por uma turbina é complexo, envolve vários fatores e possui diferentes métodos de cálculo.

Algumas empresas que realizam a manutenção nos aerogeradores oferecem garantias com base na DE, porém esses contratos são mais caros quando comparados com os que garantem DT. Em contratos nessa modalidade, a energia produzida é comparada com os valores de P90, obtido pela certificação do empreendimento. Dessa forma, torna-se vantajoso financeiramente para o investidor como para a contratada, pois ambas as partes tendem a faturar mais com metas baseadas na DE.

4.6.2.8 Eficiência da Turbina – ET (%)

Esse indicador é semelhante à DE, pois mostra a relação entre a energia gerada com a energia que poderia ter sido produzida em determinado período para cada turbina.

$$ET = \frac{EGT}{ETT} \quad 13$$

Onde:

ET: Eficiência da Turbina;

EGT: Energia Gerada da Turbina;

ETT: Energia Teórica da Turbina.

Analisar o desempenho individual de cada turbina é relevante na gestão da manutenção, pois identifica os principais responsáveis por falha na performance de um parque. Por exemplo, a DE pode estar sendo impactada por um grupo de aerogeradores com alguma limitação de potência, ou seja, por aerogeradores com baixa eficiência. Partindo desse indicador, com a análise de alguns outros fatores, como a comparação da curva de potência real pela certificada, pode-se identificar problemas relacionados à aerodinâmica, limitações de potência da rede, perdas mecânicas e elétricas, entre outros.

4.6.3 Indicadores de Operação e Manutenção

Os indicadores de operação e manutenção referem-se ao planejamento e execução das atividades de manutenção, que busca garantir a integridade dos ativos sem impactar significativamente na capacidade de geração de energia. Os indicadores englobam as métricas relacionadas à ocorrência de falhas e às atividades de manutenção. É composta pelos seguintes indicadores: Número de Falhas Internas, Número de Falhas Externas, Tempo Médio Entre Falhas, Tempo Médio de Reparo, Custo Total de Falha e Custo de Manutenção Unitário.

4.6.3.1 Número de Falhas – NF (falhas/ano)

As falhas são os eventos que paralisam parte ou toda a produção como, por exemplo, a falha de um componente de um aerogerador que o torna indisponível. Falhas de um complexo eólico podem acontecer em diversos subsistemas, com diferentes impactos. O NF impacta no custo da manutenção, na disponibilidade do parque, na energia bruta gerada, no custo de não geração, entre outros.

As falhas que ocorrem nas turbinas são mais frequentes, porém têm impacto menor na geração, pois apenas um aerogerador se torna indisponível para produzir. Falhas que ocorrem na rede de média tensão não são frequentes, mas causam a indisponibilidade de um grupo de turbinas, comprometendo uma parte significativa da capacidade de produção. Já as falhas na subestação são incomuns, mas a depender do equipamento pode inviabilizar parte ou toda a geração do parque. Por fim, falhas na linha de transmissão ocorrem raramente e são as mais críticas na operação, pois causam toda a parada do complexo eólico. A figura 19 mostra a relação entre a quantidade e impacto das falhas de acordo com cada subsistema de um parque eólico.

Figura 16 – Relação entre impacto e ocorrências de falhas em parques eólicos.



Fonte: SANTOS (2016).

Dessa forma, o número de falhas deve ser acompanhado periodicamente e analisado separadamente para cada subsistema. O histórico de falha para cada ano mostra uma perspectiva mais ampla do desempenho do parque ao longo do tempo, mas deve ser analisado em conjunto com outros indicadores.

4.6.3.2 Tempo Médio Entre Falhas – TMEF (h)

Como o próprio nome sugere, esse indicador expressa o tempo médio entre a ocorrência de cada falha. O TMEF pode ser calculado para cada componente, equipamento ou subsistema importante para o processo de geração e é muito usado no setor de engenharia de manutenção e confiabilidade. Este indicador é calculado pela relação entre o tempo de operação pela quantidade de falhas.

$$TMEF = \frac{TO}{NF} \quad 14$$

Em que:

TMEF: Tempo Médio Entre Falhas;

TO: Tempo de operação;

NF: Número de Falhas.

