



UFC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

NATHANAEL VASCONCELOS FERNANDES

**IMPACTO DO CARREGAMENTO DAS PÁS NO DESEMPENHO DE
AEROGERAADORES EM PARQUE EÓLICO DO RIO GRANDE DO NORTE**

FORTALEZA

2025

NATHANAEL VASCONCELOS FERNANDES

IMPACTO DO CARREGAMENTO DAS PÁS NO DESEMPENHO DE
AEROGERAADORES EM PARQUE EÓLICO DO RIO GRANDE DO NORTE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Ceará, com requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

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

FORTALEZA

2025

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)

-
- F1i FERNANDES, NATHANAEL VASCONCELOS.
IMPACTO DO CARREGAMENTO DAS PÁS NO DESEMPENHO DE AEROGERADORES EM
PARQUE EÓLICO DO RIO GRANDE DO NORTE / NATHANAEL VASCONCELOS FERNANDES. –
2025.
84 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho..
1. energia eólica. 2. aerogeradores. 3. carregamento das pás. 4. detecção de anomalias. 5. manutenção
preditiva. I. Título.

CDD 621.3

NATHANAEL VASCONCELOS FERNANDES

IMPACTO DO CARREGAMENTO DAS PÁS NO DESEMPENHO DE
AEROGERADORES EM PARQUE EÓLICO DO RIO GRANDE DO NORTE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Ceará, com requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 06/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

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

Eng. Breno Torres Carvalho

Prof. Dr. João Bosco Verçosa Leal Junior
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

A Deus.

Aos meus pais, Fernando e Rosângela.

Ao meu irmão, Eduardo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer à minha **família**, que sempre esteve ao meu lado, acreditando no meu potencial e investindo na minha educação desde o início. Obrigado por cada conselho, por cada sacrifício e por cada gesto de amor que me permitiu chegar até aqui.

Aos meus **amigos**, que fizeram toda a diferença nessa caminhada. Aos amigos de infância e do colégio (Dáulia Bringel), que cresceram comigo e ainda hoje fazem parte de quem sou. Aos amigos da **faculdade**, que compartilharam comigo cada desafio acadêmico, cada noite de estudos e cada momento de descontração. É um agradecimento especial aos amigos que fiz durante o **intercâmbio**, que estiveram ao meu lado em momentos difíceis e desafiadores, tornando essa experiência inesquecível e o melhor período da minha vida.

Meu sincero agradecimento também ao **Engenheiro Breno Torres Carvalho** e a Casa dos Ventos, que teve um papel fundamental tanto no desenvolvimento deste TCC quanto no meu estágio. Sua orientação, paciência e disposição para ensinar foram essenciais para o meu aprendizado e crescimento profissional. E também aos demais membros da banca avaliadora (Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho e Prof. Dr. João Bosco Verçosa Leal Junior) que me deu o suporte necessário.

Agradeço à **Universidade Federal do Ceará (UFC)** por ter sido o espaço onde pude expandir meus conhecimentos, me desenvolver como profissional e construir memórias inesquecíveis. Ao **Programa de Educação Tutorial (PET)**, que foi uma segunda casa para mim na UFC e pude crescer e aprender bastante levando amigos até hoje no meu coração. Também à **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)** pela oportunidade de bolsa concedida no intercâmbio. A oportunidade de estudar fora contribuiu significativamente com minha formação profissional e pessoal.

Não poderia deixar de mencionar alguns grupos que foram mais do que amigos, se tornando verdadeiras famílias para mim: **BPP, Padrinhos Vizinhos, Remember, Exódia** e, em especial, **Loloc** (Lenys, Ricardo e Rebeca). Sem vocês, eu não estaria aqui. Vocês estiveram comigo nos melhores e piores momentos, oferecendo apoio incondicional, compartilhando conquistas e desafios, e tornando essa jornada muito mais leve e especial. Agradeço por cada momento, por cada palavra de incentivo e por serem parte fundamental de quem eu sou e de quem ainda me tornarei.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o impacto do carregamento das pás na performance dos aerogeradores, quantificar as perdas energéticas e financeiras associadas a essas limitações e propor estratégias para mitigação dos problemas identificados. O estudo foi realizado com base em dados operacionais de um parque eólico da empresa Casa dos Ventos, localizado no Rio Grande do Norte, abrangendo o período de janeiro de 2023 a dezembro de 2024. A metodologia empregada incluiu a coleta e análise de dados armazenados na plataforma *Google Cloud Platform* (GCP), utilizando consultas SQL e scripts em *Python* para extração de informações do sistema *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) e do modelo interno de detecção de anomalias baseado em *machine learning*. A análise de dados foi estruturada em três etapas principais: (i) identificação de aerogeradores que operaram em performance parcial (OG-PPI), (ii) detecção de anomalias nas variáveis de carregamento das pás e (iii) correlação entre essas anomalias e as perdas de geração. Foram utilizadas técnicas estatísticas, como análise descritiva, regressão linear e *machine learning*, para quantificar o impacto das limitações operacionais. Os resultados evidenciaram que três das oito máquinas analisadas apresentaram limitações significativas devido a problemas de carregamento das pás, resultando em uma perda total de aproximadamente 1.636,38 MWh, equivalente a um prejuízo financeiro estimado em R\$490.913,00. Com base nos achados, foram propostas soluções voltadas ao aprimoramento do monitoramento, implementação de dashboards interativos e adoção de práticas de manutenção preditiva, visando a otimização do desempenho dos aerogeradores. A pesquisa destaca a importância de um monitoramento contínuo e do uso de técnicas avançadas de detecção de anomalias para minimizar perdas e aumentar a eficiência operacional dos parques eólicos. Dessa forma, o estudo contribui para o aprimoramento das estratégias de operação e manutenção, podendo servir como referência para outras empresas do setor de energia renovável.

Palavras-chave: energia eólica; aerogeradores; carregamento das pás; detecção de anomalias; manutenção preditiva.

ABSTRACT

The increasing demand for renewable energy has driven the expansion of wind power generation worldwide. However, the efficiency of wind turbines depends on multiple operational factors, including blade loading. This study analyzes the impact of blade loading anomalies on the performance of wind turbines in a wind farm located in Rio Grande do Norte, Brazil. The objective is to quantify energy losses resulting from blade load limitations and propose solutions to mitigate these effects. The research adopts a case study approach, using historical data from 2023 and 2024, collected through the Google Cloud Platform (GCP). The dataset includes operational variables such as generated power, wind speed, and blade load indicators. Data analysis was performed using statistical techniques and machine learning models, particularly Autoencoders, to detect anomalies in blade load values. The study identified eight wind turbines with significant limitations, three of which were directly related to blade load anomalies. These issues resulted in an estimated energy loss of 1,636.38 MWh, leading to financial losses of approximately R\$490,913. The results emphasize the importance of continuous monitoring and advanced predictive maintenance strategies to optimize turbine performance and reduce operational losses. Proposed improvements include the enhancement of anomaly detection models, the development of interactive dashboards for real-time monitoring, and the adoption of predictive maintenance practices. These measures aim to increase wind turbine availability and efficiency, ensuring greater energy generation and economic viability for wind farms.

Keywords: wind energy; blade loading; anomaly detection; machine learning; predictive maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Distribuição vetorial de forças em pá de Turbina Eólica.....	22
Figura 2	Vista de pá eólica e pinos conectores em sua base.....	22
Figura 3	Vista de hub com espaço para conexão da pá.....	23
Figura 4	Vista interna de componentes da nacele e componentes sequenciais do Hub ao Gerador.....	24
Figura 5	Vista interna da caixa multiplicadora (<i>Gearbox</i>).....	25
Figura 6	Vista externa Nacelle.....	26
Figura 7	Parcela da torre em transporte.....	27
Figura 8	Exemplo de sistema Yaw com motores e rolamento.....	28
Figura 9	Legenda de status das turbinas	51
Figura 10	Análise de carregamento das pás para turbina SMA12-009.....	53
Figura 11	Análise da curva de potência para turbina SMA12-009.....	53
Figura 12	Análise de carregamento das pás para turbina SMA09-010.....	54
Figura 13	Análise da curva de potência para turbina SMA09-010.....	54
Figura 14	Análise de carregamento das pás para turbina SMA09-010.....	55
Figura 15	Análise da curva de potência para turbina SMA09-010.....	55
Figura 16	Análise de carregamento das pás para turbina SMA12-007.....	56
Figura 17	Análise da curva de potência para turbina SMA12-007.....	56
Figura 18	Análise de carregamento das pás para turbina SMA01-001.....	57
Figura 19	Análise da curva de potência para turbina SMA01-001.....	57
Figura 20	Análise de carregamento das pás para turbina SMA11-001.....	58
Figura 21	Análise da curva de potência para turbina SMA11-001.....	58
Figura 22	Análise de carregamento das pás para turbina SMA11-005.....	58
Figura 23	Análise da curva de potência para turbina SMA11-005.....	59

Figura 24	Análise de carregamento das pás para turbina SMA11-010.....	59
Figura 25	Análise da curva de potência para turbina SMA11-010.....	60
Figura 26	Ferramenta de análise de performance parcial SMA11-005.....	74
Figura 27	Ferramenta de análise de performance parcial SMA11-001.....	74
Figura 28	Ferramenta de análise de performance parcial SMA12-009.....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Comportamento das Variáveis de Carregamento das pás (SMA12-009)....	62
Gráfico 2	Comportamento das Variáveis de Carregamento das pás (SMA11-001).....	63
Gráfico 3	Comportamento das Variáveis de Carregamento das pás (SMA11-005)...	64
Gráfico 4	Perdas de Energia e Valor Financeiro por Turbina.....	71
Gráfico 5	Tempo de Resolução do Problema por Turbina.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Síntese dos principais artigos pesquisados no Estado da Arte.....	39
Tabela 2	Variáveis mais relevantes identificadas na análise preliminar.....	61
Tabela 3	Valores de Perda Energética, Monetária e dias com limitação.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

ACR – Ambiente de Contratação Regulada

BEM – Blade Element Momentum

BTC – Bend-Twist Coupling

CPR – Cyclic Pitch Regulation (Regulação Cíclica de Pitch)

DA – Detecção de Anomalias

GCP – Google Cloud Platform

GWEC – Global Wind Energy Council

HSS – High-Speed Shaft (Eixo de Alta Velocidade)

IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

O&M – Operação e Manutenção

PPI – Performance Parcial Identificada

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (Supervisão, Controle e Aquisição de Dados)

SQL – Structured Query Language

WTG – Wind Turbine Generator (Aerogerador)

Yaw – Sistema de orientação da nacelle

LISTA DE SÍMBOLOS

R\$	Reais
%	Porcentagem
E	Energia gerada (kWh ou MWh)
V	Velocidade do vento (m/s)
t	Tempo (s, min, h)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação.....	14
1.2	Objetivos.....	15
1.3	Estrutura do trabalho.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Panorama energético	18
2.1.1	Visão global	18
2.1.2	Crescimento da energia eólica no Brasil.....	19
2.2	Geração eolielétrica.....	20
2.2.1	Funcionamento.....	20
2.2.2	Vantagens.....	20
2.2.3	Componentes.....	21
2.2.4	Sensores e monitoramento.....	28
2.3	Impactos de performance em aerogeradores.....	30
2.4	Impactos na performance devido cargas das pás.....	31
3	ESTADO DA ARTE CARREGAMENTO DE PÁS EM AEROGERADORES.	33
3.1	Histórico do Estudo sobre Carregamento de pás em Aerogeradores.....	33
3.1.1	Primeiros Estudos e Métodos Tradicionais.....	33
3.1.2	Desenvolvimento de Estratégias de Mitigação Passiva.....	34
3.1.3	Avanços em Controle Ativo de Cargas.....	34
3.1.4	Monitoramento Preditivo e Diagnóstico de Falhas.....	34
3.1.5	Impactos da Turbulência Atmosférica no Carregamento das Pás.....	35
3.1.6	Tendências Futuras e Lacunas na Pesquisa.....	35
3.2	Panorama do tema no Brasil.....	36
3.3	Panorama Internacional do tema.....	36
3.4	Conclusão da literatura sobre o tema.....	38
4	METODOLOGIA	40
4.1	Classificação do estudo.....	40
4.2	Descrição do Cenário de Análise.....	40
4.3	Coleta de Dados.....	41
4.3.1	Fontes de dados.....	42

4.3.2	Pré-processamento.....	43
4.4	Análise de Dados.....	43
4.4.1	Identificação de Máquinas com Performance Parcial.....	44
4.4.2	Detecção de Anomalias nos Sensores de Carregamento das Pás.....	44
4.4.3	Correlação entre Carregamento das Pás e Perdas de Geração.....	45
4.5	Ferramentas Computacionais.....	45
4.5.1	Google Cloud Platform (GCP) – Armazenamento e Processamento de Dados	46
4.5.2	Python – Processamento e Análise de Dados.....	46
4.5.3	Tableau Online – Visualização dos Resultados.....	47
4.5.4	Django – Desenvolvimento de Plataforma Web para Centralização das Análises.....	47
4.6	Validação dos Resultados.....	48
4.6.1	Comparação com Curvas Teóricas de Potência.....	48
4.6.2	Análise de Histórico de Manutenções.....	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
5.1	Introdução aos resultados.....	50
5.2	Seleção das Máquinas de Estudo.....	50
5.2.1	Identificação de Máquinas com Desempenho Parcial.....	51
5.2.2	Análise de Anomalias nas Variáveis de Carregamento das Pás.....	52
5.2.3	Filtragem dos Casos Mais Relevantes.....	52
5.3	Análise das Variáveis de Carregamento das pás.....	61
5.3.1	Comportamento das Variáveis.....	62
5.3.2	Relação do carregamento das pás e limitações.....	64
5.3.3	Intervenções reportadas pela equipe de campo das máquinas analisadas.....	65
5.3.4	Outras Limitações de Geração Identificadas.....	66
5.3.5	Análise das Informações do Parque e Estratégias de Mitigação.....	67
5.4	Quantificação das Perdas Energéticas e Financeiras.....	68
5.4.1	Cálculo das Perdas.....	68
5.4.2	Resultados.....	69
5.4.3	Visualização dos Dados.....	70
5.4.4	Análises feitas.....	72
5.5	Propostas de Melhorias e Soluções.....	72
5.5.1	Técnicas de Detecção de anomalias.....	73

5.5.2	Monitoramento Contínuo e Criação de Dashboards.....	75
5.5.3	Adoção de Práticas de Manutenção Preditiva.....	75
5.6	Estratégias adotadas.....	76
6	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por fontes de energia renováveis tem impulsionado a expansão da energia eólica como uma alternativa sustentável e eficiente. A busca por soluções energéticas de baixo impacto ambiental e economicamente viáveis tem levado à implementação de parques eólicos em diversas regiões do mundo e o Brasil tem se destacado nesse cenário, especialmente no Nordeste, onde as condições climáticas favorecem a geração eolielétrica. No entanto, apesar do avanço tecnológico e da crescente participação da energia eólica na matriz energética, desafios operacionais ainda persistem, afetando a eficiência e a disponibilidade dos aerogeradores.

Dentre os fatores que impactam a performance dos aerogeradores, o carregamento das pás se destaca como uma variável crítica. As pás das turbinas eólicas estão sujeitas a diversas forças aerodinâmicas, gravitacionais e mecânicas que podem comprometer seu desempenho, levando a limitações operacionais e, conseqüentemente, à redução da geração de eletricidade. O monitoramento dessas cargas é fundamental para evitar desgastes prematuros e otimizar a operação das turbinas, permitindo um controle mais preciso sobre as variações de esforço nas pás e reduzindo perdas energéticas.

Na Casa dos Ventos, uma das principais desenvolvedoras de energia renovável do Brasil, há um grande volume de dados operacionais coletados continuamente através de sensores distribuídos nos aerogeradores. Esses dados são armazenados na plataforma GCP e analisados por meio de consultas SQL e scripts em *Python*, possibilitando a detecção de padrões anômalos e a correlação entre diferentes variáveis operacionais. O uso de *machine learning*, especialmente *Autoencoders*, tem sido empregado para identificar anomalias nos sensores de carregamento das pás, permitindo a antecipação de falhas e a implementação de estratégias de manutenção preditiva.

1.1 Motivação

A escolha deste tema surgiu na experiência profissional do autor na área de energia eólica, tendo a oportunidade de vivenciar na prática os desafios e avanços tecnológicos do setor. Trabalhar diretamente com aerogeradores e acompanhar de perto as questões relacionadas à sua performance e manutenção despertou o interesse em aprofundar o conhecimento sobre os impactos de performance, surgindo a curiosidade e interesse no de carregamento das pás relacionado a eficiência da geração de eletricidade. O TCC representa

não apenas uma oportunidade acadêmica, mas também um meio de consolidar o aprendizado adquirido no ambiente de trabalho, utilizando informações reais e um estudo de caso aplicado à empresa na qual estou integrado. Dessa forma, ao unir teoria e prática, este estudo se torna uma ferramenta valiosa para compreender melhor os desafios operacionais dos parques eólicos e contribuir para o desenvolvimento de soluções que otimizem o desempenho das turbinas e a confiabilidade do sistema como um todo.

1.2 Objetivos

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal analisar o impacto do carregamento das pás na performance dos aerogeradores, investigando como anomalias nesses sensores podem levar à limitação da geração e perdas financeiras. O estudo busca quantificar essas perdas energéticas e financeiras a partir da análise de dados operacionais coletados entre 2023 e 2024 em um parque eólico da Casa dos Ventos, localizado no Rio Grande do Norte. Além disso, pretende-se propor soluções para mitigar os impactos dessas limitações, com base na otimização do monitoramento, no refinamento dos modelos de detecção de anomalias e na melhoria das estratégias de manutenção.

Para alcançar esse objetivo, o trabalho adota uma abordagem quantitativa, baseada na análise estatística e computacional de um conjunto de dados reais extraídos dos aerogeradores. As principais etapas do estudo incluem:

1. Identificação de máquinas com performance parcial ao longo dos anos de 2023 e 2024, verificando padrões de limitação devido ao carregamento das pás.
2. Detecção de anomalias nos sensores de carregamento das pás, utilizando técnicas de *machine learning* para identificar desvios nos padrões operacionais esperados.
3. Correlação entre carregamento das pás e perdas energéticas, analisando o impacto direto das anomalias na geração de eletricidade e nos custos operacionais.
4. Proposição de melhorias para otimização da operação dos aerogeradores, incluindo aprimoramento dos modelos de detecção de anomalias, integração com sistemas SCADA e implementação de *dashboards* interativos para facilitar o monitoramento em tempo real.

Com isso, o estudo pretende contribuir para a melhoria da eficiência operacional dos aerogeradores, reduzindo as perdas energéticas e financeiras associadas a falhas nos sensores de carregamento das pás. Além disso, espera-se que os insights obtidos possam ser aplicados

a outros parques eólicos, fortalecendo o desenvolvimento de estratégias mais robustas de operação e manutenção no setor de energia renovável.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, organizados de maneira a fornecer uma abordagem sistemática e clara sobre o impacto do carregamento das pás na performance dos aerogeradores. A estrutura do estudo segue uma progressão lógica, iniciando com a contextualização do problema, passando pela fundamentação teórica e metodológica, até a apresentação dos resultados e propostas de melhoria.

O Capítulo 1 – Introdução apresenta o contexto e a relevância do estudo, destacando a importância da energia eólica no cenário global e nacional, bem como os desafios relacionados à eficiência operacional dos aerogeradores. Além disso, são explicitados o problema de pesquisa, os objetivos do estudo e a justificativa para a realização do trabalho, evidenciando sua contribuição para a otimização da operação e manutenção de parques eólicos.

No Capítulo 2 – Referencial Teórico, são abordados os conceitos fundamentais necessários para a compreensão do estudo. Inicialmente, é apresentado um panorama energético, contextualizando a matriz energética global e nacional, com ênfase na evolução da energia eólica. Em seguida, são discutidos os princípios da geração eolielétrica, seus principais componentes e o papel dos sensores e sistemas de monitoramento na otimização do desempenho dos aerogeradores. Por fim, são analisados os impactos das cargas aerodinâmicas sobre as pás e como essas forças podem influenciar a eficiência e a durabilidade dos aerogeradores.

