



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO
Campus Garanhuns
Bacharelado em Engenharia Elétrica

MARIANA EDUARDA FERREIRA XAVIER

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE AEROGERADORES ATRAVÉS
DO ESTUDO DAS CURVAS DE POTÊNCIA**

GARANHUNS/PE

2022

MARIANA EDUARDA FERREIRA XAVIER

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE AEROGERADORES ATRAVÉS
DO ESTUDO DAS CURVAS DE POTÊNCIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação de Bacharelado em Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Ciência e
Tecnologia de Pernambuco, como requisito
para obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Diego Soares Lopes

GARANHUNS/PE

2022

X3a Xavier, Mariana Eduarda Ferreira.
Análise comparativa do desempenho de aerogeradores através
do estudo das curvas de potência / Mariana Eduarda Ferreira Xavier ;
orientador Diego Soares Lopes, 2022.
88 f. : il.

Orientador: Diego Soares Lopes.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de
Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus
Garanhuns. Coordenação do Curso Superior em Engenharia. Curso de
Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2022.

1. Energia eólica – Análise - Bahia. 2. Energia – Fontes alternativas.
3. Falhas de energia elétrica. 4. Sistemas de energia elétrica. I. Título.

CDD 621.45

Riane Melo de Freitas Alves –CRB4/1897

MARIANA EDUARDA FERREIRA XAVIER

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE AEROGERADORES ATRAVÉS
DO ESTUDO DAS CURVAS DE POTÊNCIA**

Trabalho aprovado. Garanhuns, 27 de dezembro de 2022.

Professor Orientador: Prof. Dr. Diego Soares Lopes - IFPE

Avaliador Interno: Prof. Dr. Márcio Severino da Silva - IFPE

Avaliador Externo: Prof. Me. Márcio Henrique Bino da Silva - IFPB

Garanhuns

2022

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Gratidão a Deus, por me guiar em todas as circunstâncias da minha vida. A Nossa Senhora, por ser sempre a minha proteção.

Aos meus pais, José e Cicera Xavier, por todos os ensinamentos, incentivos e compreensão nos momentos de ausência, devido a dedicação necessária à trajetória acadêmica. Aos meus irmãos: Mário e Maurício e sobrinhos: José e Pedro, por todo apoio e por serem meu alicerce. Vocês são meus exemplos de vida e motivação para enfrentar os desafios.

A toda minha família, pelo incentivo e direcionamento em trilhar, com dedicação, os ramos educacionais.

Ao professor Diego Lopes, pela excelente orientação e contribuição para realização desse trabalho e ao meu desenvolvimento acadêmico.

Ao professor Wilker Azevêdo, pelos ensinamentos adquiridos durante os três anos de projetos de pesquisa e por todo incentivo acadêmico e profissional.

A minha maravilhosa turma de engenharia: Catarina, Hemilly, Brunna, Luciana, Eduarda, Janderson, João, Eduardo, Adônis, André, Rafaela, Cintia, Josias, Kalleby e Gleydson, pela amizade e contribuições na minha vida acadêmica e pessoal.

A todos os professores que fazem e que já fizeram parte do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do IFPE - Campus Garanhuns.

Ao IFPE - Campus Garanhuns, que tanto contribuiu para minha vida pessoal, acadêmica e profissional. Por ser minha segunda casa e por cuidar tão bem dos seus estudantes.

Deus honra !

RESUMO

A fonte de energia eólica apresenta uma expansão no território brasileiro, devido ao intenso potencial eólico. A partir da crescente inserção da energia eólica na matriz elétrica mundial, é possível notar alguns desafios que o setor eólico enfrenta a partir das anomalias existentes, devido à confiabilidade, vida útil de equipamentos e irregularidades nos sistemas. Diante disso, o trabalho apresenta uma análise comparativa do desempenho de aerogeradores presentes em um complexo eólico da Bahia, através do estudo das suas respectivas curvas de potência. O estudo foi realizado através da obtenção dos dados de operação dos aerogeradores, extraídos via SCADA. São apresentados resultados da comparação das curvas de potência utilizando o coeficiente de determinação, destaca-se que os meses de julho e agosto apresentou um menor coeficiente de determinação e, conseqüentemente, maiores desvios da potência de saída, decorrente dos impactos de vibração mecânica na turbina. Através do estudo da correlação entre a velocidade média do vento e desvios da curva de potência, foi possível afirmar que quanto maior a velocidade média de vento há um menor coeficiente de determinação, impactando, então, no comportamento da curva. A partir do monitoramento diário da velocidade do vento e potência gerada de um cenário crítico foi possível concluir que à medida que há um aumento intenso da velocidade do vento ocorre uma redução na capacidade de geração. Também foi analisado o desempenho dos aerogeradores através do erro entre curvas, obtendo cenários de sobreperformance e subperformance; nos casos estudados, as gerações abaixo do esperado são decorrentes da substituição da *gearbox* e evento relacionado ao sistema de freio, já para os cenários acima do esperado, ressalta-se o bom desempenho dos sistemas de controle de pás e *yaw* das máquinas. E, por fim, ao avaliar as principais anomalias do complexo, tem-se que como principais ofensores os eventos de reparo, manutenção, conversor e controle de *pitch*.