4.6.3.3 Tempo Médio de Reparo – TMR (h)

Este indicador expressa o tempo médio que é gasto para reparar um equipamento após a ocorrência de uma falha. O TMR mostra a eficiência do responsável pela manutenção, pois quanto mais rápidos os equipamentos são reparados menor será o impacto por conta da indisponibilidade, além de evidenciar a agilidade das equipes na resolução dos problemas.

$$TMR = \frac{TF}{NF} \quad 15$$

Onde:

TMR: Tempo Médio de Reparo;

TF: Tempo total das Falhas;

NF: Número de Falhas.

Normalmente as empresas mantêm um estoque de peças e sobressalentes para os sistemas mais críticos ou com mais ocorrências de falhas, para assim agilizar a execução do reparo. Esse indicador pode ser usado pelo proprietário para exigir um tempo máximo de reparo por subsistema, para não comprometer a performance de uma turbina. Além disso, o TMR pode ser usado para estimar perdas de produção no curto prazo.

4.6.3.4 Custo Total de Falha – CTF (R\$)

Esse indicador leva em consideração os custos para reparar uma falha, como o custo do serviço, das peças e sobressalentes usados e a perda de geração.

$$CTF = CSR + CPS + PGF \quad 16$$

Onde:

CTF: Custo Total de Falha;

CSR: Custo do Serviço de Reparo;

CPSR: Custo das peças e Sobressalentes;

PGR: Perda de Geração por Falha.

4.6.3.5 Custo de Manutenção Unitário – CMU

Expressa a relação entre o custo de manutenção com a geração em um determinado período.

$$CMU = \frac{C_{O\&M}}{EB} \quad 17$$

Onde:

CMU: Custo de Manutenção Unitário;

$C_{O\&M}$: Custo de O&M;

EB: Energia Bruta Gerada.

4.6.4 Indicadores de Pessoas

A dimensão de pessoas engloba as características de perfil, capacidade técnica e gerencial da equipe, compreendida pelos supervisores de manutenção, gerentes e diretores responsáveis pelas decisões tomadas nos processos de O&M e pelos resultados alcançados. Os indicadores que a compõem são: Tempo de Capacitação e Taxa de Rotatividade.

4.6.4.1 Horas de Capacitação – HC (h/ano)

O indicador expressa o HC oferecido à equipe responsável pela operação e manutenção no parque. Esse indicador é importante pois prepara e capacita os profissionais envolvidos nas atividades, para realizar trabalhos com qualidade e agilidade.

$$HC = CO + CE \quad 18$$

Onde:

HC: Tempo de Capacitação;

CO: Capacitação Obrigatória;

CE: Capacitação Extra.

Essa métrica divide-se entre a capacitação obrigatória, como os treinamentos de NR10 e NR35 para a equipe técnica, e capacitação extra, como treinamentos de boas práticas e qualidade. A capacitação dos gestores é importante para desenvolver um melhor perfil

investigativo, melhorar a gestão de pessoas e aplicar novas tendências do mercado nas estratégias de O&M, visando aumentar o desempenho do parque.

4.6.4.2 Taxa de Rotatividade – TR (%)

A TR expressa a relação de desligamento dos colaboradores da equipe de O&M. Em casos que há uma grande taxa de rotatividade, ou seja, há demissão e contratação de muitas pessoas, é reduzida a capacidade e conhecimento da equipe em lidar com as especificidades dos equipamentos.

$$TR = \frac{ND}{NC} \quad 19$$

Onde:

TR: Taxa de Rotatividade;

ND: Número de Demissões;

NC: Número de Colaboradores.