O Capítulo 3 – Estado da Arte apresenta uma revisão da literatura sobre o carregamento das pás em aerogeradores, discutindo os avanços na área e as principais abordagens de mitigação de cargas estruturais. São explorados os primeiros estudos sobre o tema, os métodos tradicionais utilizados para modelagem aerodinâmica, as estratégias passivas e ativas de controle de cargas, além do monitoramento preditivo e diagnóstico de falhas. Também são abordados os impactos da turbulência atmosférica na operação das turbinas e os desafios específicos enfrentados no Brasil e no cenário internacional. Esse capítulo permite situar o estudo dentro do contexto das pesquisas mais recentes e identificar as lacunas ainda existentes na literatura.

O Capítulo 4 – Metodologia detalha os procedimentos adotados para a realização do estudo de caso no parque eólico da Casa dos Ventos, localizado no estado do Rio Grande do Norte. São descritas as características do parque, o período de análise e os critérios para a seleção das turbinas estudadas. A coleta de dados é explicada de forma detalhada, incluindo as fontes utilizadas, como o banco de dados SCADA, o sistema de detecção de anomalias baseado em *machine learning* e os registros de manutenção. Além disso, são apresentadas as técnicas de pré-processamento dos dados, as ferramentas computacionais empregadas e as abordagens estatísticas utilizadas para a análise das anomalias e suas correlações com a performance dos aerogeradores.

No Capítulo 5 – Resultados e Discussão, são apresentados os achados do estudo, com foco na identificação das turbinas com performance parcial e na análise das anomalias detectadas nos sensores de carregamento das pás. São quantificadas as perdas energéticas e financeiras associadas a essas limitações, comparando os resultados obtidos com as curvas teóricas de potência dos aerogeradores. Também são discutidas as intervenções realizadas pela equipe de operação e manutenção para corrigir os problemas identificados e minimizar as perdas. Por fim, são propostas melhorias para aprimorar o monitoramento e a manutenção das turbinas, incluindo a implementação de técnicas avançadas de detecção de anomalias, o desenvolvimento de *dashboards* interativos e a adoção de estratégias de manutenção preditiva.

O Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações sintetiza os principais resultados do estudo, destacando a importância do monitoramento contínuo das variáveis de carregamento das pás para otimizar a eficiência operacional dos aerogeradores. São discutidas as implicações dos achados para a indústria eólica e sugeridas direções para pesquisas futuras, incluindo a possibilidade de integração de novas tecnologias para aprimorar a detecção precoce de falhas e minimizar perdas energéticas. Além disso, são feitas recomendações para a implementação das melhorias propostas ao longo do estudo, visando aumentar a confiabilidade dos sistemas e reduzir custos operacionais nos parques eólicos.

Essa estrutura permite que o estudo seja desenvolvido de forma lógica e progressiva, garantindo a coerência entre os capítulos e facilitando a compreensão dos desafios, metodologias e resultados obtidos. Dessa forma, o trabalho contribui para o aprimoramento das estratégias de operação e manutenção de aerogeradores, promovendo maior eficiência e sustentabilidade no setor de energia eólica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No referencial teórico são abordados aspectos fundamentais sobre a matriz energética, com foco na energia eólica e seus impactos na performance dos aerogeradores. Inicialmente, será apresentado um panorama energético (Seção 2.1), contextualizando a matriz energética global e nacional, destacando a visão global (Seção 2.1.1) e o crescimento da energia eólica no Brasil (Seção 2.1.2), considerando sua participação no setor elétrico e seu crescimento nos últimos anos. Em seguida, será explorada a geração eolielétrica (Seção 2.2), detalhando seu funcionamento, principais vantagens e componentes essenciais para a operação dos aerogeradores. Dentro desse contexto, a Seção 2.2.4 discutirá os sensores e sistemas de monitoramento, que desempenham um papel fundamental na otimização da eficiência dos aerogeradores. Por fim, serão analisados os impactos na performance dos aerogeradores (Seção 2.3), com ênfase nos efeitos das cargas aerodinâmicas sobre as pás e sua influência no desempenho global do sistema. Dessa forma, esta fundamentação teórica fornecerá o embasamento necessário para compreender os desafios e oportunidades no setor eólico.

2.1 Panorama energético

O panorama energético abrange a matriz energética global e nacional, destacando as principais fontes de energia utilizadas e suas participações no setor elétrico. Com a crescente demanda por fontes renováveis, observa-se uma transição gradual para tecnologias mais sustentáveis, como a energia eólica e solar. No Brasil, essa mudança é impulsionada pela abundância de recursos naturais e por políticas de incentivo, consolidando a energia eólica como uma das principais alternativas para diversificação e segurança energética.

2.1.1 Visão global

No mundo atual o aumento das preocupações globais com redução do consumo de combustíveis fósseis, geração de uma energia mais limpa e sustentável, impactos climáticos, dentre outros assuntos, mostrou uma necessidade de uma diversificação das fontes energéticas, impulsionando os estudos, desenvolvimentos e utilização de fontes de energia renováveis globalmente. A transição energética já deixou de ser um sonho para ser uma necessidade vigente da maioria dos países no mundo. Um exemplo dessa importância global foi evidenciado em 2022, o aumento da capacidade global de energia renovável atingiu 3.372

GW, crescendo 9,6% (295 GW), sendo evidenciado como o maior crescimento já registrado até então. Isso mesmo com as incertezas globais e da crise energética, mostrando a resiliência das energias renováveis, representando 83% de toda a capacidade adicionada no período. As tecnologias mais presentes nesse aumento foram a solar e eólica, que juntas contribuíram com 90% das novas capacidades, mostrando de fato sua relevância no contexto da transição energética global (IRENA, 2023). Entretanto, ainda se fala que mesmo com tal aumento, ainda estamos apenas no começo desse desafio, pois para atender às metas climáticas e limitar o aquecimento global a 1,5°C, será necessário triplicar esse ritmo de crescimento até 2030, o que mostra a necessidade do empenho contínuo nesse tema e evidenciando a urgência de transição para fontes limpas e sustentáveis, como solar, eólica e hídrica, que podem reduzir as emissões de gases do efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis poluentes.

Como citado, a energia eólica sempre se destacou como uma das fontes promissoras devido a sua grande capacidade de geração em larga escala. Em 2023, o setor alcançou um recorde histórico, de 117 GW de capacidade nova instalada, o que, comparado com o ano anterior, representa um aumento de 50%. Refletindo no crescente compromisso global político e econômico com o crescimento e avanço das energias renováveis, buscando sempre alcançar e superar metas ambiciosas, como o objetivo de triplicar a capacidade global de energia renovável até 2030, o que foi estabelecido durante a COP28. A previsão de crescimento para o setor eólico entre 2024 e 2030 foi revisada para 1.210 GW, um aumento de 10%, destacando a aceleração em mercados emergentes e o avanço da energia eólica offshore (GWEC, 2024).

2.1.2 Crescimento da energia eólica no Brasil

No Brasil essa evolução também é evidenciada, visto que a energia eólica é uma engrenagem de grande importância em sua matriz energética. Um exemplo desse crescimento foi em novembro de 2024, o Brasil atingiu recordes históricos, com 23.699 MW de geração horária e 18.976 MW de geração diária, impulsionados por condições climáticas favoráveis e pela expansão da infraestrutura no Nordeste. Com capacidade instalada total de aproximadamente 33 GW, a energia eólica representa 13,5% da matriz elétrica nacional, segundo dados da ANEEL. Além de contribuir para a segurança energética e preservar os reservatórios hidrelétricos, que têm sofrido dificuldades devido a períodos de secas intensos, essa fonte renovável destaca o papel do Brasil na transição energética global, promovendo sustentabilidade, atração de investimentos, nacionais e internacionais, e geração de empregos.

Somando os bons fatores de ventos consistentes, alta capacidade técnica e incentivos políticos têm possibilitado o Brasil a alcançar um grande destaque nesse setor.

2.2 Geração eólicoelétrica

A geração eólicoelétrica baseia-se na conversão da energia cinética dos ventos em eletricidade por meio de aerogeradores. Esse processo ocorre quando as pás reagem a força do vento, acionando um rotor acoplado a um gerador, que transforma a energia mecânica em elétrica. Dentre suas principais vantagens, destacam-se a sustentabilidade, a baixa emissão de poluentes e a crescente competitividade no mercado energético. Além disso, a eficiência dos aerogeradores depende de diversos fatores, incluindo a qualidade dos componentes e a implementação de sensores e sistemas de monitoramento para otimização do desempenho e manutenção preditiva.

2.2.1 Funcionamento

Para o estudo em questão estão sendo considerados aerogeradores de eixo horizontal e dessa forma, os comentários são referentes a esse tipo de tecnologia. A geração eólicoelétrica é a conversão da energia cinética proveniente dos ventos em energia mecânica passando pelas pás dos aerogeradores que faz rodar um eixo horizontal que é conectado em um gerador que transforma a energia mecânica em energia elétrica que é então ajustada para os padrões da rede elétrica por meio de sistemas de controle e transformadores antes de ser transmitida. de forma limpa e renovável utilizando apenas um recurso natural. Dentro desse funcionamento existem diversos sistemas envolvidos em otimizar essa conversão de energia para aproveitar ao máximo o vento e gerar o máximo de energia com o mínimo de perdas.

O sistema de controle dos aerogeradores desempenha um papel crucial ao ajustar o ângulo das pás (*pitch*) e a direção do rotor (*yaw*) para otimizar a captação de energia, garantindo a operação segura em diferentes condições climáticas. Posteriormente será melhor desenvolvido os componentes e suas funções.

2.2.2 Vantagens e desvantagens

A energia eólica é uma das principais fontes renováveis na transição energética global, muito disso é devido às suas diversas vantagens. Dentre elas, é possível citar o fato de ser

uma fonte limpa em emissões de gases do efeito estufa, com uma abundância de recurso renovável, especialmente no Nordeste. Além disso, é uma fonte de energia que contribui para a independência energética para o caso da redução do uso de combustíveis fósseis, consolidando-se como um pilar para atender as demandas de forma sustentável e econômica.

Um outro ponto mais social da vantagem de usinas eólicas é a própria geração de emprego, que geralmente é construída em zonas mais afastadas de centros urbanos e populosos, criando oportunidades para moradores de regiões mais humildes tanto na etapa de construção quanto na manutenção do complexo.

No entanto, a energia eólica também apresenta algumas desvantagens que devem ser consideradas. A intermitência dos ventos pode comprometer a estabilidade do fornecimento de energia, exigindo complementação por outras fontes ou investimentos em armazenamento. Além disso, a instalação de parques eólicos pode gerar impactos ambientais e sociais, como a modificação da paisagem natural, ruídos que afetam a fauna e populações próximas, e a necessidade de grandes áreas para sua implementação. Outro desafio está na logística de transporte e instalação dos aerogeradores, que demandam infraestrutura robusta, especialmente em regiões de difícil acesso, elevando os custos iniciais do projeto.

2.2.3 Componentes

Os aerogeradores são complexos e compostos por diversos componentes independentes e com funções críticas para de fato fazer a conversão da energia cinética em elétrica. Alguns modelos de aerogeradores podem ter componentes a mais ou a menos que outros e estruturas e tecnologias específicas, mas o objetivo aqui é dar uma visão global dos componentes essenciais de um aerogerador e seus funcionamentos.

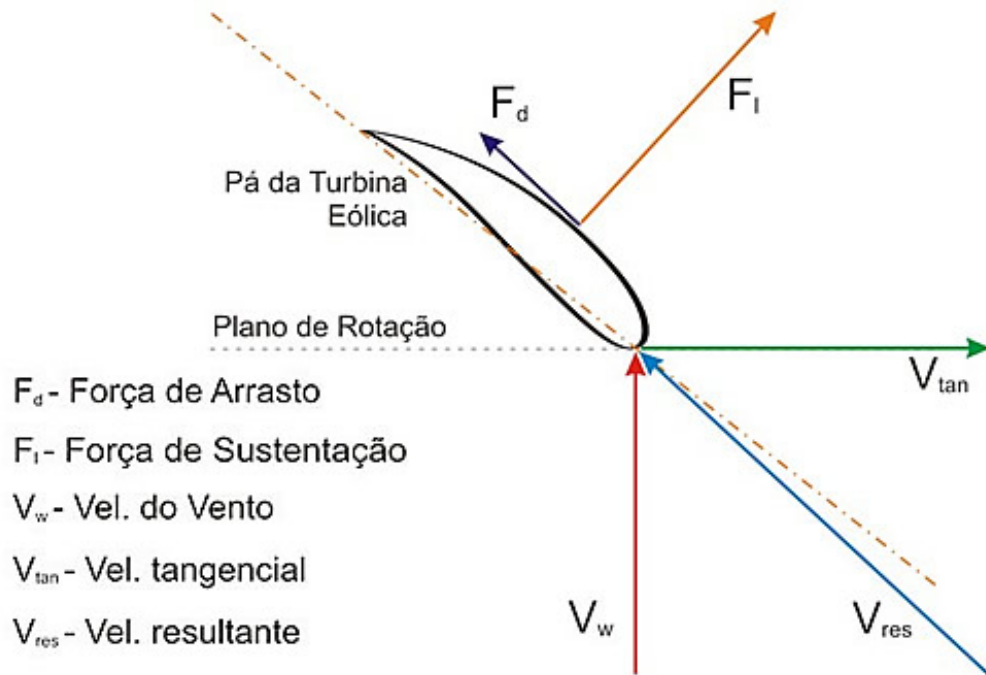
1- Rotor (Pás + *Hub*):

O rotor é uma das partes principais de um aerogerador, formado principalmente pelas pás e pelo hub, que é o componente que conecta as pás e as controla quando necessário.

As pás são os componentes físicos responsáveis por converter a energia cinética do vento e convertê-la em torque mecânico para fazer a movimentação do *Hub*. São geralmente confeccionadas de materiais leves e resistentes como fibra de vidro e possuem seu design aerodinâmico para maximizar a eficiência reduzindo esforços, uma vez que é um componente que sempre está sujeito a grandes cargas de vento, é preciso otimizar isso para reduzir desgastes. Geralmente os aerogeradores são compostos por três pás. Na figura 1 são

mostradas as forças aerodinâmicas vistas no corte de uma pá de aerogerador; na figura 2 são mostrados os pinos da pá que se encaixam no hub para fazer a conexão física.

Figura 1 – Distribuição vetorial de forças em pá de Turbina Eólica.



Fonte: CRESESB/CEPEL, (2012).

Figura 2 – Vista de pá eólica e pinos conectores em sua base.



Fonte: PIX Engenharia, (2023).

O Hub é onde são conectadas as pás e o eixo principal, ele pode ser fixo ou ter um sistema de ajuste de *pitch*, que faz com que otimize mais a captação de energia ou reduzindo cargas adversas para as pás, evitando desgastes ou possíveis limitações da máquina. Na figura 3 observa-se no hub os encaixes que são conectados à pá para fazer a transferência da rotação para o eixo principal.

Figura 3 –Vista de hub com espaço para conexão da pá.



Fonte: Energês, (2020).

2- Eixo de rotação:

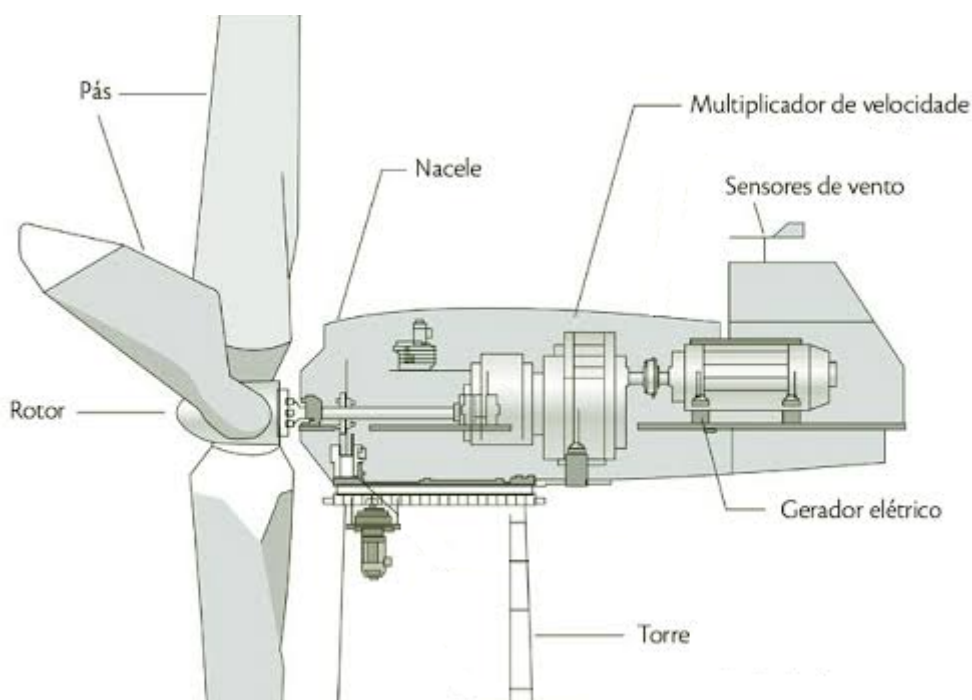
Os aerogeradores possuem eixos que transferem a movimentação das pás para o gerador de fato. Esses eixos podem ser denominados como o de baixa velocidade e o eixo de alta velocidade. O objetivo desse eixo é transferir a rotação do hub, que é em baixa velocidade, elevando essa rotação para que chegue no gerador em uma rotação mais elevada e gere mais energia.

Considerando aerogeradores com caixa de multiplicação. O eixo de baixa velocidade conecta o hub à caixa multiplicadora, que é a responsável, por meio de engrenagens, aumentar

a velocidade do eixo de baixa para o de alta. Já o eixo de alta velocidade é responsável por transmitir o movimento amplificado da caixa multiplicadora ao gerador.

Na imagem 4 observa-se tanto o *Hub*, que passa a rotação para o eixo principal (*Main Shaft*) que está conectado com a caixa multiplicadora para fazer o aumento da rotação do eixo para o eixo de alta velocidade (*High-Speed Shaft*) que é conectado no Gerador.

Figura 4 –Vista interna de componentes da nacele e componentes sequenciais do Hub ao Gerador.



Fonte: Windbox (2024).

3. Caixa multiplicadora

A caixa multiplicadora, também conhecida como caixa multiplicadora ou caixa de engrenagens, é um componente muito importante em aerogeradores. A sua função é aumentar a velocidade do eixo, fazendo com que seja convertido o torque gerado pelo rotor em uma rotação adequada para o gerador, sendo esse aumento de velocidade essencial para geradores elétricos pois precisam, geralmente, de altas rotações para operar de forma eficiente. Internamente as caixas multiplicadoras possuem lubrificação interna para evitar desgastes e aumentar sua vida útil, visto que é um componente essencial para o aerogerador. Na imagem 5 é apresentado um exemplo da parte interna de como deve funcionar uma caixa multiplicadora, um conjunto de engrenagens que transfere a rotação para aumentar a velocidade da saída, que é o eixo de alta velocidade (*High Speed Shaft*).

Figura 5 –Vista interna da caixa multiplicadora (*Gearbox*)



Fonte: Blog da Engenharia Mecânica, 2017.

4- Gerador

O Gerador é um dos componentes mais importantes para um aerogerador, pois é o responsável por converter a energia mecânica do rolamento de alta velocidade em energia elétrica.

5- Nacele

A nacele é o compartimento localizado no topo da torre que é responsável por abrigar todos os os principais componentes mecânicos e elétricos como os já citados anteriormente, caixa multiplicadora, gerador, eixos entre outros. Seu objetivo é proteger os elementos de intempéries e reduzir ruídos gerados na operação do aerogerador. Basicamente seu design é feito para minimizar a resistência ao vento. Na Figura 6 é apresentada a nacele conectada no Hub e no topo da torre.

Figura 6 –Vista externa Nacelle.



Fonte: Energês, (2020).

6- Torre

A torre é a estrutura que suporta a nacelle e o rotor posicionando-os, numa altura suficiente onde os ventos são mais fortes e consistentes, sem nenhuma possível barreira que atrapalhe. As alturas de torres variam dependendo do projeto, podendo alcançar até 170 m. Geralmente confeccionadas de aço tubular ou concreto, são estruturas resistentes que não costumam ser danificadas com facilidade e raramente precisam de manutenção. Geralmente as torres são particionadas, para facilitar o transporte e montagem. Na Figura 7 é mostrada uma parte de uma torre que será conectada a outra que estará posicionada na estrutura.

Figura 7 –Parcela da torre em transporte.

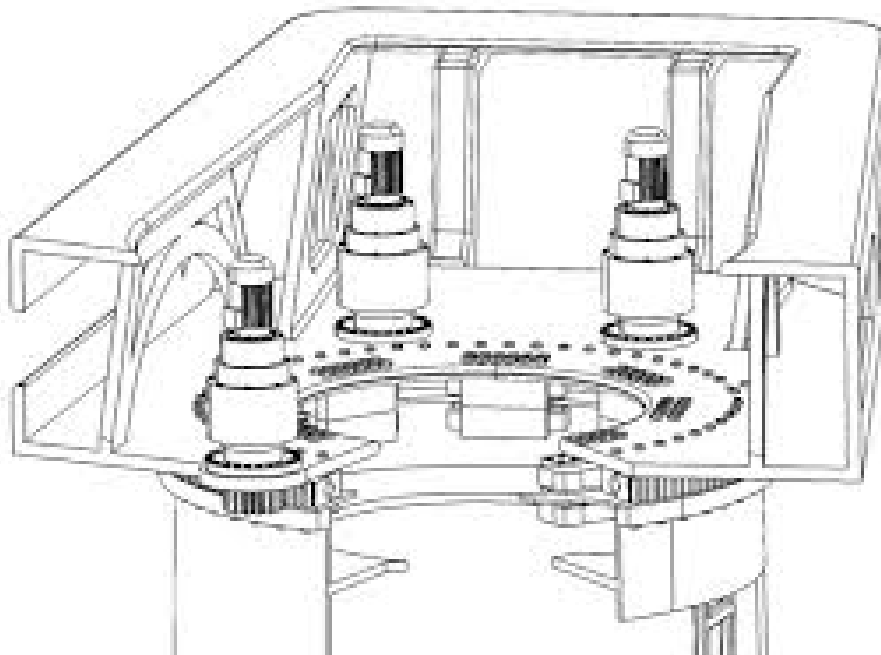


Fonte: Portos e Navios, (2022).

9- Sistema Yaw

O sistema *Yaw* é um conjunto de motores que funcionam para rotacionar a nacele de forma a posicioná-la para a direção do vento, com o objetivo de aumentar e otimizar a captação do vento. Esses motores estão relacionados a sensores de vento como anemômetros que indicam a velocidade e direção do vento no aerogerador, de forma que faça um controle para os motores *Yaw* e rotacione a nacele para a posição desejada. Na Figura 8 é apresentado o sistema *Yaw* composto por múltiplos motores para fazer a rotação desejada.

Figura 8 – Exemplo de sistema Yaw com motores e rolamento.



Fonte: MÜLLER et al., 2014.

8- Transformador

O transformador pode ser encontrado na própria nacela ou na base da torre, dependendo do projeto. O objetivo do transformador é ajustar a tensão elétrica do aerogerador para os padrões da rede elétrica, pois é muito importante que isso aconteça devidamente para que haja uma transmissão segura e eficiente da energia.

2.2.4 Sensores e monitoramento

Uma parte muito importante para todo o acompanhamento tanto em performance de geração quanto para todo o controle de Operação e Manutenção é o monitoramento de diversos sensores que estão distribuídos em diversos componentes dos aerogeradores, para acompanhar o funcionamento e também tentar prever falhas e otimizar preventivas necessárias, para manter a operação segura, confiável e sempre o mais eficiente possível. Os sensores fornecem informações de condições naturais, de operação e da estrutura em tempo real, para que o sistema de controle possa tomar decisões automáticas de forma a prevenir falhas e também os times de engenharia de performance possam acompanhar o desempenho e sugerir ações para cada aerogerador de forma otimizada prevenindo possíveis falhas. Atualmente os sensores em turbinas eólicas são integrados com um sistema de supervisão e

controle de aquisição de dados, chamado de SCADA, que tem o objetivo de fazer a coleta, armazenamento e processamento de dados para análise.

Alguns sensores importantes em aerogeradores são:

1- Sensores de Carga das pás

Como mencionado, as pás são sujeitas a grandes cargas de vento e têm um esforço mecânico elevado, de forma que é importante acompanhar essa informação. Além disso, muitos aerogeradores, por segurança, possuem um sistema de controle que acompanham essas variáveis de carga nas pás e se estiverem desbalanceadas ou elevadas, a turbina limita a rotação e a geração da máquina para evitar esforços excessivos, desgastes e até uma possível falha.

2- Anemômetros e Sensores de Direção do Vento

Como o recurso necessário para geração eolielétrica é o vento, o acompanhamento dele é de grande importância para otimizar a geração. Logo os aerogeradores possuem anemômetros que são sensores que medem a velocidade do vento e fornecem informação do ângulo que o aerogerador desse se posicionar para se alinhar com o vento e operar de forma ideal com a direção e velocidade do vento, para otimizar a geração e evitar sobrecargas na estrutura. Isso tem um papel crucial para a eficiência energética, visto que com esses sensores desalinhados ou desregulados, pode levar a diversas perdas de performance da turbina.

3- Sensores de Vibração

As turbinas eólicas possuem também um sensoramento de vibração, por ser um sistema com muitos componentes mecânicos de rotação e eixos que devem estar alinhados, as vibrações devem ser controladas para evitar um desalinhamento que possa causar uma possível quebra de componentes. Dessa forma, acompanhar as vibrações em diversas posições do aerogerador é essencial, para poder identificar possíveis desbalanceamentos, falhas nos rolamentos, desalinhamentos de eixos, entre outros possíveis riscos. Esses sensores são de grande importância para evitar falhas críticas em componentes grandes e relevantes.

4- Sensores de Temperatura

Tanto em componentes mecânicos como elétricos acompanhar a temperatura é de grande importância, uma vez que isso pode impactar consideravelmente na geração e performance dos aerogeradores. Então, sensores de temperatura são encontrados nos

geradores, caixa multiplicadora, transformadores e até mesmo na Nacele como um todo para evitar possíveis paradas da turbina devido ao superaquecimento de componentes.

5- Sensores de Pressão

A pressão nos sistemas hidráulicos também é uma variável que deve ser monitorada, devido a grande quantidade de sistemas hidráulicos presentes nos aerogeradores. Tanto no hub, que controla a angulação das pás, quanto nos freios do rotor. Logo, sensores de pressão estão presentes nesses componentes para indicar possíveis quedas ou aumentos de pressão que indicam possíveis falhas.

6- Sistemas SCADA e Monitoramento Remoto

Como citado, o aerogerador possui um sensoriamento complexo e isso resulta em diversas informações. Todos esses sensores são unificados nos sistemas SCADA que analisam essas informações em tempo real e disponibilizam de forma remota para facilitar planejamentos e ações quando necessárias. Todo o sensoriamento também é essencial para a equipe de Operação e Manutenção (O & M) poder definir ações e estratégias de manutenção preditiva com o objetivo de sempre aumentar a disponibilidade operacional, mantendo uma alta performance e reduzindo os custos.

2.3 Impactos de performance em aerogeradores

Os aerogeradores são projetados para operarem de forma eficiente em condições variadas, entretanto, existem diversos fatores que podem afetar seus desempenhos. Esses fatores podem ser relacionados tanto ao meio ambiente ou limitações externas, quanto a limitações internas, relacionadas aos componentes e ao sistema da turbina eólica.

Esses impactos no desempenho podem ser relacionados a limitações ou perdas de performance, evidenciando uma perda da geração esperada da turbina. Um desses exemplos de limitação da produção é chamado de “*Constrained Off*”, que é uma restrição de geração demandada pelo próprio operador do sistema. Esse caso é mais evidenciado no Brasil pois o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável por manter confiabilidade e equilíbrio na rede, solicita essas limitações para controlar diversas possíveis situações como a falta de capacidade de transmissão para escoar a energia gerada, congestionamentos em linhas de transmissão e a necessidade de manter o equilíbrio entre oferta e demanda em tempo real. Dessa forma essas ações visam evitar sobrecargas na rede e protegem a integridade dos

equipamentos do sistema elétrico nacional. Entretanto, não são “perdas” controladas, pois como é solicitado pelo ONS e visa a estabilidade do sistema elétrico, deve ser uma perda considerada, dessa forma, devemos refletir e atacar outros tipos de perdas que possamos melhorar.

Outras possíveis limitações operacionais dos aerogeradores podem ser influenciadas por diversos fatores, sejam técnicos ou ambientais: problemas de alinhamento entre o Gerador e a caixa multiplicadora, ou falha nos amortecedores (*Dampers*), que podem gerar vibrações elevadas, sendo necessária uma redução da geração ou até parada da turbina dependendo da situação, por motivos de segurança. Além de fatores naturais, como velocidade e direção do vento, que podem ser indevidos para o que é especificado e esperado para as turbinas, impactando em possíveis paradas ou baixas performances caso haja uma turbulência no recurso de vento.

Além dos componentes posicionados na *Nacelle* que foram citados anteriormente que podem impactar a geração, as próprias pás também são peças críticas para a geração, por serem importantes para a conversão energética, de energia cinética em mecânica. Dessa forma, se as pás estiverem sujeitas a cargas excessivas, seja por mal posicionamento das pás ou até algum problema de sensoriamento no sensor de carga das pás (*Blade Loading Sensor*), o aerogerador, por segurança para evitar algum possível outro componente ou até mesmo a integridade da própria pá, acaba limitando de forma automática, preservando a segurança e a vida útil dos componentes e da estrutura. Isso mostra a importância da análise detalhada das cargas das pás para desenvolvimento de estratégias de manutenção preditiva e reduzindo possíveis perdas de geração ou outros custos, otimizando sempre a operação da máquina.

Além disso, também existem outros fatores internos, como é o caso de aquecimento do transformador, que pode acontecer por diversos motivos, como problemas de resfriamento da *Nacelle*, em caso de turbinas que o transformador esteja presente na mesma, sendo evidenciado, além de riscos de possíveis danos, uma redução de potência também por motivos de proteção, sendo necessário um monitoramento e intervenções preventivas em períodos bem alocados em ventos reduzidos, sempre priorizando otimizar a geração.

2.4 Impactos na performance devido às cargas das pás

Como citado, a carga nas pás podem causar limitação nos aerogeradores e isso, apesar de ter um impacto considerado, não é tão citado e estudado nas literaturas. Dessa forma, é importante um estudo mais voltado para resolver esse problema. Sensores de carga são

responsáveis por analisar e monitorar as forças que atuam sobre a pá, fazendo com que o sistema controle e ajuste o ângulo de ataque ou até limite a operação da turbina por segurança ou para evitar possíveis falhas. Entretanto, nesses sensores podem haver cargas desbalanceadas, pelo fato de cada pá eólica ter uma carga relacionada a ela, logo, falhas nos sensores podem impactar em uma redução da eficiência do sistema, limitação da geração e até mesmo um aumento desnecessário do desgaste do sistema.

A identificação rápida desse tipo de problema pode ajudar a implementar estratégias de O&M para reduzir custos com manutenções corretivas e otimizar disponibilidade das turbinas. Dessa forma, maximizando a produção e garantindo que sejam alcançados os objetivos e as melhores gerações possíveis das máquinas, tendo um alto desempenho.

E com a crescente necessidade da ampliação da eficiência e confiabilidade dos aerogeradores, esse tipo de estudo se prova cada vez mais necessário. O acompanhamento de fatores que possam afetar a performance das turbinas mostra a necessidade do aprimoramento de estratégias de operação e manutenção para contribuir com a redução de possíveis custos e aumentando a geração otimizada das máquinas.

3 ESTADO DA ARTE CARREGAMENTO DE PÁS EM AEROGERADORES

O avanço da energia eólica como uma das principais fontes renováveis de eletricidade tem impulsionado o desenvolvimento de aerogeradores cada vez mais eficientes e de grande porte. No entanto, o aumento do tamanho das turbinas e a complexidade estrutural das pás impõem desafios técnicos relacionados ao carregamento dessas estruturas, impactando diretamente a performance, durabilidade e custos operacionais (DAI *et al.*, 2022). A interação entre as cargas aerodinâmicas, gravitacionais e mecânicas influencia significativamente a vida útil das pás e a necessidade de manutenção, tornando essencial o estudo detalhado dos carregamentos para otimizar a eficiência e reduzir falhas prematuras.

Dessa forma, este capítulo apresenta uma revisão do estado da arte sobre o carregamento de pás em aerogeradores, abordando o histórico dos estudos, o panorama nacional e internacional, as principais contribuições da literatura e uma análise crítica das pesquisas existentes. A compreensão desses fatores permite identificar os desafios e oportunidades para futuras inovações no setor eólico.

3.1 Histórico do Estudo sobre Carregamento de pás em Aerogeradores

A evolução do estudo sobre o carregamento de pás em aerogeradores acompanha o crescimento da energia eólica como fonte sustentável de eletricidade. O aumento progressivo do porte das turbinas trouxe desafios significativos para o desempenho estrutural, a redução de cargas dinâmicas e a otimização da durabilidade das pás. O entendimento desses carregamentos é essencial para evitar falhas prematuras, melhorar a eficiência energética e reduzir os custos de manutenção dos aerogeradores.

3.1.1 Primeiros Estudos e Métodos Tradicionais

Os estudos iniciais sobre carregamento de pás focaram na modelagem aerodinâmica utilizando a Teoria do Elemento de Momento de Pás (*Blade Element Momentum* - BEM), uma abordagem simplificada para estimar as forças atuantes nas pás durante a operação da turbina. Entretanto, o crescimento da escala das turbinas e a necessidade de maior precisão levaram ao desenvolvimento de simulações baseadas em Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) e modelos aeroelásticos avançados (DAI *et al.*, 2022). Com a ampliação do diâmetro do rotor, o impacto de carregamentos assimétricos e oscilações de fadiga estrutural tornou-se mais pronunciado, incentivando a pesquisa em novas estratégias de mitigação.

3.1.2 Desenvolvimento de Estratégias de Mitigação Passiva

Diante das limitações dos métodos tradicionais, foram propostas técnicas passivas para reduzir as flutuações de carga sem a necessidade de atuadores. Uma das abordagens mais promissoras nesse campo é o acoplamento flexível entre torção e flexão (bend-twist coupling – BTC), que permite que as pás se adaptem automaticamente às mudanças nas condições de vento. Estudos como o de Chen *et al.* (2019) demonstraram que a rotação das fibras dos materiais compostos no longarinas das pás pode gerar esse acoplamento, reduzindo o carregamento cíclico e aumentando a vida útil da estrutura. Métodos baseados em modelagem aeroelástica e simulações não-lineares indicaram que o uso de materiais possuem propriedades diferentes em direções distintas e o ajuste do ângulo das fibras podem reduzir a fadiga estrutural em até 15%, mostrando-se uma solução promissora para turbinas de grande porte.

3.1.3 Avanços em Controle Ativo de Cargas

Apesar dos benefícios das estratégias passivas, a crescente complexidade dos aerogeradores exigiu o desenvolvimento de técnicas ativas de controle de carga, capazes de ajustar dinamicamente a operação das pás. Nesse contexto, os estudos sobre regulação cíclica de *pitch* (*Cyclic Pitch Regulation* – CPR) ganharam destaque. Xiao *et al.* (2024) exploraram essa técnica para minimizar as flutuações de carga em turbinas operando sob condições de desalinhamento de vento (*yaw*). Simulações realizadas com o código Aerodyn indicaram que a adoção do CPR pode reduzir a variabilidade da carga nas pás em até 70%, proporcionando maior estabilidade e eficiência operacional. Além disso, os pesquisadores identificaram que a fase e a amplitude da variação do *pitch* são fatores críticos para maximizar a redução da carga e otimizar a conversão de energia (CHEN, J.; *et al.*).

3.1.4 Monitoramento Preditivo e Diagnóstico de Falhas

Nos últimos anos, a pesquisa sobre carregamento de pás também passou a incorporar estratégias de monitoramento e manutenção preditiva, com foco na detecção precoce de falhas estruturais. Kini *et al.* (2023) desenvolveram um modelo baseado em SCADA e análise estatística dinâmica para identificar falhas em sensores e prever falhas estruturais nas pás. O

estudo propôs uma abordagem semi supervisionada, utilizando Independent Component Analysis (ICA) e técnicas de aprendizado de máquina, permitindo a detecção de falhas com maior precisão e menor taxa de alarmes falsos. Esse avanço representa um passo importante para a redução dos custos de manutenção e o aumento da confiabilidade das turbinas.

3.1.5 Impactos da Turbulência Atmosférica no Carregamento das Pás

Outro aspecto relevante do estudo sobre carregamento de pás está relacionado à influência da turbulência atmosférica e dos efeitos de esteira em parques eólicos. Barbosa *et al.* (2022) analisaram os desvios entre a geração prevista e a verificada em turbinas operando no Brasil e demonstraram que a variabilidade da velocidade do vento pode causar reduções de até 17% na produção energética, além de impactar diretamente as cargas aerodinâmicas nas pás. O estudo destaca a necessidade de desenvolver modelos mais precisos para prever o comportamento do vento e minimizar os impactos da turbulência na operação dos aerogeradores.

3.1.6 Tendências Futuras e Lacunas na Pesquisa

A literatura revisada demonstra que os estudos sobre carregamento de pás evoluíram de abordagens simplificadas para modelos sofisticados que combinam simulação aeroelástica, controle ativo e aprendizado de máquina. No entanto, algumas lacunas ainda precisam ser preenchidas:

- Integração entre estratégias passivas e ativas: A maioria dos estudos foca em abordagens isoladas, sem explorar soluções híbridas que combinam BTC e CPR de forma otimizada.
- Validação experimental em turbinas reais: Grande parte das pesquisas utiliza simulações computacionais, sendo necessário mais testes em condições reais de operação.
- Otimização da manutenção preditiva: Embora o monitoramento via SCADA e aprendizado de máquina tenha mostrado resultados promissores, ainda há desafios na correlação entre os dados coletados e a degradação estrutural real das pás.

- Especificidades regionais: No Brasil, há poucos estudos focados nas particularidades climáticas do país e na adaptação das turbinas às condições atmosféricas locais.

Dessa forma, o estudo sobre carregamento de pás continua a ser um campo em evolução, demandando novas pesquisas que integrem técnicas de otimização estrutural, controle avançado e manutenção preditiva para garantir a eficiência e a longevidade dos aerogeradores.

3.2 Panorama do tema no Brasil

No Brasil, a energia eólica tem se consolidado como uma das principais fontes renováveis, impulsionada pelo crescimento dos parques eólicos, sobretudo na região Nordeste. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2023), o país ultrapassou a marca de 33 GW de capacidade instalada, posicionando-se entre os dez maiores mercados eólicos do mundo.

Apesar do avanço na geração eólicoelétrica, os estudos sobre carregamento de pás e otimização da operação dos aerogeradores no Brasil ainda estão em desenvolvimento. Pesquisas acadêmicas brasileiras têm focado na avaliação dos impactos da turbulência atmosférica e dos efeitos de esteira na eficiência das turbinas (BARBOSA *et al.*, 2022). Os desvios na geração de eletricidade causados por variações no fluxo de vento são frequentemente reportados em parques eólicos nacionais, evidenciando a necessidade de métodos mais precisos para modelagem das cargas atuantes nas pás.

Além disso, desafios como a implementação de sensores para monitoramento estrutural em tempo real e a utilização de inteligência artificial para manutenção preditiva estão entre as principais barreiras tecnológicas enfrentadas no Brasil. Dessa forma, há um grande potencial para o desenvolvimento de estratégias de controle e otimização específicas para as condições climáticas e operacionais brasileiras.