CONCLUSÕES

A presente pesquisa buscou fundamentar os principais fatores de O&M para mostrar a importância da gestão da O&M no desempenho de parques eólicos no Brasil. Inicialmente, foram explorados os fundamentos da geração eólico-elétrica e os subsistemas que compõem um complexo eólico, que se resumem basicamente aos aerogeradores, rede de média tensão, subestação e linha de transmissão. Ademais, no capítulo 4 foram abordados de forma abrangente os principais aspectos que impactam na gestão da O&M. Fatores como, gestão organizacional, planejamento da manutenção, gestão de contratos e cadeia de suprimentos são determinantes para o planejamento estratégico das atividades operacionais nas usinas. Nesse sentido, pode-se constatar que o objetivo principal foi alcançado, uma vez que, com base na análise dos fatores mais relevantes para a gestão da O&M, foram expostas como cada um impacta na eficiência das turbinas, nos custos de manutenção e gestão de mão de obra.

Em relação aos objetivos específicos, o primeiro tem como foco analisar o panorama geral da O&M no setor eólico brasileiro. Isso foi possível através da explanação nos capítulos 3 e 4, pois foi abordado todo o contexto da O&M usado nos parques eólicos. Por conta de ser um fator essencial no desempenho de projetos eólicos, principalmente no que tange ao retorno financeiro, os investidores estão buscando desenvolver uma gestão de O&M robusta. Isso é feito através de uma mão de obra qualificada, tanto no nível técnico como gerencial, e uso de ferramentas computacionais para suporte e auxílio na tomada de decisão.

Outro objetivo define as principais vantagens e desvantagens dos tipos de manutenção aplicadas em parques eólicos. No tópico 4.2 deste trabalho, foram abordados os conceitos da manutenção corretiva, preventiva e preditiva, bem como as suas peculiaridades ao serem aplicadas no setor eólico. As vantagens e desvantagens foram definidas com base nos custos da execução das atividades de manutenção, contemplando os custos de mão de obra, peças de reposição, sobressalentes e custo de não geração, causado pela indisponibilidade dos subsistemas.

O último objetivo define os indicadores de desempenho, desde aspectos técnicos na execução das manutenções até atividades gerenciais que definem as estratégias de O&M aplicadas nos parques eólicos. Com base nisso, foi proposto um conjunto de indicadores de desempenho, divididos em quatro dimensões: Financeira, Energia Gerada, Operação e Manutenção e Pessoas. A dimensão Financeira agrupa os indicadores relacionados ao retorno

financeiro para os investidores, ou seja, medem as fontes de receita, despesa e custos de O&M de um projeto eólico. Os indicadores de energia gerada estão relacionados com o resultado operacional dos parques e geralmente são usados pela gerência. A dimensão de operação e manutenção refere-se aos indicadores usados no planejamento e execução das atividades de manutenção. Por fim, os indicadores de Pessoas englobam as características de perfil, capacidade técnica e gerencial, medindo a evolução e maturidade da equipe responsável pela O&M.

Portanto, conclui-se que a gestão de O&M impacta diretamente no desempenho dos empreendimentos eólicos. Dessa forma, uma boa gestão de O&M é capaz de minimizar os custos operacionais sem comprometer a confiabilidade e segurança dos equipamentos e sistemas, tornando a eólica mais competitiva frente as demais fontes.

Sugestões para trabalhos futuros

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, sugere-se o estudo de caso da gestão da O&M aplicada a um projeto eólico em operação há 5 anos ou mais, com base nos fatores abordados neste trabalho. Na pesquisa em questão, pode-se utilizar os indicadores de desempenho abordados para mensurar, sob diferentes perspectivas, o desempenho da O&M.

Outros estudos voltados à gestão da manutenção são necessários, como o desenvolvimento de um plano de manutenção adequado as peculiaridades do setor, com foco na eficiência operacional. Como exemplo, pode-se criar um plano de manutenção voltado à resolução de falhas e avarias nos componentes do aerogerador, através de métodos como FMEA e RCA.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica 2021**. São Paulo. Disponível em:

<https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/07/ABEEOLICA_BOLETIMANUAL-2021_PORT.pdf>. Acesso em: 02 out. 2022.

GWEC, **Global Wind Statistics 2021**. Global Wind Energy Council. Publicado em 14 de fevereiro de 2021.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Energia eólica no Brasil e Mundo – Ano de referência – 2015**. 2016. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-chega-ao-7-lugar-no-ranking-da-geracao-eolica-mundial>>. Acesso em: 03 out. 2022.