3.3 Panorama Internacional do tema

O estudo sobre carregamento de pás em aerogeradores têm sido amplamente desenvolvido em nível internacional, impulsionado pelo crescimento acelerado da energia eólica como fonte renovável estratégica para a transição energética. Nos últimos anos, pesquisas e investimentos em tecnologias avançadas de controle de cargas estruturais e

aerodinâmicas das pás têm sido prioridade para diversos países, especialmente aqueles que lideram a produção de energia eólica, como China, Estados Unidos, Alemanha e Dinamarca.

Os desafios associados ao aumento do porte das turbinas eólicas têm demandado novas abordagens para mitigar as cargas dinâmicas que afetam a estrutura das pás, reduzindo os riscos de falha prematura e otimizando a performance do aerogerador. Estudos como o de Dai *et al.* (2022) demonstram que, à medida que os rotores aumentam de tamanho, as forças aerodinâmicas sobre as pás tornam-se mais complexas, exigindo métodos mais sofisticados de modelagem e controle. Além disso, a evolução das metodologias de medição de cargas em turbinas comerciais tem sido um dos grandes avanços no setor. Enquanto sistemas SCADA são amplamente utilizados para monitoramento em tempo real, há esforços para a integração de sensores avançados nas pás, que possibilitam medições diretas das forças atuantes sobre a estrutura, melhorando a confiabilidade das análises.

Outra vertente importante da pesquisa internacional é o desenvolvimento de tecnologias de controle passivo e ativo das cargas. O estudo de Chen *et al.* (2019) reforça a relevância do uso de acoplamento entre torção e flexão (bend-twist coupling – BTC) como estratégia para reduzir as oscilações de carga sem a necessidade de atuadores, tornando as pás mais eficientes e resistentes. Essa abordagem, baseada em materiais compostos com propriedades que possuem propriedades diferentes em direções diferentes, tem sido aplicada não apenas a turbinas eólicas, mas também a turbinas marítimas e hélices de propulsão naval, demonstrando seu potencial para melhorar a estabilidade e a durabilidade das estruturas.

Além do BTC, estratégias de controle ativo de *pitch* têm sido estudadas para lidar com as variações de carga que ocorrem devido às mudanças nas condições de vento. Xiao *et al.* (2024) exploraram a regulação cíclica CPR como uma solução para reduzir a variabilidade das cargas em turbinas sujeitas a desalinhamento de vento (yaw), demonstrando que a adoção dessa técnica pode mitigar flutuações em até 70%. O impacto da turbulência atmosférica na performance das turbinas também tem sido amplamente investigado, pois a variabilidade do vento pode influenciar significativamente a eficiência da conversão de energia e a longevidade estrutural dos componentes. Barbosa *et al.* (2022) destacam que a instabilidade da velocidade do vento, agravada pelo efeito de esteira e por perturbações atmosféricas, pode levar a desvios de até 17% na geração esperada das turbinas, evidenciando a necessidade de modelos mais precisos para prever esses impactos.

Por fim, a pesquisa internacional também tem avançado na implementação de inteligência artificial e aprendizado de máquina para a manutenção preditiva de turbinas eólicas. O estudo de Kini *et al.* (2023) propõe um modelo de monitoramento baseado em

análise estatística dinâmica e SCADA, capaz de detectar falhas em sensores e prever anomalias estruturais com maior precisão. Essa abordagem tem se mostrado promissora para reduzir custos operacionais e evitar falhas inesperadas, garantindo maior confiabilidade aos parques eólicos.

Com esses avanços, o panorama internacional revela um campo em constante inovação, no qual a integração entre modelagem computacional avançada, controle aerodinâmico e técnicas de manutenção preditiva tem sido a chave para a evolução dos aerogeradores. A tendência global é que essas tecnologias continuem sendo aprimoradas, especialmente à medida que turbinas cada vez maiores são desenvolvidas para maximizar a captação de energia eólica.

3.4 Conclusão da literatura sobre o tema

Embora a literatura revisada tenha apresentado avanços significativos, ainda existem lacunas importantes que necessitam de investigação adicional. Um dos principais desafios identificados é a integração entre diferentes estratégias de mitigação de cargas, visto que muitos estudos tratam isoladamente o controle passivo, o controle ativo e a manutenção preditiva. A combinação de técnicas como o bend-twist *coupling* (BTC) e o CPR poderia proporcionar ganhos ainda mais expressivos na redução do carregamento estrutural das pás.

Outro ponto crítico é a falta de validação experimental em turbinas reais. Grande parte das pesquisas utiliza modelos computacionais e simulações, o que, embora forneça resultados promissores, ainda necessita de testes em condições reais de operação para garantir a confiabilidade das soluções propostas. Além disso, a implementação de sensores integrados às pás continua sendo um desafio, uma vez que muitas turbinas comerciais dependem exclusivamente de sistemas SCADA, que não captam diretamente as forças atuantes nas pás.

Por fim, há uma necessidade crescente de adaptação dos modelos de controle e manutenção às condições climáticas e operacionais específicas de cada região, especialmente no Brasil, onde a variabilidade da velocidade do vento e os efeitos de esteira são desafios recorrentes. Assim, estudos futuros devem focar na personalização das estratégias de mitigação de carga para diferentes cenários operacionais. Na tabela 1 é apresentado um compilado dos principais artigos analisados sobre o tema.

Tabela 1 – Síntese dos principais artigos pesquisados no Estado da Arte

Artigo	Tema (Foco de estudo)	Local	Publicação	Referência
"Progress and challenges on blade load research of large-scale wind turbines"	Análise das cargas estruturais em pás e desafios de medição direta	China	2022	DAI, J.; et al., 2022.
"Enhancing Wind Turbine Performance: Statistical Detection of Sensor Faults Based on Improved Dynamic Independent Component Analysis"	Monitoramento preditivo com análise estatística de falhas em sensores	Internacional	2023	KINI, K. R.; et al., 2023.
"Study on composite bend-twist coupled wind turbine blade for passive load mitigation"	Uso de acoplamento flexão-torção para redução passiva de cargas	China	2019	CHEN, J.; et al., 2019.
"Load reduction and mechanism analysis of cyclic pitch regulation on wind turbine pás under yaw conditions"	Controle cíclico de pitch para mitigar flutuações de carga	Internacional	2024	XIAO, Y.; et al., 2024.
"Uma Revisão Preliminar dos Efeitos Turbulentos de Vento nos Desvios de Geração em Turbinas Eólicas."	Monitoramento de pás sob condições ambientais brasileiras	Brasil	2022	BARBOSA, E. T. I.; et al., 2022.

Fonte: elaborada pelo autor.

4 MATERIAL E MÉTODO

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para a realização do estudo de caso sobre a relação entre o carregamento das pás e a performance dos aerogeradores no parque eólico da empresa Casa dos Ventos, localizado no Rio Grande do Norte. A material e método foi definido de forma a garantir uma abordagem sistemática e replicável, utilizando análise quantitativa dos dados coletados a partir dos sensores dos aerogeradores, cruzando informações operacionais e dados históricos de desempenho.

O estudo combina técnicas estatísticas, ferramentas computacionais de análise e modelagem de anomalias, além da interpretação prática das informações obtidas em campo. As metodologias utilizadas permitiram avaliar as perdas energéticas associadas ao carregamento das pás, compreender os impactos na operação dos aerogeradores e propor melhorias para a mitigação de limitações futuras.

4.1 Classificação do estudo

Este trabalho é classificado como um estudo de caso de natureza quantitativa e descritiva, uma vez que analisa dados operacionais de aerogeradores e busca descrever e quantificar a relação entre carregamento das pás e perda de performance. A abordagem quantitativa permite a aplicação de técnicas estatísticas para identificação de padrões, detecção de anomalias e cálculo de perdas energéticas.

A pesquisa também assume um caráter exploratório, pois investiga a relação entre variáveis operacionais e o impacto do carregamento das pás, utilizando um grande volume de dados históricos armazenados na plataforma GCP. O uso de ferramentas como Python e Tableau para processamento e visualização dos dados reforça a objetividade e a precisão dos resultados.

4.2 Descrição do Cenário de Análise

O estudo foi realizado com base nos dados operacionais de um parque eólico da Casa dos Ventos, localizado no estado do Rio Grande do Norte, Brasil. O parque está em operação há quatro anos, garantindo um volume de dados confiável e representativo para a análise. O período de análise compreende janeiro de 2023 a dezembro de 2024, totalizando 731 dias de operação.

Os aerogeradores analisados pertencem ao modelo Vestas V150-4.5MW, que possui as seguintes características técnicas:

- Potência nominal: 4,5 MW;
- Diâmetro do rotor: 150 metros;
- Altura da torre: 90 metros;
- Sistema de controle: SCADA e sensores internos de desempenho.

Os dados analisados foram coletados de 120 aerogeradores, mas a análise detalhada foi focada em oito máquinas que apresentaram limitações operacionais significativas. Essas máquinas foram escolhidas com base em sua frequência de ocorrências de performance parcial (OG-PPI) e na presença de anomalias nos sensores de carregamento das pás.

As variáveis principais utilizadas na análise incluem:

- Carregamento das pás (*Blade Load A, B, C*);
- Potência ativa (MW);
- Velocidade e direção do vento (m/s, graus);
- Perda de geração (*Lost_KW_contratual*);
- Histórico de manutenção e eventos de limitação.

O parque eólico estudado está localizado em uma região com condições favoráveis à geração de eletricidade, com ventos fortes e constantes ao longo do ano. No entanto, a topografia do terreno pode influenciar a operação das turbinas, impactando o carregamento das pás e a eficiência da geração.

4.3 Coleta de Dados

A coleta de dados foi um dos elementos centrais desta pesquisa, pois forneceu a base para todas as análises realizadas. Para garantir uma investigação precisa e abrangente do impacto do carregamento das pás na performance dos aerogeradores, os dados foram extraídos a partir de registros históricos armazenados na plataforma GCP.

Os dados foram obtidos utilizando consultas SQL para seleção de informações relevantes e scripts em *Python* para extração e processamento dos dados. Esse método

permitiu a análise de séries temporais, possibilitando a identificação de padrões operacionais, tendências de carregamento das pás e a detecção de anomalias. Além disso, foram analisados registros do sistema SCADA, bem como dados da ferramenta de detecção de anomalias baseada em *machine learning*.

O período analisado compreendeu dois anos de operação (2023 e 2024), abrangendo um total de 731 dias de registros operacionais, esses anos foram escolhidos por serem os anos mais recentes para que hajam dados o suficientes e também que não sejam os primeiros anos do parque, de forma que se analise um parque em operação a um tempo. A granularidade da coleta foi definida em intervalos de 10 minutos, resultando em um grande volume de dados, que foi pré-processado para garantir sua confiabilidade e consistência antes da análise estatística.

4.3.1 Fontes de Dados

A pesquisa baseou-se em três principais fontes de dados para estruturar a análise.

Primeiramente o banco de dados SCADA que foi a fonte primária de informações operacionais dos aerogeradores, permitindo o monitoramento contínuo do desempenho das turbinas. Esse sistema registrou dados em tempo real sobre, geração de eletricidade (MW) – quantidade de energia produzida pela turbina, Velocidade do vento (m/s) – medição essencial para determinar se a geração de eletricidade está coerente com as condições atmosféricas, carregamento das pás (*Blade Load* A, B e C) – valores que indicam o esforço mecânico aplicado sobre cada pá do aerogerador, estados operacionais – registros sobre períodos de operação normal, limitação de performance e falhas técnicas. Essas variáveis são essenciais para a análise do desempenho das turbinas e identificação de padrões de comportamento relacionados ao carregamento das pás.

O Sistema de Detecção de Anomalias que a Casa dos Ventos desenvolveu como uma plataforma interna de detecção de anomalias baseada em *machine learning*, a qual identifica padrões anômalos nas variáveis operacionais dos aerogeradores. Esse sistema utiliza Autoencoders, um modelo de aprendizado profundo especializado em detecção de *outliers*, para identificar eventos que desviam significativamente do comportamento normal esperado. A tabela *anomaly_detection* armazena os momentos em que as variáveis operacionais ultrapassam os limites superiores e inferiores esperados, permitindo a análise detalhada dos eventos anômalos e sua relação com a limitação de geração.

E por fim o histórico de Manutenção e Ocorrências que são os operacionais foram extraídos dos registros da equipe de Operação e Manutenção (O&M). Esses registros contêm informações detalhadas sobre intervenções realizadas nas turbinas, substituição de sensores e componentes mecânicos, registros de falhas operacionais e tempos de indisponibilidade. A análise desses registros permitiu correlacionar as limitações observadas nos sensores com eventos de manutenção, proporcionando uma compreensão mais profunda das causas das perdas de geração.

4.3.2 Pré-processamento

O pré-processamento dos dados foi uma etapa essencial para garantir a qualidade, confiabilidade e coerência das informações utilizadas na análise. Essa etapa envolveu: eliminação de dados inconsistentes e *outliers*, integração de dados e normalização temporal.

Os dados foram submetidos a um rigoroso processo de limpeza para remover valores nulos, replicados e inconsistentes. Para identificar e tratar *outliers*, foram aplicados métodos estatísticos garantindo que os dados anômalos identificados não fossem apenas flutuações naturais da operação, mas eventos de fato significativos para a análise.

Os dados extraídos do SCADA, do sistema de detecção de anomalias e dos registros de manutenção foram combinados para criar uma base de análise unificada, possibilitando uma visão multidimensional do problema.

Para garantir comparabilidade entre os registros, os dados foram organizados em intervalos de 10 minutos. Esse nível de granularidade permitiu capturar variações operacionais detalhadas sem comprometer a eficiência da análise.

4.4 Análise de Dados

A análise de dados foi conduzida com o objetivo de identificar padrões que relacionassem o carregamento das pás dos aerogeradores com suas respectivas performances operacionais. Para garantir uma abordagem sistemática e replicável, a análise seguiu três etapas principais: (i) identificação de máquinas que apresentaram performance parcial ao longo dos anos de 2023 e 2024, (ii) detecção de anomalias nos sensores de carregamento das pás e (iii) correlação entre carregamento das pás e perdas energéticas e financeiras. Essas etapas foram desenvolvidas a partir de consultas ao banco de dados do parque eólico e da

aplicação de técnicas estatísticas e computacionais para tratamento, modelagem e visualização dos dados.

4.4.1 Identificação de Máquinas com Performance Parcial

Inicialmente, foram selecionados os aerogeradores que apresentaram performance parcial recorrente, ou seja, máquinas que, ao longo dos anos de 2023 e 2024, operaram abaixo de sua capacidade esperada mesmo quando as condições ambientais (principalmente velocidade do vento) estavam favoráveis. Essa classificação foi obtida a partir da tabela *wtg_performance*, onde cada aerogerador é classificado por estados operacionais que indicam sua condição de operação. O critério para a seleção dos aerogeradores foi a frequência de ocorrência do estado OG-PPI (Operação Geral – Performance Parcial).

A extração desses dados foi realizada utilizando consultas SQL na GCP e o processamento foi feito com *Python* (bibliotecas *Pandas* e *NumPy*). O objetivo foi identificar quais aerogeradores apresentaram esse comportamento de forma recorrente e por longos períodos. Após essa identificação inicial, os dados foram segmentados em diferentes períodos temporais para permitir uma análise mais detalhada das condições operacionais das turbinas.

4.4.2 Detecção de Anomalias nos Sensores de Carregamento das Pás

Após a identificação das máquinas com performance parcial, a análise foi aprofundada na investigação de possíveis anomalias nas variáveis de carregamento das pás. Para isso, foram utilizadas as variáveis *Blade Load A*, *B* e *C*, extraídas da tabela *raw_10min*, que contém registros médios de dados operacionais a cada 10 minutos.

Os dados foram comparados aos limites superiores e inferiores esperados para cada variável, utilizando informações da tabela *anomaly_detection*. Essa tabela é gerada por um modelo de *machine learning* baseado em Autoencoders, que analisa padrões históricos e detecta variações atípicas no carregamento das pás. Sempre que uma das variáveis de carregamento das pás apresentava um desvio significativo em relação ao comportamento normal, ela era marcada como um evento anômalo.

Para realizar essa análise, os dados das variáveis *Blade Load* foram processados utilizando *Python*, aplicando técnicas de filtragem para segmentar os períodos em que ocorreram anomalias. Além disso, foi realizado um cruzamento entre os registros de anomalia

e os períodos de performance parcial identificados anteriormente, buscando entender se havia uma correlação entre esses eventos.

4.4.3 Correlação entre Carregamento das Pás e Perdas de Geração

A última etapa da análise consistiu em investigar como as anomalias no carregamento das pás impactavam a geração dos aerogeradores. Para isso, foram utilizados dados da tabela *wtg_performance*, com foco na variável *Lost_KW_contratual*, que representa a diferença entre a potência potencialmente gerável e a potência efetivamente gerada por cada turbina.

A perda de energia (MWh) foi calculada considerando os períodos em que os aerogeradores estavam limitados por carregamento das pás, e os impactos financeiros foram estimados com base no preço médio da energia comercializada no mercado regulado. Para realizar essa análise, foram empregadas as seguintes técnicas estatísticas:

- **Análise Descritiva:** Cálculo de média, mediana e desvio padrão das variáveis de interesse ao longo do tempo.
- **Correlação entre Variáveis:** Avaliação da relação entre as anomalias nos sensores de carregamento das pás e a geração dos aerogeradores.
- **Regressão Linear:** Modelagem da influência das variações nos carregamentos das pás sobre a geração de eletricidade, buscando quantificar o impacto da sobrecarga na eficiência dos aerogeradores.

Os resultados dessa análise permitiram avaliar a magnitude das perdas energéticas e financeiras associadas às anomalias no carregamento das pás, além de fornecer insights operacionais sobre o tempo médio de recuperação das turbinas afetadas.

4.5 Ferramentas Computacionais

A análise dos dados e a extração de insights relevantes para este estudo exigiram o uso de diversas ferramentas computacionais para armazenamento, processamento, análise estatística, modelagem preditiva e visualização dos resultados. Essas ferramentas foram escolhidas estrategicamente para garantir eficiência no processamento de grandes volumes de dados, reprodutibilidade das análises e acessibilidade dos resultados para a equipe de operação e manutenção (O&M).

4.5.1 Google Cloud Platform (GCP) – Armazenamento e Processamento de Dados

O GCP foi utilizado como a principal plataforma de armazenamento e processamento de dados operacionais do parque eólico. O banco de dados utilizado na infraestrutura do GCP permitiu armazenar grandes volumes de dados coletados em tempo real a partir dos sensores dos aerogeradores e do sistema SCADA.

A plataforma viabilizou a realização de consultas otimizadas em SQL para extrair e integrar dados de diferentes tabelas, como *wtg_performance* (dados de performance das turbinas), *raw_10min* (médias de variáveis operacionais a cada 10 minutos) e *anomaly_detection* (detecção de padrões anômalos nos sensores de carregamento das pás). A infraestrutura em nuvem possibilitou alta disponibilidade dos dados, permitindo acessos simultâneos de diferentes setores da empresa para análise e acompanhamento das turbinas.

4.5.2 Python – Processamento e Análise de Dados

A linguagem *Python* foi amplamente utilizada para o pré-processamento, a análise estatística e a modelagem preditiva dos dados. Para isso, foram empregadas bibliotecas especializadas, conforme descrito a seguir:

- *Pandas*: Manipulação e estruturação dos dados extraídos do GCP, garantindo a limpeza, integração e formatação dos registros para análises posteriores.
- *NumPy*: Aplicação de cálculos matemáticos e estatísticos para avaliação das variáveis operacionais.
- *Matplotlib* e *Seaborn*: Geração de gráficos e visualizações que auxiliaram na identificação de padrões e tendências nos dados.
- *Scikit-Learn*: Implementação de técnicas de *machine learning*, como Autoencoders, para a detecção de anomalias nos sensores de carregamento das pás.

Os scripts desenvolvidos permitiram automatizar a análise dos dados, reduzindo significativamente o tempo necessário para identificar padrões anômalos e correlacioná-los com perdas energéticas.

4.5.3 Tableau Online – Visualização dos Resultados

O *Tableau Online* foi utilizado para criação de *dashboards* interativos, permitindo a visualização clara e intuitiva dos dados analisados. Com essa ferramenta, foi possível compilar as informações operacionais dos aerogeradores em gráficos dinâmicos, possibilitando que a equipe de O&M acompanhasse em tempo real as anomalias identificadas e suas consequências na geração de eletricidade.

Dentre as principais funcionalidades exploradas no *Tableau*, destacam-se:

- Comparação da geração versus potência esperada, permitindo identificar períodos de limitação de desempenho.
- Monitoramento das variáveis de carregamento das pás, auxiliando na investigação de padrões recorrentes de sobrecarga.
- Visualização geoespacial dos aerogeradores, permitindo identificar se as limitações eram mais comuns em determinadas localizações dentro do parque.

O *Tableau* se mostrou uma ferramenta fundamental para a comunicação dos resultados com os times de engenharia e operação, possibilitando uma análise visual detalhada das informações coletadas.

4.5.4 Django – Desenvolvimento de Plataforma Web para Centralização das Análises

Para facilitar o acesso aos dados analisados e às detecções de anomalias, foi desenvolvido um sistema web utilizando o *framework Django*. Esse sistema centraliza todas as informações relevantes, permitindo que engenheiros e técnicos consultem rapidamente os aerogeradores que apresentaram anomalias e as possíveis causas das limitações operacionais. A aplicação desenvolvida possibilita:

- Consulta dinâmica dos períodos de anomalia nas turbinas, filtrando por data e tipo de evento identificado.
- Integração com o banco de dados do GCP, garantindo acesso contínuo aos dados atualizados.
- Geração de relatórios personalizados, permitindo a exportação de análises detalhadas para tomada de decisão estratégica.

A plataforma baseada em *Django* se tornou um ferramental essencial para centralizar e democratizar o acesso às informações operacionais, garantindo maior eficiência na resposta às falhas detectadas e auxiliando na mitigação das perdas energéticas.

4.6 Validação dos Resultados

A validação dos resultados obtidos neste estudo foi conduzida por meio de diferentes abordagens, garantindo que as análises realizadas estivessem alinhadas com os dados reais de operação das turbinas e que as conclusões fossem robustas, confiáveis e aplicáveis ao contexto operacional do parque eólico.

4.6.1 Comparação com Curvas Teóricas de Potência

Uma das principais estratégias de validação foi a comparação dos resultados obtidos com as curvas teóricas de potência dos aerogeradores. As turbinas eólicas possuem curvas características de potência, que definem quanta energia deve ser gerada em função da velocidade do vento.

Os dados analisados foram confrontados com essas curvas de potência para verificar se as máquinas com performance parcial e anomalias nos sensores de carregamento das pás estavam operando abaixo da expectativa teórica, confirmando que os padrões identificados representavam, de fato, um desvio significativo em relação ao comportamento esperado.

Caso as máquinas apresentassem geração de eletricidade inferior ao esperado para determinada velocidade do vento, isso reforçava a hipótese de que o carregamento excessivo das pás poderia estar impactando negativamente a conversão de energia.

4.6.2 Análise de Histórico de Manutenções

Além da validação por curvas de potência, os períodos de limitação identificados na análise foram confrontados com registros históricos de manutenção e ocorrências da equipe de O&M. Essa verificação permitiu entender se as falhas detectadas pelos sensores haviam sido relatadas como problemas reais nas inspeções de campo.

Os dados foram cruzados para verificar se havia correspondência entre:

- Períodos de limitação por carregamento das pás e registros de intervenções na calibração ou substituição dos sensores de carga.
- Anomalias identificadas nos sensores de carregamento e eventos registrados no sistema de manutenção, como paradas para ajustes no sistema de *pitch* ou correções estruturais das pás.
- Impacto da substituição de sensores e componentes sobre a normalização do desempenho das turbinas.

Essa análise garantiu que os padrões anômalos detectados pelos modelos computacionais correspondiam a falhas reais, fortalecendo a confiabilidade dos resultados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Introdução aos resultados

Dentre as oito máquinas analisadas, três apresentaram limitações significativas devido a problemas de carregamento de pá enquanto as demais cinco tiveram limitações por outros motivos, como limitações forçadas para troca de grandes componentes, limitações pela ONS e condições climáticas adversas. As limitações por carregamento de pá resultaram em uma perda total de energia de aproximadamente 1.636,38 MWh. Considerando um valor médio de 300 reais por MWh, o que corresponde a um prejuízo financeiro estimado de R\$490.913,00 devido a apenas as 3 turbinas. Como esses valores foram alcançados será melhor desenvolvido ao decorrer deste capítulo.

Os resultados obtidos são de grande relevância para a operação e manutenção de aerogeradores, uma vez que permitem identificar padrões de falha, otimizar a manutenção e reduzir as perdas energéticas. Além disso, este estudo contribui para a compreensão dos fatores que impactam a performance dos aerogeradores e a proposição de soluções aplicáveis em parques eólicos de grande porte. A análise detalhada dos dados também evidenciou a importância de monitoramento contínuo e em tempo real, bem como a necessidade de técnicas avançadas de detecção de anomalias para prevenir falhas e maximizar a eficiência operacional.

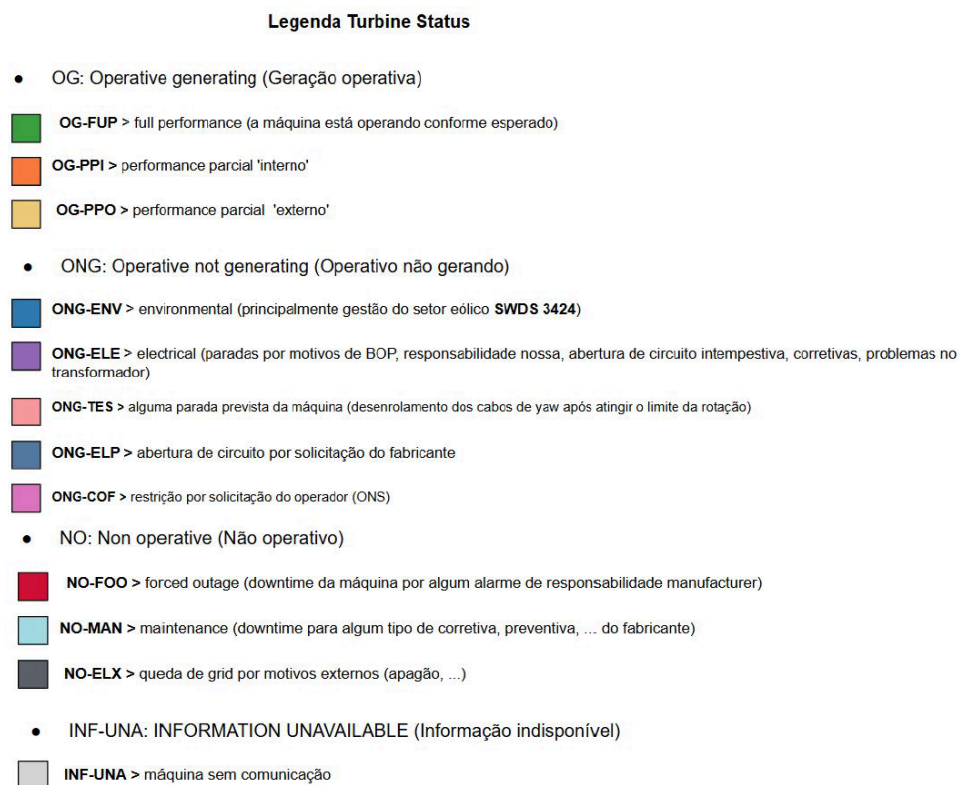
5.2 Seleção das Máquinas de Estudo

A seleção das máquinas de estudo foi realizada com base em uma análise preliminar dos dados de desempenho, utilizando consultas ao banco de dados do GPC, que é a plataforma de armazenamento de dados da empresa, que armazena tanto dados brutos quanto dados tratados de diversas fontes, subestação, aerogeradores, *Bay*, entre outros. O processo de seleção envolveu três etapas principais: (1) identificação de máquinas com desempenho parcial, (2) análise de anomalias nas variáveis de carregamento das pás, e (3) filtragem dos casos mais relevantes.

5.2.1 Identificação de Máquinas com Desempenho Parcial

Existem algumas formas de classificar a geração de um aerogerador, a Casa dos Ventos utiliza classificações próprias, para facilitar o entendimento foi feita uma legenda que é representada na Figura 9 a seguir.

Figura 9 - Legenda de status das turbina (Em inglês e explicações em português)



Fonte:Elaborado por Helton Oliveira (2025).

Dessa forma, sabendo as classificações, foram selecionadas máquinas classificadas com performance parcial (OG-PPI) ao longo dos anos de 2023 e 2024. Essa classificação indica que as máquinas estavam operando abaixo de sua capacidade máxima, possivelmente devido a limitações técnicas ou ambientais. Essa consulta foi feita utilizando *Pytho*. A consulta inicial foi à tabela *wtg_performance*, que é utilizada na análise de performance dos aerogeradores e contém informações essenciais para avaliar a eficiência e o funcionamento dos equipamentos. Seu objetivo é registrar dados sobre a energia produzida, a velocidade do vento, a classificação dos estados operacionais e as energias potenciais, permitindo um acompanhamento detalhado do desempenho das turbinas. Os dados são coletados com uma granularidade de 10 minutos, garantindo uma visão contínua do comportamento dos

aerogeradores. Dessa tabela foi possível identificar os períodos em que as máquinas apresentaram essa classificação de performance parcial, bem como a frequência de ocorrência em tempos de 10 minutos.

5.2.2 *Análise de Anomalias nas Variáveis de Carregamento das Pás*

Para identificar possíveis causas das limitações, foram analisadas as variáveis de carregamento das pás (*Analog_pás_BladeLoadA*, *Analog_pás_BladeLoadB*, *Analog_pás_BladeLoadC*), utilizando dados do sistema de *anomaly detection* que é um modelo de detecção desenvolvido na empresa que tem o objetivo a detecção de anomalias, que é geralmente entendida como a identificação de eventos que se desviam significativamente da maioria dos dados. Esta tabela contém as variáveis que apresentaram desvios em relação à normalidade. Seu principal objetivo é antecipar falhas nos aerogeradores, permitindo ações preventivas para reduzir o tempo de inatividade e otimizar a operação dos equipamentos. Essas variáveis foram escolhidas por estarem diretamente relacionadas ao esforço mecânico aplicado nas pás dos aerogeradores. Os limites superiores (*upper*) e inferiores (*lower*) esperados para cada variável foram utilizados para identificar anomalias, ou seja, momentos em que os valores estavam fora dos limites operacionais.

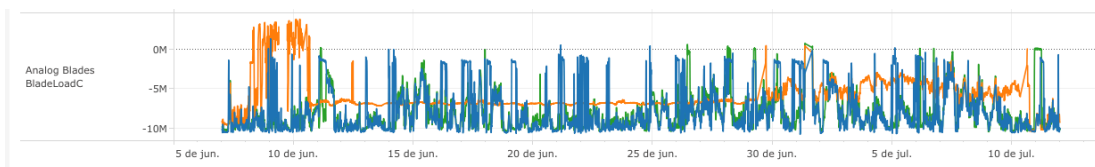
5.2.3 *Filtragem dos Casos Mais Relevantes*

No código, foram selecionados todos os pontos com performance parcial, após isso, foi adicionado as informações para esses timestamps de *upper* e *lower* da tabela de *anomaly_detection* e em seguida foi adicionada a informação dos valores das variáveis de carregamento de pás A, B e C pela tabela *raw_10min*, que é uma tabela que traz as médias dos dados analógicos dos aerogeradores. Após um tratamento inicial do dado agregado, foi criada uma classificação para contabilizar quantos casos os valores das variáveis de carregamento de pás estavam ou acima do *upper* ou abaixo do *lower*, que são representações de caso de anomalia nessas variáveis. A tabela gerada foi ordenada por quantidade de momentos em performance parcial, considerei os 20 primeiros casos para a análise mais detalhada, pois a quantidade de ocorrências de baixa performance reduziu significativamente de 2.124 para aproximadamente 200 dentro desse intervalo. Dessa forma, os casos a partir do vigésimo tinham uma influência menos significativa na avaliação da performance parcial, tornando sua inclusão menos relevante para a análise.

Considerando esses 20 casos, houve informação das turbinas afetadas e o mês, dessa forma, foi feito um estudo através de um *dashboard* feito pelo *Software Tableau* que traz a informação de variáveis do meu interesse. As variáveis selecionadas foram a potência da turbina, a velocidade do vento e a variável de carregamento para cada pá e selecionando o mês de interesse para poder comparar com as turbinas vizinhas e entender se de fato poderiam ser casos de limitação por carregamento das pás. Nas figuras a seguir poderemos ver os 8 casos que foram encontradas anomalias nos carregamentos de pá.

Na figura 10, observa-se em laranja o comportamento limitado da turbina SMA12-009, na potência ativa e observa-se um claro comportamento anômalo dos carregamentos de pás, em especial da blade C.

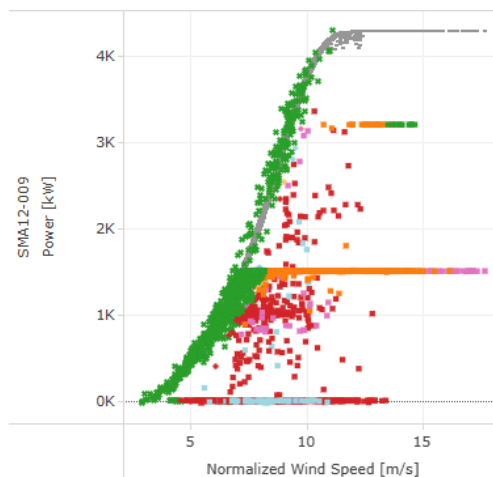
Figura 10 - Análise de carregamento das pás para turbina SMA12-009 em laranja



Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 11, é possível ver a representação da limitação na curva de potência da turbina. Nos gráficos a seguir, observa-se as cores em verde nos gráficos de potência representando pontos de geração plena e em amarelo representa as performances parciais, já as vermelhas representam paradas de máquina e as rosas limitações pela ONS.

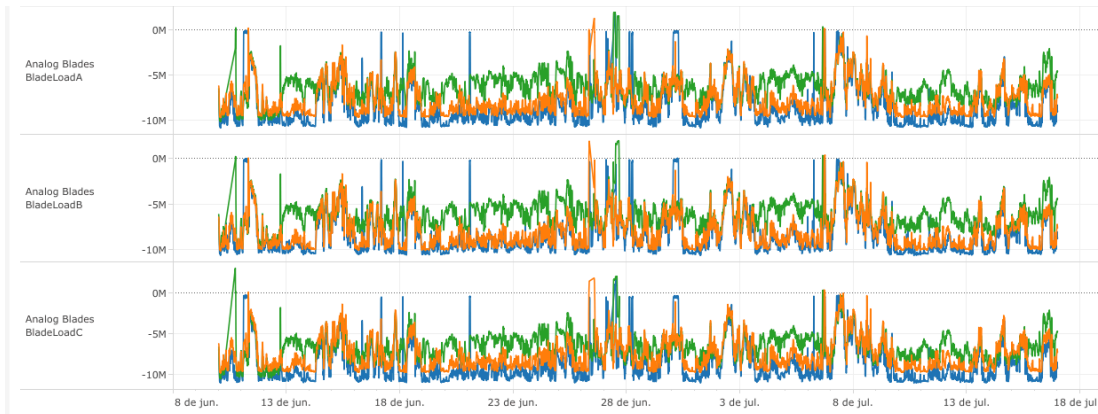
Figura 11 - Análise de carregamento das pás para turbina SMA12-009



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a FIGURA 12, observa-se a limitação da SMA09-010 no mês de junho de 2023 e um leve comportamento elevado dos carregamentos de pás. Em verde observa-se a curva de carregamento superior aos aerogeradores vizinhos.

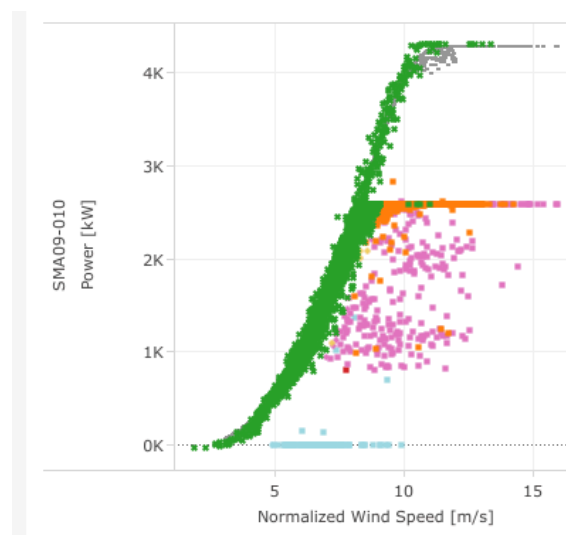
Figura 12 - Análise de carregamento das pás para turbina SMA09-010



Fonte: elaborado pelo autor.

Semelhante para a Figura 13, é possível ver a limitação na curva de potência em laranja.

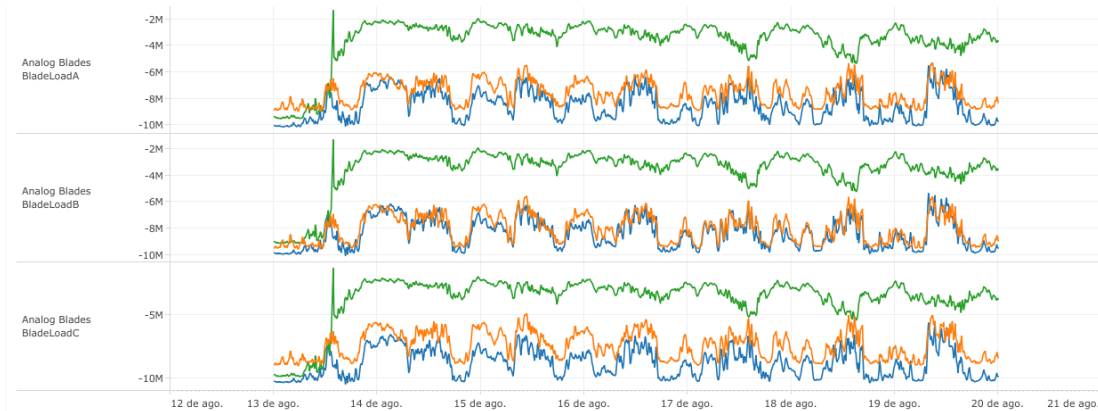
Figura 13 - Análise da curva de potência para turbina SMA09-010



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 14, observa-se um comportamento diferente das demais, com uma limitação bem considerável e todos os carregamentos de pá bastante elevados, como se a máquina SMA09-010 estivesse praticamente parada no mês de agosto de 2024.

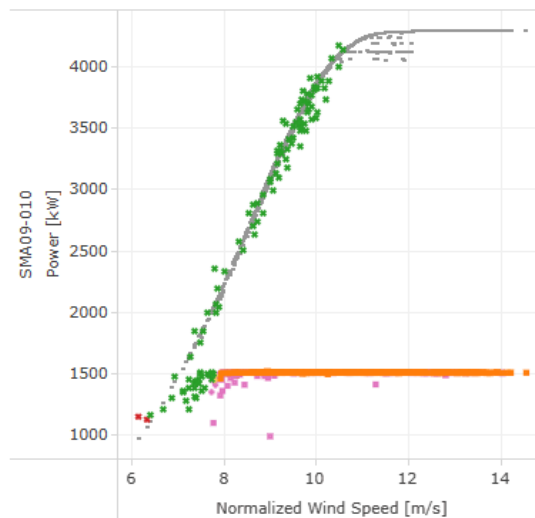
Figura 14 - Análise de carregamento das pás para turbina SMA09-010 em verde



Fonte: elaborado pelo autor.