CAMARGO, F. **Desafios e oportunidades para a energia eólica no Brasil: recomendações para políticas públicas**. WWF-Brasil, 2015. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/informacoes/biblioteca/?46523/desafios-eoportunidades-para-a-energia-eolica-no-brasil-recomendacoes-para-politicaspublicas>>. Acesso em: 02 out. 2022.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 2 out. 2022.

SANTIAGO, N. R. A. **Metodologias para avaliação do desempenho e previsão de avarias em turbinas eólicas utilizando a curva de potência do fabricante**. 2012. 148p. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis - Conversão Elétrica e Utilização Sustentáveis) - Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciência e Tecnologia, 2012.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 347 p. ISBN 9788521621607.

RESENDE, Carlos. **Fontes de Energia Alternativa: Energia Eólica**. 2018. Disponível em: <https://www.shareenergy.com.br/fontes-de-energia-alternativa-energia-eolica/>. Acesso em: 4 out. 2022.

SANTOS, M. A.T. **Sistema de medição de desempenho para operação e manutenção de parques eólicos no Brasil**. 2016, 200 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

PAVINATTO, Eduardo Fiorini. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica**. 2005. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2005.

SILVA, Hudson de Souza. **Análise do desempenho em complexos eólicos brasileiros**. 2019. 113 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Pontífca Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.

TEIXEIRA, Fellipe Marques. **Dimensionamento de cabos de Alumínio para Rede Subterrânea de Média Tensão de um Parque Eólico**. 2015. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Energias Renováveis). Programa de PósGraduação do Departamento de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

BORDUCHI, Felipe C.; DURÃO, Jonny; SANTOS, Robson D. V. dos. **Estudo do Desempenho de Cabos do Tipo Optical Ground Wire (OPGW) Quando Submetidos aos Ensaios de Descargas Atmosféricas e Curto-Circuito**. 2013. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica, Ênfase em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2013.

RIBEIRO, Flávio Martins; DA CUNHA, Marcus Antonius Queiroz. **Estratégias de O&M utilizadas na gestão de desempenho dos parques eólicos, em Tempo Real, Pós Operação e Engenharia de Manutenção no curto e médio prazo, mostrando os resultados obtidos com a utilização de BigData, Business Intelligence e Machine Learning (ML)**. XXV SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, [s. l.], 10 nov. 2019.

SANTOS, Marllen; GONZÁLEZ, Mario. **Factors that influence the performance of wind farms**. Renewable Energy, [s. l.], 10 dez. 2018.

SILVA, Túlio; COLARES, Igor Souza; SIMÕES, Clovis. **Software para a geração automática de sistema de monitoração de parques eólicos**. Brazil Windpower, [s. l.], 30 maio 2019.

CARLETO, Nivaldo. **Subestações Elétricas**. Brasília: NT, 2017. 189 p. ISBN 9788584161782

CONSELHO REGIONAL DOS TÉCNICOS INDUSTRIAIS DO RIO DE JANEIRO. **Como funciona a linha de transmissão?**. 15 abr. 2021. Disponível em: <https://www.crrj.gov.br/como-funciona-a-linha-de-transmissao/>. Acesso em: 15 out. 2022.

FILHO, Antonio Carlos de Lima. **Considerações sobre o Avanço da Energia Eólica**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 10, Vol. 13, pp. 111-127. Outubro de 2019. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/avanco-da-energia>

CANDIOTTO, Daniel Ferreira. **Inferência do desempenho da manutenção de aerogeradores utilizando dados de operação**. 2016. 65p. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2016.

GONZÁLEZ, Mario.; MARRISON, Gabriel.; SANTOS, M. A. T., CASSIMIRO, David.; MONTEIRO, Rafael.; MEDEIROS, M. L.; CAVALCANTI, Everton. **Operação e manutenção de parques eólicos do Brasil: Desafios e Oportunidades**. 2020. 11p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

VARELLA FILHO, Haroldo Coutinho. **Medição de desempenho na cadeia de suprimentos da energia eólica: proposta de um conjunto de indicadores de desempenho**. Natal, RN, 2013. 13 f.; il.