E na Figura 15, é possível comprovar que de fato a máquina está com uma grande limitação

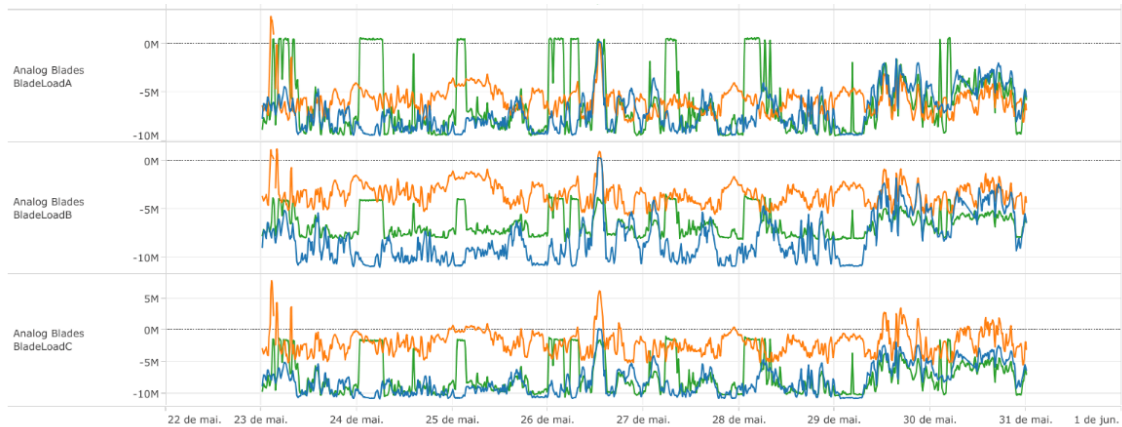
Figura 15 - Análise da curva de potência para turbina SMA09-010



Fonte: elaborado pelo autor.

No caso da Figura 16 e da Figura 18, pode-se observar a limitação, mas não uma anomalia tão clara para as variáveis.

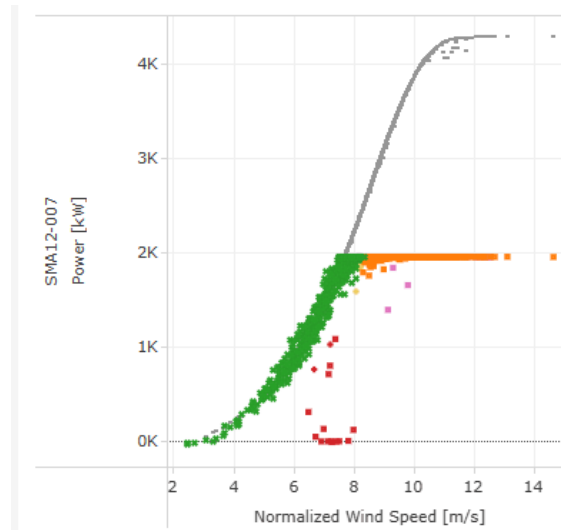
Figura 16 - Análise de carregamento das pás para turbina SMA12-007



Fonte: elaborado pelo autor.

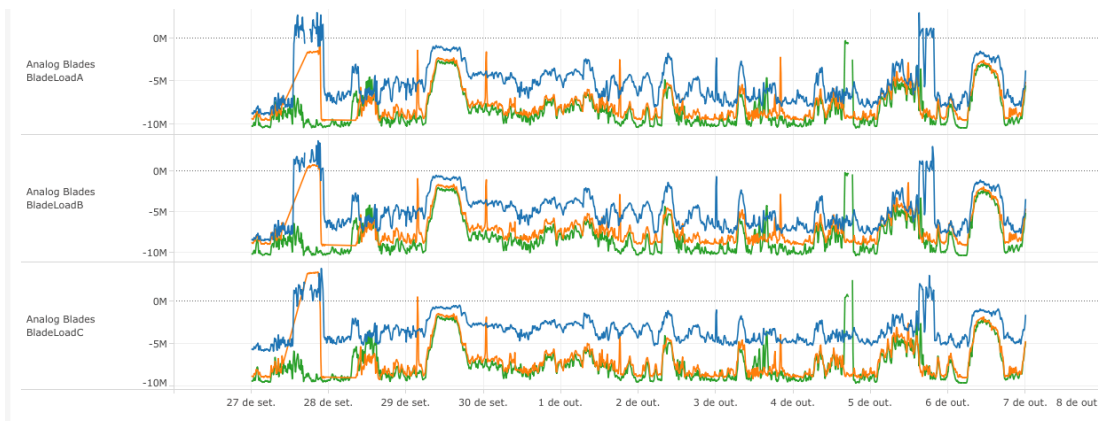
Ainda assim, é possível ver de forma clara a limitação da SMA12-007 e SMA01-001 para a Figura 17 e 19. A limitação na curva de potência se dá a algo não esperado na turbina, nesse caso em específico é limitações forçadas por troca de grandes componentes.

FIGURA 17 - Análise da curva de potência para turbina SMA12-007



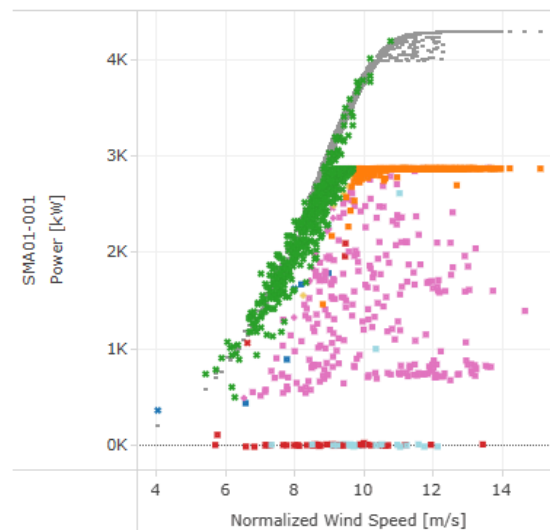
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 18 - Análise de carregamento das pás para turbina SMA01-001



Fonte: elaborado pelo autor.

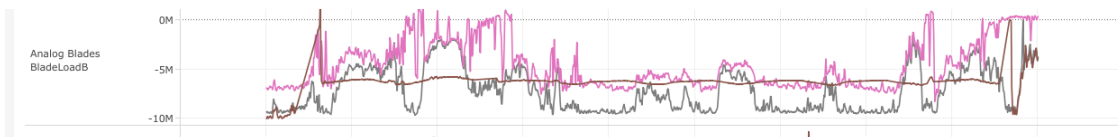
Figura 19 - Análise da curva de potência para turbina SMA01-001



Fonte: elaborado pelo autor.

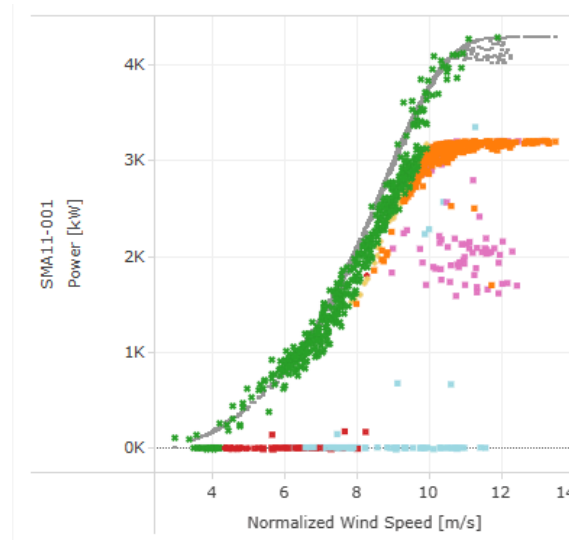
Já considerando a turbina SMA11-001 e SMA11-005, é possível ver o comportamento anômalo do carregamento da pá B e A, respectivamente na Figura 20 e 22 e a limitação equivalente a isso na Figura 21 e 23. Para os casos que as limitações acontecem porém não observa-se os impactos nos carregamentos de pás representa que há outra razão por parada que será estudada na sequência.

Figura 20 - Análise de carregamento das pás para turbina SMA11-001



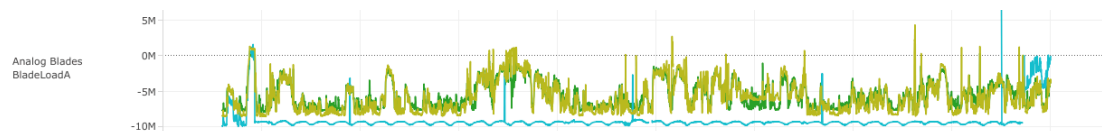
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 21 - Análise da curva de potência para turbina SMA01-001



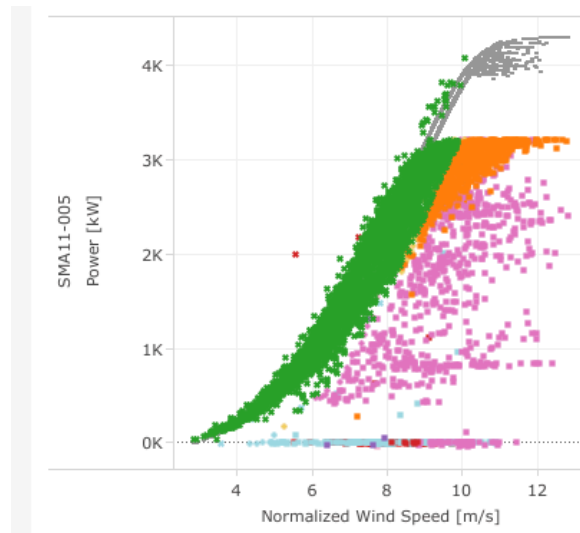
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 22 - Análise de carregamento das pás para turbina SMA11-005



Fonte: elaborado pelo autor.

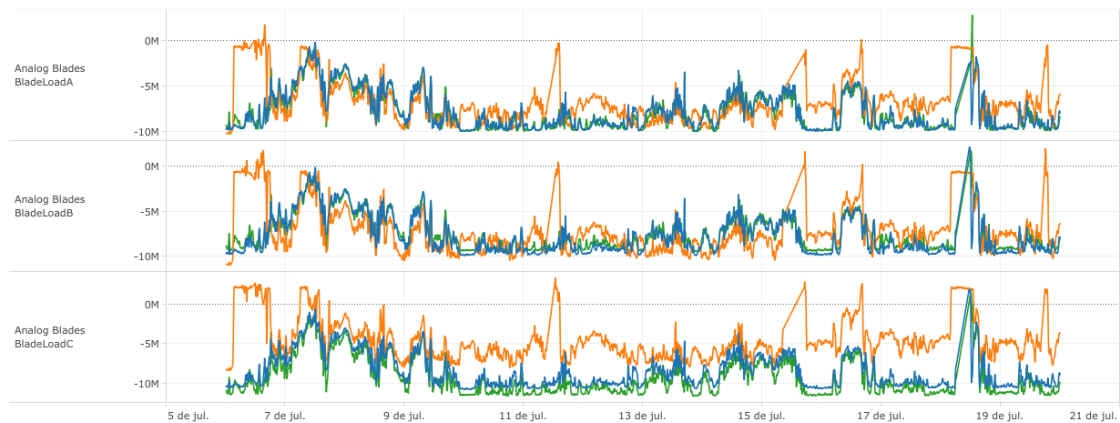
Figura 23 - Análise da curva de potência para turbina SMA11-005



Fonte: elaborado pelo autor.

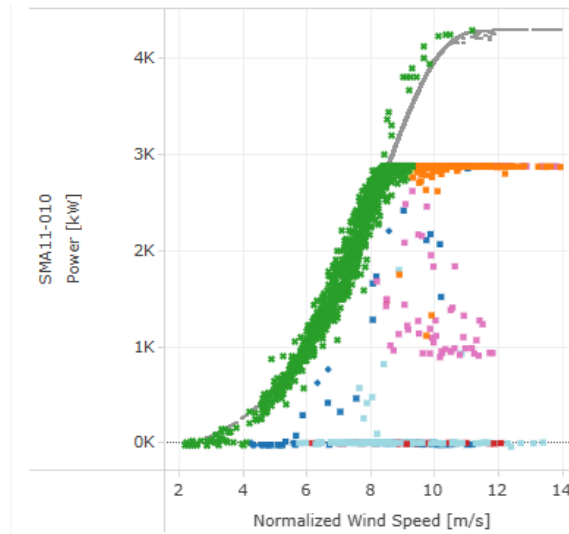
Já para a SMA11-010 também é possível ver a limitação na Figura 24, porém, diferente das anteriores, apesar de a pá C estar mais elevada em relação às vizinhas, não está tão claro para se concluir a relação direta na Figura 25.

Figura 24 - Análise de carregamento das pás para turbina SMA11-010



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 25 - Análise da curva de potência para turbina SMA11-010



Fonte: elaborado pelo autor.

Foram selecionados oito casos que foram mostrados anteriormente das seguintes máquinas (SMA12-009, SMA09-010, SMA12-007, SMA11-010, SMA11-001, SMA11-005, SMA01-001) que apresentaram limitações significativas, sendo três deles diretamente relacionados a problemas de carregamentos das pás. Esses casos foram escolhidos com base na frequência de anomalias e no impacto observado na performance das máquinas. A Tabela 2 apresenta as 20 variáveis mais relevantes identificadas durante a análise preliminar, com destaque em verde para as que apresentaram maior frequência de anomalias e que foram mostradas anteriormente.

Tabela 2: Variáveis mais relevantes identificadas na análise preliminar

Turbina	Ano-Mês	Contagem parcial	Anomalia carregamento A	Anomalia carregamento B	Anomalia carregamento C
SMA14-006	2024-12	2124	21	21	373
SMA14-006	2024-11	1962	11	25	115
SMA12-009	2023-07	1951	2505	3135	1488
SMA12-009	2023-06	1422	3188	3371	654
SJA23-008	2024-07	934	106	42	26
SMA09-010	2023-06	924	1854	1938	1628
SMA09-010	2023-07	658	890	963	756
SMA12-007	2024-05	584	600	1080	1195
SMA09-010	2024-08	560	1550	1560	1534
SMA14-006	2024-10	538	4	18	25
SMA10-001	2024-07	505	4	304	73
SMA11-005	2024-11	437	4	12	32
SMA11-010	2023-07	388	129	38	366
SMA14-003	2023-05	358	71	136	45
SMA11-001	2023-10	315	11	116	62
SMA11-005	2024-12	306	20	4	13
SMA13-016	2024-10	285	7	34	29
SMA13-013	2023-10	264	4	216	149
SMA01-001	2024-09	260	203	292	420
SMA13-002	2024-11	236	298	108	202

Fonte: elaborado pelo autor.

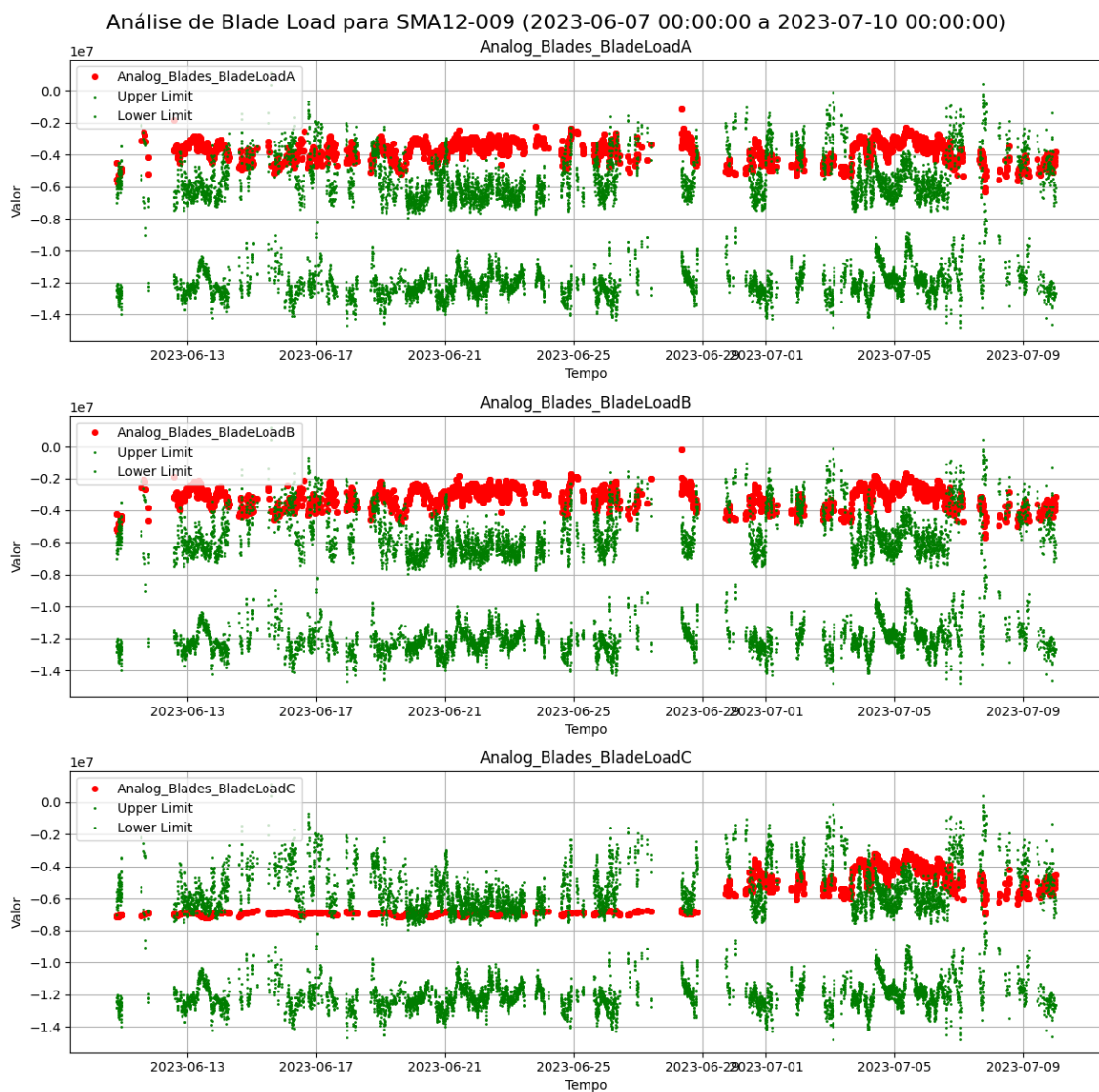
5.3 Análise das Variáveis de Carregamento das pás

Nesta Seção, são apresentados os resultados detalhados das variáveis de carregamento das pás para as máquinas selecionadas. A análise foi realizada utilizando dados brutos (*raw_10min*) e informações de anomalias (*anomaly_detection*), com o objetivo de identificar padrões de comportamento e correlacioná-los com as limitações observadas.

5.3.1 Comportamento das Variáveis

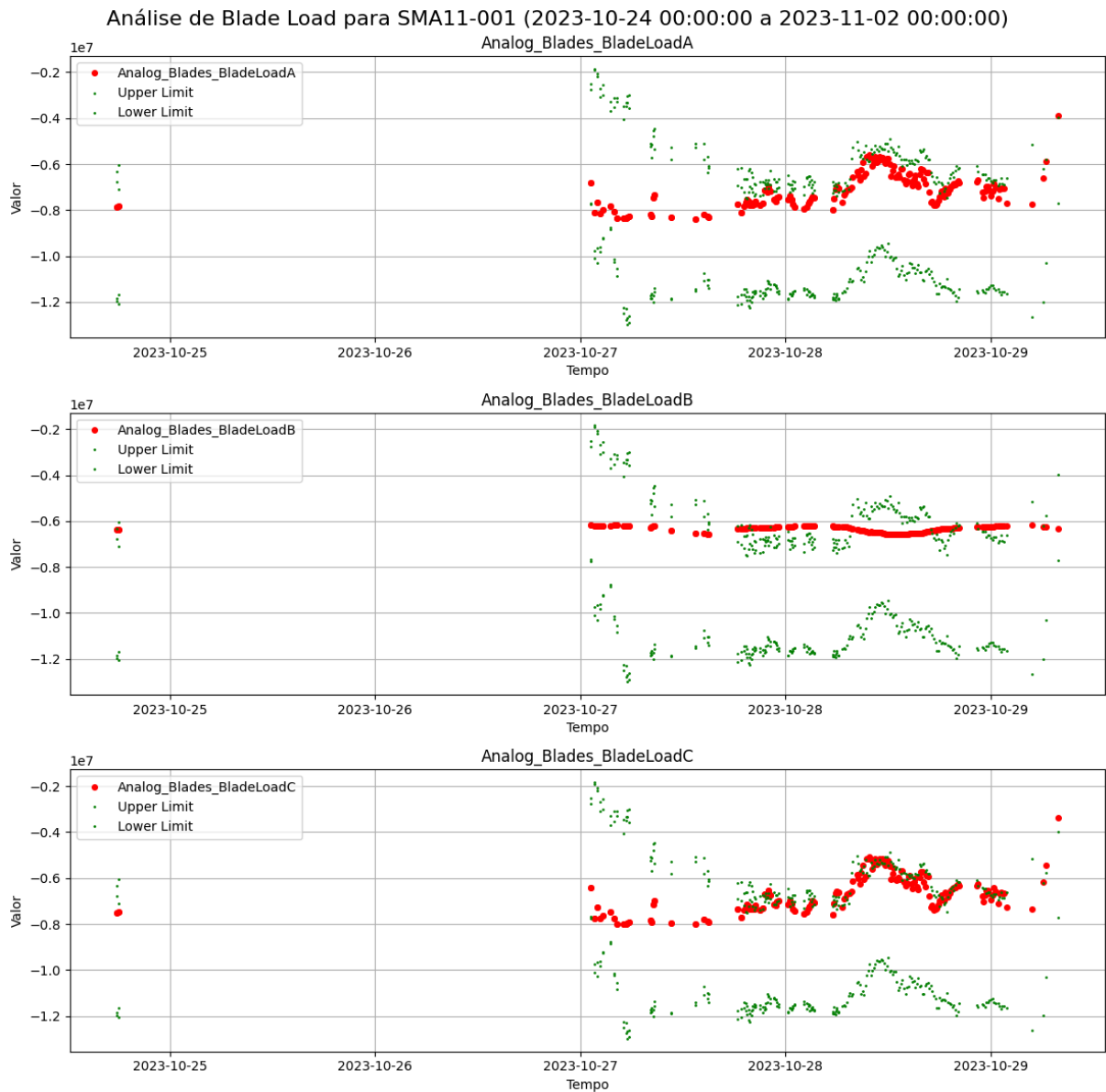
Foram elaborados gráficos de séries temporais para cada máquina, mostrando o valor das variáveis de carregamento ao longo do tempo, juntamente com os limites superiores e inferiores. Esses gráficos permitiram identificar momentos em que as variáveis estavam fora dos limites esperados ou estão com comportamento constante, que pode indicar também uma anomalia. Em verde são os pontos de limite superior e inferior esperado e em vermelho os pontos da variável de carregamento de pá. O Gráfico 1, 2 e 3 ilustra o comportamento das variáveis de carregamento para a máquina SMA12-009, SMA11-001 e SMA11-005 respectivamente.

Gráfico 1: Comportamento das Variáveis de Carregamento das pás (SMA12-009)



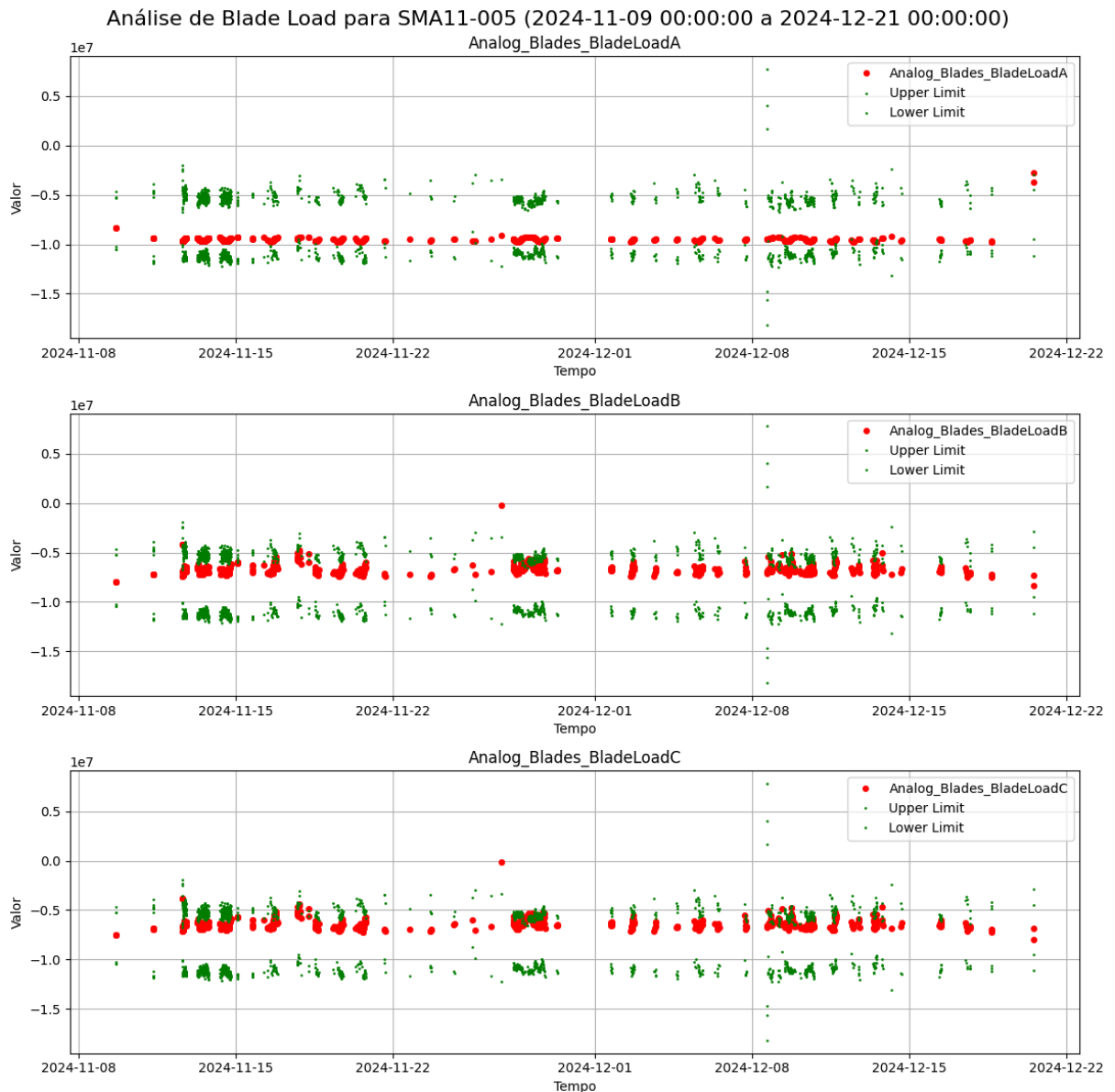
Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 2: Comportamento das Variáveis de Carregamento das pás (SMA11-001)



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 3: Comportamento das Variáveis de Carregamento das pás (SMA11-005)



Fonte: elaborado pelo autor.

5.3.2 Relação do carregamento das pás e limitações

Os resultados indicam que as anomalias nas variáveis de carregamento estão diretamente relacionadas às limitações de desempenho observadas. Em particular, as máquinas SMA12-009, SMA11-001 e SMA11-005 apresentaram frequências significativas de anomalias, resultando em perdas energéticas consideráveis. Esses achados reforçam a importância do monitoramento contínuo e da detecção precoce de problemas para evitar perdas energéticas e financeiras.

Além das limitações diretamente relacionadas ao carregamento das pás, foi observado que mesmo as máquinas limitadas por outros motivos (ou por limitação forçada) apresentaram alterações significativas no comportamento do carregamento das pás em comparação com suas vizinhas. Essa reciprocidade pode ser explicada pela interação dinâmica entre as variáveis operacionais e as condições ambientais, que afetam o equilíbrio mecânico e aerodinâmico das pás.

Durante os períodos de limitação forçada (ou por outros motivos), foi observado que o carregamento das pás das máquinas afetadas tende a se deslocar em relação às máquinas vizinhas. Esse deslocamento pode ser atribuído a fatores como a redução da Carga Operacional: Quando uma máquina é limitada, a carga operacional é reduzida, o que pode alterar o equilíbrio mecânico das pás, ou desbalanceamento dinâmico já que limitações prolongadas podem levar a desbalanceamentos dinâmicos, que se refletem no carregamento das pás.

Esses resultados indicam que, mesmo quando as limitações não são diretamente causadas por problemas de carregamento das pás, observa-se alterações significativas no comportamento dessas variáveis. Essa reciprocidade reforça a importância de uma abordagem não tão simplista para o monitoramento e a manutenção dos aerogeradores, visto que pelo fato de ser um sistema complexo, é preciso analisar como um todo considerando não apenas as variáveis diretamente relacionadas às limitações, mas também suas interações com todo o sistema.

5.3.3 Intervenções reportadas pela equipe de campo das máquinas analisadas

Uma vez que essas máquinas foram selecionadas para uma análise mais profunda, houve uma pesquisa através de informações da equipe de campo e recolhida informações de eventos de manutenção ocorridos, analisando suas causas e impactos no desempenho dos aerogeradores. As intervenções realizadas no parque são descritas para fornecer uma visão abrangente das ações corretivas empregadas na mitigação desses problemas.

Dentre os aerogeradores analisados, três apresentaram limitações de geração devido ao carregamento das pás. Essa condição foi registrada para as turbinas SMA12-009, SMA11-001 e SMA11-005, que passaram por intervenções para correção de falhas relacionadas ao sistema de sensores de carga das pás e seus circuitos de alimentação.

O aerogerador SMA12-009 apresentou limitação entre 07/06/2023 e 10/07/2023, sendo necessário realizar um check de performance no sistema de *pitch*, onde foram checadas a calibração das pás e a suspensão dos cilindros de *pitch*. Após a intervenção, a máquina foi colocada novamente em operação, sem evidência de discrepâncias no funcionamento do sistema.

A turbina SMA11-001, por sua vez, permaneceu limitada de 24/10/2023 a 02/11/2023, sendo identificada como causa do problema a necessidade de substituição do sensor de carga da pá B, o que permitiu a normalização da operação da turbina.

Já a máquina SMA11-005 apresentou um caso mais complexo de limitação devido ao carregamento das pás, ocorrendo entre 09/11/2024 e 21/12/2024. Foram realizadas diversas intervenções, incluindo a correção de mau contato nos cabos de alimentação dos sensores de carga das pás, substituição dos cabos do sensor de carregamento de pá, testes de performance no sistema dos sensores e, posteriormente, a substituição do sensor de carregamento de pá A, resolvendo o problema. Isso mostra a complexidade desse tipo de falha e a importância de um monitoramento contínuo dos sensores de carga das pás.

5.3.4 Outras Limitações de Geração Identificadas

Além dos aerogeradores que apresentaram limitação devido ao carregamento das pás, foram registradas outras ocorrências que afetaram a geração de eletricidade no parque, relacionadas a componentes mecânicos e elétricos:

- SMA09-010 (10/06/2023 - 17/07/2023)

A máquina passou por uma substituição do *main bearing*, componente essencial para a rotação do rotor e diretamente relacionado à estabilidade mecânica do aerogerador. A falha nesse componente pode gerar vibrações excessivas e afetar o desempenho do sistema de geração. A máquina é mantida limitada propositalmente por segurança para não gerar muito esforço nos componentes, em especial o rolamento principal, e ao mesmo tempo poder gerar algo de forma segura.

- SMA09-010 (13/08/2024 - 20/08/2024)

O aerogerador necessitou da substituição do HSS (*High-Speed Shaft*), eixo responsável pela transmissão de torque do rotor para o gerador. Danos nesse componente podem comprometer a eficiência da conversão de energia mecânica em elétrica. Da mesma

forma, essa limitação foi forçada para proteção dos componentes enquanto a equipe se planejava para a substituição.

- SMA12-007 (23/05/2024 - 31/05/2024)

A turbina passou por substituição do *Blade Bearing*, elemento fundamental na conexão entre as pás e o hub do aerogerador. Falhas nesse rolamento podem levar a desalinhamentos nas pás, comprometendo a estabilidade aerodinâmica e aumentando os esforços estruturais. Dessa forma, foi limitada a máquina para segurança até a intervenção.

- SMA01-001 (27/09/2024 - 08/10/2024)

A máquina estava limitada e durante esse processo, foi identificada a necessidade de substituição do disjuntor de 1600A, um componente crucial para a proteção elétrica da turbina. Após essa ação, a limitação foi removida e a turbina voltou à operação normal.

- SMA11-010 (06/07/2023 - 20/07/2023)

O aerogerador apresentou falha no banco de capacitores do conversor, exigindo intervenções para diagnóstico e correção. Inicialmente, foram realizadas verificações no sistema de potência, mas sem a identificação de discrepâncias significativas. Em seguida, foi feita a troca do IGBT, componente semicondutor utilizado na conversão de potência, porém a falha persistiu. Após novos testes e coletas de dados para análise da equipe de engenharia, foi constatada a necessidade de substituição do banco de capacitores das fases dos stacks do conversor, o que resultou na normalização da operação da turbina e resolvendo a limitação.

5.3.5 Análise das Informações do Parque e Estratégias de Mitigação

Os dados analisados evidenciam que as limitações de geração de eletricidade nos aerogeradores podem ser classificadas em duas principais categorias: falhas relacionadas ao carregamento das pás e falhas mecânicas/elétricas em componentes essenciais para a conversão e controle da energia gerada.

Os eventos de máquinas limitadas devido ao carregamento das pás demonstram a relevância dos sensores de carga na operação dos aerogeradores, uma vez que problemas nesses dispositivos podem levar à redução da geração de eletricidade e à necessidade de manutenção corretiva. A turbina SMA11-005 ilustra bem essa complexidade, exigindo múltiplas intervenções para diagnóstico e correção das falhas nos sensores e seus circuitos.

Por outro lado, as falhas mecânicas e elétricas também impactam significativamente a disponibilidade dos aerogeradores. Componentes como *main bearing*, *blade bearing* e eixos de alta velocidade (HSS) estão diretamente relacionados à estabilidade estrutural e ao funcionamento eficiente da turbina. Além disso, falhas nos bancos de capacitores do conversor e em circuitos elétricos podem afetar a conversão da energia gerada, levando a períodos de indisponibilidade prolongados.

A análise das intervenções realizadas no parque reforça a necessidade de estratégias eficazes de monitoramento e manutenção preditiva, evitando a recorrência de falhas e reduzindo o impacto dessas limitações na geração de eletricidade. Técnicas como análise de sensores de carregamento das pás, inspeção periódica de componentes mecânicos e elétricos, e uso de modelos de predição de falhas podem ser fundamentais para otimizar a operação dos aerogeradores e minimizar perdas.

5.4 Quantificação das Perdas Energéticas e Financeiras

Nesta Seção, são apresentados os resultados da quantificação das perdas energéticas e financeiras decorrentes das limitações identificadas nas máquinas analisadas. A análise foi realizada com base nos dados de desempenho extraídos do sistema *wtg_performance*, com foco nas variáveis *Terminal_PotAt* (potência ativa no terminal) e *Lost_KW_contratual* (diferença entre o kW potencial e o gerado). Essas variáveis permitiram calcular as perdas energéticas e, consequentemente, o impacto financeiro causado pelas limitações operacionais.

5.4.1 Cálculo das Perdas

Para quantificar as perdas energéticas, foram utilizadas as informações de potencial no período e a potência ativa no terminal do aerogerador. Dessa forma, o potencial menos o gerado representa a perda, porém, nesse cálculo foi considerado apenas a perda contratual, que não considera casos de perdas por limitações solicitadas pela ONS, ou perdas devido ao *Wind Sector Management*, que é uma estratégia de controle que pode impor restrições operacionais a determinados aerogeradores para otimizar o desempenho global do parque eólico, ou seja, contratualmente falando, não se é considerado perda, pois é uma parada devido a condições climáticas. Dessa forma o que é considerado de fato são as perdas relacionadas às limitações causadas pelo carregamento das pás, que é o verdadeiro interesse.

A perda de energia foi calculada com base na diferença entre a geração de eletricidade e a potência contratual, utilizando a fórmula:

$$\text{Perda de Energia (kWh)} = \text{Sum}(\text{Lost_KW_contratual (kW)}) / 6$$

Lost_KW_contratual representa a diferença entre a geração de eletricidade e a potência contratual, medida em kW. E sum, representa a soma de cada timestamp desses valores. E como cada intervalo é de 10 minutos, é preciso dividir por 6 para se ter a informação de energia em kWh.

Para a presente análise, será considerado um valor médio de R\$300/MWh como referência para a avaliação das perdas energéticas. Esse valor foi escolhido com base nas projeções do mercado regulado, onde o custo médio da energia e potência comercializadas no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) para 2025 foi fixado em R\$ 307,29/MWh, conforme despacho da ANEEL (MEGAWHAT, 2024). Além disso, estimativas apontam que o preço médio dos contratos de compra de energia das distribuidoras pode alcançar aproximadamente R\$270/MWh em 2025, indicando um crescimento de 9% em relação ao ano anterior (MEGAWHAT, 2024). Dessa forma, o valor de R\$300/MWh representa uma média aproximada entre essas referências, proporcionando uma estimativa coerente para a análise financeira das perdas energéticas.

Dessa forma, o valor da perda de energia em reais pode ser calculado da seguinte forma:

$$\text{Valor da perda (R\$)} = \text{Perda de Energia (kWh)} * \text{Preço médio (R\$/MWh)} / 1000$$

Onde o valor da Perda de Energia é multiplicado pelo preço médio da energia e dividido por mil para se preservar a unidade da relação de kWh e MWh.

5.4.2 Resultados

A Tabela 3 apresenta os resultados da quantificação das perdas energéticas e financeiras para as máquinas selecionadas. Os valores foram calculados para cada máquina, considerando o período de limitação e a perda de energia acumulada.

Tabela 3 - Valores de Perda Energética, Monetária e dias com limitação.

Turbina	Duração da limitação (Dias)	Perda Energética (kWh)	Perda Monetária
SMA12-009	33	1,13E+06	R\$338.484,44
SMA11-001	9	8,70E+04	R\$26.097,38
SMA11-005	42	2,57E+05	R\$77.223,77

Fonte: elaborado pelo autor.

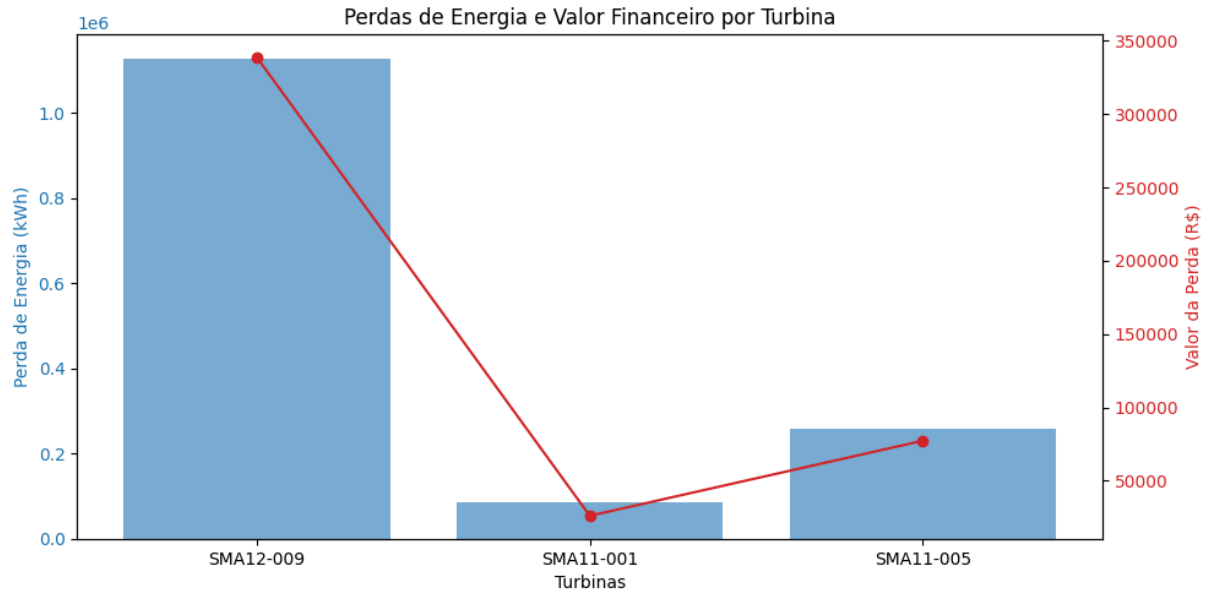
Observa-se que a máquina SMA12-009 apresentou a maior perda total de energia, com 1130 MWh, resultando em um prejuízo financeiro de R\$338.484,44. As máquinas SMA11-001 e SMA11-005 também apresentaram perdas significativas, com 87 MWh e 257 MWh, respectivamente.