GONÇALVES, Anderson Tiago Peixoto. **Modelo para seleção de fornecedores em relacionamentos colaborativos na cadeia de suprimentos do setor de energia eólica** / Anderson Tiago Peixoto Gonçalves. - 2019. 204f.: il.

FARIAS, Andre Felipe **O ciclo de vida de parques eólicos onshore no Brasil : da prospecção à desativação** / Andre Felipe Farias ; orientador, Antonio Felipe da Cunha de Aquino, 2020. 129 p.

DA SILVA, Ana Beatriz Felix. **Manutenção de turbinas eólicas: Levantamento e análise da incidência de falhas nos seus subsistemas** / Ana Beatriz Felix da Silva ; orientador, Dennys Lopes Alves, 2017. 120 p.

RIBEIRO, Lianderson et al. **Integração com SCADA para gestão de indicadores de manutenção em parques eólicos**. Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, [s. l.], 6 dez. 2021.

BANCO DO NORDESTE. **Energia Eólica no Nordeste**. Caderno Setorial ETENE, dezembro 2020.

KUNZMANN, Thomas. **MELHORES PRÁTICAS - MODELOS DO O&M - EÓLICA**. Fórum Gestão Operacional de Parques Eólicos, [S. l.], 21 out. 2019. São Paulo SP.

MATTEDE, Henrique. **O que é boroscópio industrial e para que serve?** 2021. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-boroscopio-industrial-e-para-que-serve/>. Acesso em: 08 set. 2021.

EQUIPE LORENCINI. **Saiba como funciona uma análise de óleos lubrificantes e os instrumentos usados no procedimento**. 2019. Disponível em: <https://www.lorencini.com.br/blog/saiba-como-funciona-uma-analise-de-oleos-lubrificantes-e-os-instrumentos-usados-no-procedimento/#>. Acesso em: 08 set. 2021.

SALES, Raquel. **Como a Termografia industrial auxilia na redução de custos na manutenção**. 2020. Disponível em: <https://blog.acoplastbrasil.com.br/termografia-industrial/>. Acesso em: 08 set. 2021.

Guia do Setor Eólico do Rio Grande do Norte. / Clóvis Bosco Mendonça Oliveira...[et al] – Natal : IFRN, 2015. 205P. SBN 978-85-8333-121-6.

Cadeia de valor da energia eólica no Brasil / Felipe Bittencourt... [et al.]. – Brasília; Sebrae, 2017. 202 p. il., color.

BARROS, Danilo Mikael Costa. **Windbox: eficiência em gestão operacional de parques eólicos** / Danilo Mikael Costa Barros. – 2019 61f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Escola de Ciência e Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação, Natal, 2019.

DAVIS, Louise. **New inspection videoscope**. [S. l.], 28 jun. 2018. Disponível em: <https://www.engineerlive.com/content/new-inspection-videoscope>. Acesso em: 10 nov. 2022.

INSP. **TERMOGRAFIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS: ENTENDA A IMPORTÂNCIA!**. [S. l.], 6 dez. 2021. Disponível em: <https://www.insp-therm.com.br/blog/termografia-em-sistemas-eletricos-importancia/>. Acesso em: 6 nov. 2022.

MANGUEIRA, Rivanilso dos Santos; ALENCAR, João Gabriel Ramos Arraes de; FERNANDES, João Victor Santos; PALACIO, Gilderlanio Barbosa. **Revisão de aplicações de machine learning no aprimoramento de métodos de monitoramento de turbinas eólicas com foco em caixas de engrenagens**. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, [s. l.], Junho 2020.

FIELD CONTROL. **Gestão da manutenção: o que é e porque fazê-la**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://fieldcontrol.com.br/blog/gestao-da-manutencao/>. Acesso em: 1 nov. 2022.

BICHELS, Arlei. **Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e soluções**. Curitiba: EDUTFPR, 2018. 466 p.