Apesar da turbina SMA12-009 ter tido menos tempo de parada que a SMA11-005, ela teve uma perda bem maior pois sua limitação da primeira foi bem abaixo da limitação segunda, aumentando assim as perdas. Observa-se isso também na própria curva de potência mostrada anteriormente na Figura 11.

5.4.3 Visualização dos Dados

Para facilitar a interpretação dos resultados, foram gerados gráficos que ilustram as perdas energéticas e financeiras, bem como o tempo de resolução dos problemas para cada máquina.

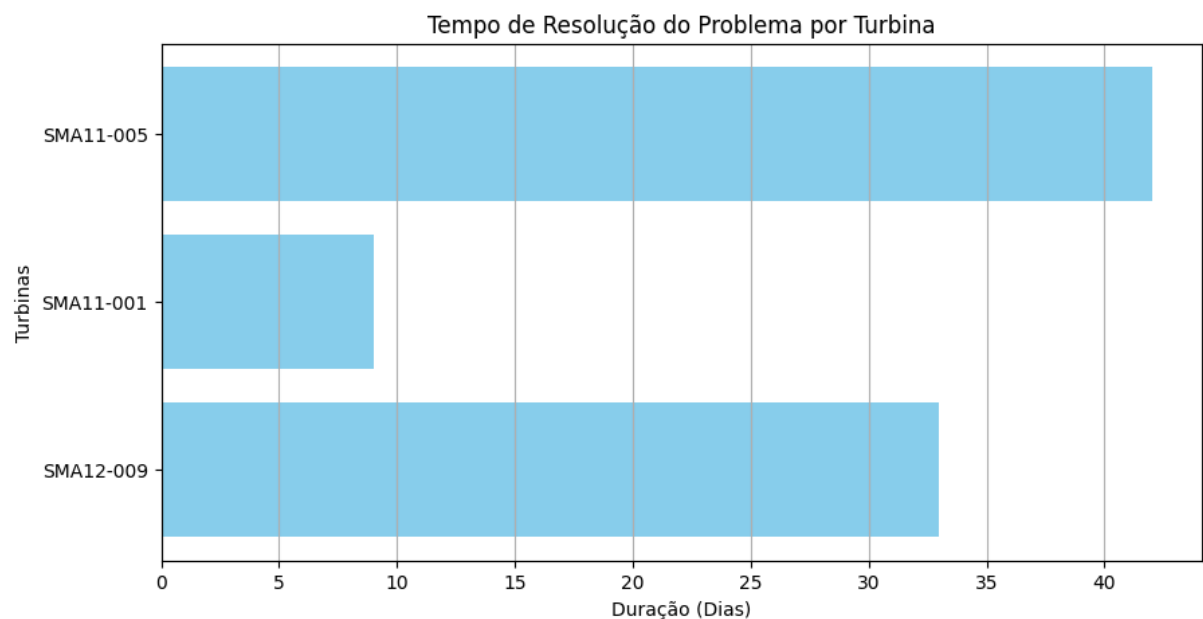
Gráfico 4: Perdas de Energia e Valor Financeiro por Turbina



Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico de barras mostra a perda de energia (kWh) e o valor financeiro (R\$) para cada máquina. As barras azuis representam a perda de energia, enquanto a linha vermelha indica o valor monetário da perda. Dando pra observar o destaque que há na SMA12-009 como um grande impacto energético e econômico.

Gráfico 5: Tempo de Resolução do Problema por Turbina



Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico de barras horizontais mostra o tempo de resolução (em dias) para cada máquina. Mostrando que a maior demora de resolução foi para a SMA11-005 e em seguida para a SMA12-009.

5.4.4 Análises feitas

Os resultados mostram que as perdas energéticas e financeiras variam significativamente entre as máquinas analisadas. A máquina SMA12-009 destacou-se como a mais crítica. Esse cenário reforça a necessidade de ações corretivas e preventivas para mitigar os impactos das limitações operacionais.

Além disso, a análise do tempo de resolução dos problemas revelou que, em alguns casos, as limitações persistiram por períodos prolongados, agravando as perdas energéticas e financeiras. Por exemplo, a máquina SMA11-005 teve um tempo de resolução de 42 dias, o que pode estar relacionado à complexidade do problema ou à disponibilidade de recursos para manutenção.

Esses achados destacam a importância de monitoramentos contínuos, podendo implementar sistemas de monitoramento em tempo real para detectar limitações de forma precoce. Utilizar dados históricos e técnicas de análise preditiva para antecipar problemas e reduzir o tempo de resolução para manutenções preditivas. Em resumo, a quantificação das perdas energéticas e financeiras fornece uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas, visando aumentar a eficiência operacional e reduzir os custos associados às limitações dos aerogeradores.

5.5 Propostas de Melhorias e Soluções

Com base nos resultados obtidos e na análise das limitações de geração dos aerogeradores, é evidente a necessidade de aprimoramento das estratégias de monitoramento, manutenção e operação. As falhas identificadas, tanto relacionadas ao carregamento das pás quanto a componentes mecânicos e elétricos, indicam que um modelo de gestão proativo e baseado em dados pode contribuir significativamente para reduzir a indisponibilidade das máquinas, otimizar o desempenho e minimizar custos operacionais.

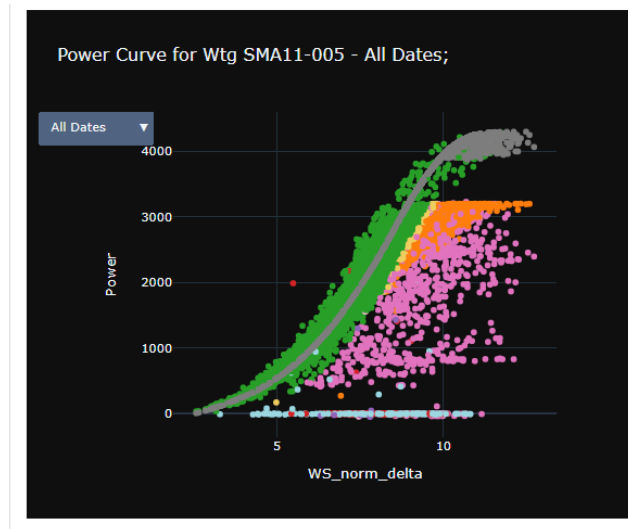
5.5.1 Técnicas de Detecção de anomalias

A detecção precoce de falhas é essencial para evitar que problemas menores evoluam para falhas críticas que demandam paradas prolongadas da máquina. Para isso, a Casa dos Ventos desenvolve internamente diversas ferramentas e modelos de detecção de anomalias que podem ser aplicados aos dados coletados pelos sensores das turbinas. Esses dados podem ser usados para acompanhar e selecionar variáveis mais críticas que possuem um impacto na geração, como foi estudado o caso dos carregamentos das pás ou outros grandes componentes.

Com o maior uso dessas técnicas de detecção, espera-se um aumento na confiabilidade das máquinas e uma redução no tempo de resposta às falhas, permitindo que medidas corretivas sejam aplicadas antes que as limitações impactem significativamente a geração de eletricidade.

Para aprimorar o monitoramento e a detecção de falhas nos aerogeradores, foi desenvolvida uma ferramenta *web* baseada no *framework Django*, que integra técnicas avançadas de detecção de anomalias para análise de dados operacionais em tempo real. Essa aplicação coleta e processa informações dos sensores instalados nas turbinas, incluindo os sensores de carregamento das pás, permitindo identificar padrões de funcionamento anômalos que possam indicar limitações operacionais, falhas incipientes ou degradação dos componentes. A ferramenta utiliza algoritmos de aprendizado de máquina Autoencoders, para detectar variações incomuns no comportamento das turbinas, correlacionando esses eventos com dados históricos e dando uma visualização mais fácil e concentrada dos possíveis motivos de perda energética. Essa abordagem facilita a identificação de turbinas que não operam em sua capacidade máxima, mesmo em condições favoráveis de vento, fornecendo uma reação mais assertiva para mitigar perdas e otimizar a eficiência do parque eólico. Nessa ferramenta, a ideia é pegar as turbinas com maior número de performance parcial (OG-PPI), utilizando essa ferramenta para os períodos das 3 variáveis de carregamento de pás desse estudo, foi possível ver que de fato elas estavam com perdas relevantes. A seguir as Figuras 26, 27 e 28 representam as turbinas analisadas e pode-se ver nas Figuras que as variáveis indicadas como anômalas aparecem o carregamento de pás (*Blade_Load*).

Figura 26 - Ferramenta de análise de performance parcial SMA11-005



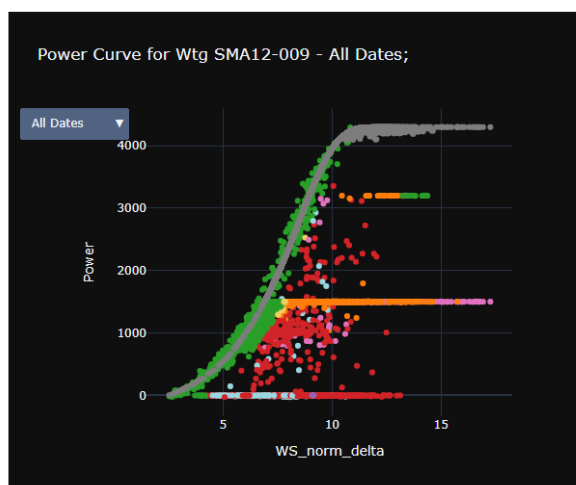
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 27 - Ferramenta de análise de performance parcial SMA11-001



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 28 - Ferramenta de análise de performance parcial SMA12-009



Fonte: elaborado pelo autor.

5.5.2 Monitoramento Contínuo e Criação de Dashboards

Atualmente, a detecção e a análise das falhas dependem, em grande parte, da observação manual de relatórios e registros de operação. Para tornar esse processo mais eficiente e intuitivo, propõe-se a criação de *dashboards* interativos e automatizados, que consolidem os dados dos aerogeradores e forneçam noção em tempo real sobre o estado das máquinas. Assim como foram os casos de alguns *Dashboards* usados neste estudo. Porém a necessidade de melhoria contínua sempre é vigente.

Além disso, é de grande importância que as equipes de campo tenham acesso e entendimento sobre essas ferramentas de auxílio, uma vez que por eles estarem no contato mais próximos da operação e manutenção eles tenham o apoio para uma resposta mais rápida e assertiva aos possíveis problemas, sempre visando uma melhor disponibilidade para as turbinas.

5.5.3 Adoção de Práticas de Manutenção Preditiva

No parque de estudo há manutenções preditivas e isso representa uma abordagem avançada para reduzir custos de manutenção e aumentar a disponibilidade das turbinas, pois permite antecipar falhas com base em dados operacionais e planejar intervenções antes que ocorram paradas não programadas. Essas manutenções são feitas anualmente sempre tentando ser alocadas em períodos de baixo vento para otimizar ao máximo a geração. Mesmo que seja necessário a parada da máquina para a manutenção anual, ainda assim se há um retorno

positivo por aumentar a vida útil de equipamentos e reduzir a ocorrência de paradas devido a problemas nas máquinas.

5.6 Estratégias adotadas

As propostas apresentadas visam reduzir significativamente as limitações operacionais dos aerogeradores, aumentar a confiabilidade dos sistemas e melhorar a eficiência da geração de eletricidade. A combinação de detecção precoce de falhas, monitoramento contínuo, manutenção preditiva, treinamento da equipe e simulações avançadas pode proporcionar um salto qualitativo na gestão dos parques eólicos, garantindo uma operação mais segura, confiável e rentável.

Dessa forma, espera-se que essas estratégias contribuam para a diminuição do tempo de inatividade das máquinas, redução dos custos com manutenção corretiva e melhoria da eficiência operacional dos aerogeradores analisados. Além disso, a aplicação dessas melhorias pode servir como modelo para a otimização de parques eólicos em larga escala, auxiliando na evolução tecnológica do setor de energias renováveis.

Também é importante pontuar que com o retorno de experiência e possíveis estudos de caso com dados históricos dos parques é possível se tirar diversos aprendizados, dentre eles entender alguns casos e variáveis que são de grande importância para se manter uma boa performance na geração. Sempre em busca de uma melhoria e desenvolvimento constante, tanto de aprendizados, quanto de ferramentas e *dashboards*.

6 CONCLUSÃO

A crescente demanda por fontes de energia renováveis tem impulsionado a expansão da energia eólica no Brasil e no mundo, destacando-se como uma alternativa sustentável e eficiente. No entanto, para garantir a máxima eficiência dos aerogeradores e reduzir perdas energéticas e financeiras, é essencial aprimorar as estratégias de monitoramento e manutenção desses equipamentos. Este estudo analisou o impacto do carregamento das pás na performance dos aerogeradores em um parque eólico localizado no Rio Grande do Norte, com o objetivo de identificar anomalias nos sensores de carregamento, quantificar as perdas energéticas e financeiras associadas e propor soluções para otimizar a operação dos aerogeradores.

Os resultados obtidos demonstraram que três aerogeradores apresentaram limitações operacionais significativas devido a anomalias nos sensores de carregamento das pás, resultando em perdas energéticas expressivas, totalizando aproximadamente 1.636,38 MWh e um prejuízo financeiro estimado em R\$490.913,00. A análise indicou que essas limitações ocorrem devido a falhas nos sensores de carga, desbalanceamentos no sistema de *pitch* e desgastes estruturais, o que reforça a necessidade de um monitoramento mais preciso e contínuo das variáveis operacionais. Além disso, verificou-se que, mesmo para turbinas que não apresentaram limitação direta por carregamento das pás, houve variações no comportamento dessas variáveis em relação às turbinas vizinhas, evidenciando a complexidade dos impactos operacionais e estruturais no desempenho dos aerogeradores.

Diante dessas constatações, este estudo propõe uma série de recomendações para mitigar as limitações identificadas e otimizar a operação dos aerogeradores. A primeira recomendação envolve o aprimoramento das técnicas de detecção de anomalias, utilizando modelos de aprendizado de máquina, como Autoencoders, para identificar falhas nos sensores de carregamento das pás com maior precisão. O desenvolvimento de *dashboards* interativos é outra proposta relevante, permitindo um monitoramento mais intuitivo e acessível para a equipe de Operação e Manutenção (O&M), facilitando a tomada de decisões estratégicas para minimizar perdas e antecipar falhas.

Além disso, destaca-se a adoção de práticas de manutenção preditiva, que, ao invés de intervenções corretivas baseadas em falhas, busca identificar padrões operacionais que indicam possíveis problemas futuros, permitindo ações preventivas para reduzir o tempo de inatividade das turbinas. A integração entre os dados operacionais coletados pelo sistema

SCADA e técnicas de modelagem computacional avançada pode contribuir para aprimorar essa abordagem e evitar paralisações inesperadas.

Outro aspecto fundamental é a capacitação da equipe técnica para interpretar corretamente os dados operacionais e compreender os impactos do carregamento das pás na performance dos aerogeradores. O conhecimento aprofundado sobre os padrões operacionais e anomalias pode resultar em diagnósticos mais rápidos e eficientes, reduzindo os tempos de resposta a falhas e garantindo maior disponibilidade das turbinas.

Por fim, recomenda-se o aperfeiçoamento dos sensores de carregamento das pás e sua calibração periódica, uma vez que falhas nesses dispositivos podem levar à limitação de geração e a um impacto financeiro considerável. A implementação de uma rotina de testes e verificações desses sensores pode minimizar os desvios e garantir que a resposta da turbina às cargas aplicadas seja mais precisa, evitando acionamentos indevidos dos sistemas de proteção.

Este estudo contribui significativamente para a otimização da operação de aerogeradores em parques eólicos, oferecendo um diagnóstico detalhado dos impactos do carregamento das pás na performance das turbinas e propondo soluções que podem ser implementadas para reduzir perdas energéticas e financeiras. No entanto, algumas limitações foram identificadas, como a necessidade de validação experimental das estratégias sugeridas em um ambiente operacional real e a possibilidade de ampliar a análise para outros parques eólicos com características distintas.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação das técnicas propostas em diferentes tipos de aerogeradores e locais, a fim de verificar a generalização dos resultados obtidos. Além disso, estudos mais aprofundados sobre a correlação entre carregamento das pás e variáveis ambientais, como turbulência atmosférica e condições de vento, podem fornecer insights adicionais para o desenvolvimento de modelos mais robustos de manutenção preditiva. A implementação de algoritmos avançados de inteligência artificial para análise de dados SCADA e a integração com sistemas de automação também são caminhos promissores para aprimorar a eficiência da geração eólicoelétrica.

Conclui-se, portanto, que a otimização do monitoramento e da manutenção dos aerogeradores é fundamental para garantir a máxima eficiência da geração de eletricidade, reduzindo custos operacionais e promovendo maior confiabilidade do sistema. A aplicação das estratégias propostas neste estudo pode não apenas beneficiar a empresa analisada, mas também contribuir para o avanço do setor de energia renovável como um todo, impulsionando a transição energética para um futuro mais sustentável.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA – ABEEólica. *Panorama da energia eólica no Brasil: relatório anual de 2023*. São Paulo: ABEEólica, 2023. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 8 dez. 2024.
- BARBOSA, E. T. I.; et al. *Uma revisão preliminar dos efeitos turbulentos de vento nos desvios de geração em turbinas eólicas*. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 12, n. 2, p. 55-72, 2022.
- CARDOSO, Nuno Filipe Lima. *Metodologias de avaliação do desempenho de parques eólicos*. 202X. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade de Porto, Porto, 2011.
- CHEN, J.; et al. *Study on composite bend-twist coupled wind turbine blade for passive load mitigation*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 184, p. 78-91, 2019.
- DAI, J.; et al. *Progress and challenges on blade load research of large-scale wind turbines*. Renewable Energy, v. 184, p. 45-58, 2022.
- KINI, K. R.; et al. *Enhancing wind turbine performance: statistical detection of sensor faults based on improved dynamic independent component analysis*. Energy Reports, v. 9, p. 123-137, 2023.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. *Wind energy explained: theory, design and application*. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2009.
- MEGAWHAT. *Custo médio de energia e potência para 2025 será de R\$ 307,29/MWh*. 2024. Disponível em: <https://megawhat.energy/destaques-do-diario/custo-medio-de-energia-e-potencia-para-2025-sera-de-r-30729-mwh/>. Acesso em: 21 fev. 2025.
- MEGAWHAT. *Preço médio de energia do mercado cativo deve subir 9% em 2025*. 2024. Disponível em: <https://megawhat.energy/distribuicao/preco-medio-de-energia-do-mercado-cativo-deve-subir-9-em-2025/>. Acesso em: 21 fev. 2025.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. *Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará*. Fortaleza: Biblioteca Universitária, 2013. Disponível em: <https://biblioteca.ufc.br/wp-content/uploads/2019/10/guia-de-citacao-06.10.2019.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ – UFC. *Guia de normalização de trabalhos acadêmicos*. 6. ed. Fortaleza: Biblioteca Universitária da UFC, 2022. Disponível em: <https://biblioteca.ufc.br/wp-content/uploads/2022/05/guianormalizacaotrabalhosacademicos-17.05.2022.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- WINDBOX. *Componentes dos aerogeradores*. Disponível em: <https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>. Acesso em: 24 fev. 2025.

XIAO, Y.; et al. *Load reduction and mechanism analysis of cyclic pitch regulation on wind turbine pás under yaw conditions*. Applied Energy, v. 305, p. 114856, 2024.