Palavras-chave: Energia Eólica. Aerogerador. Curva de potência. Anomalias.

ABSTRACT

The source of wind energy presents an expansion in the Brazilian territory, due to the intense wind potential. From the growing insertion of wind energy in the global electricity matrix, it is possible to notice some challenges that the wind sector faces from the existing anomalies, due to the reliability and useful life of equipment and irregularities in the systems. Therefore, the work presents a comparative analysis of the performance of wind turbines present in a wind complex in Bahia, through the study of their respective power curves. The study was carried out by obtaining operating data from the wind turbines, extracted via SCADA. Results of the comparison of the power curves using the determination coefficient are presented, it is highlighted that the months of July and August presented a smaller R^2 and, consequently, greater deviations of the output power, due to the impacts of mechanical vibration in the turbine. Through the study of the correlation between the average wind speed and deviations of the power curve, it was possible to state that the higher the average wind speed there is a lower coefficient of determination, thus impacting the behavior of the curve. From the daily monitoring of wind speed and generated power of a critical scenario it was possible to conclude that as there is an intense increase in wind speed, there is a reduction in generation capacity. The performance of wind turbines was also analyzed through the error between curves, obtaining overperformance and underperformance scenarios; in the cases studied, the generations below expectations are due to the replacement of the gearbox and an event related to the brake system, while for the scenarios above expectations, the good performance of the control systems for the blades and yaw of the machines is highlighted. And, finally, when evaluating the main anomalies of the complex, repair, maintenance, converter and pitch control events are the main offenders.

Keywords: Wind Energy. Wind Turbine. Power Curve. Anomalies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Velocidade média anual do vento.....	18
Figura 2 - Esquemático do aerogerador.	20
Figura 3 - Visão geral do complexo eólico.	22
Figura 4 - Área varrida pelas pás de uma turbina de eixo horizontal.	24
Figura 5 - Perfil do fluxo do vento no aerogerador.....	25
Figura 6 - Curva de potência de um aerogerador.	28
Figura 7 - Sensores indutivos para contagem de giros de um rotor de turbina eólica.	30
Figura 8 - Curva de potência real e de referência de um aerogerador.	31
Figura 9 - Ilustração dos parâmetros SQE e SQT.	35
Figura 10 - Desempenho das curvas de potência.	37
Figura 11 - Curva de potência do Aerogerador 1: setembro/20 a agosto/22.	40
Figura 12 - Curva de potência do Aerogerador 1: fevereiro.	41
Figura 13 - Curva de potência do Aerogerador 1: novembro.	42
Figura 14 - Curva de potência do Aerogerador 1: julho.....	44
Figura 15 - Curva de potência do Aerogerador 1: agosto.....	45
Figura 16 - Curva de potência do Aerogerador 2: setembro/20 a agosto/22.	46
Figura 17 - Curva de potência do Aerogerador 2: fevereiro.	47
Figura 18 - Curva de potência do Aerogerador 2: novembro.	48
Figura 19 - Curva de potência do Aerogerador 2: julho.....	50
Figura 20 - Curva de potência do Aerogerador 2: agosto.....	51
Figura 21 - Curva de potência do Aerogerador 3: setembro/20 a agosto/22.	52
Figura 22 - Curva de potência do Aerogerador 3: fevereiro.	53
Figura 23 - Curva de potência do Aerogerador 3: novembro.	54
Figura 24 - Curva de potência do Aerogerador 3: julho.....	56
Figura 25 - Curva de potência do Aerogerador 3: agosto.....	57
Figura 26 - Curva de potência do Aerogerador 4: setembro/20 a agosto/22.	58
Figura 27 - Curva de potência do Aerogerador 4: fevereiro.	60
Figura 28 - Curva de potência do Aerogerador 4: novembro.	61
Figura 29 - Curva de potência do Aerogerador 4: julho.....	62
Figura 30 - Curva de potência do Aerogerador 4: agosto.....	63
Figura 31 - Curva de potência do Aerogerador 5: setembro/20 a agosto/22.	64
Figura 32 - Curva de potência do Aerogerador 5: fevereiro.	66
Figura 33 - Curva de potência do Aerogerador 5: novembro.	67
Figura 34 - Curva de potência do Aerogerador 5: julho.....	68
Figura 35 - Curva de potência do Aerogerador 5: agosto.....	70
Figura 36 - Curva de potência do Aerogerador 11 (setembro/20 a agosto/22).	74
Figura 37 - Curva de potência do Aerogerador 12.....	76
Figura 38 - Curva de potência do Aerogerador 13.....	77
Figura 39 - Curva de potência do Aerogerador 14.....	80

Figura 40 - Curva de potência do Aerogerador 15.....	80
Figura 41 - Curva de potência do Aerogerador 16.....	81
Figura 42 - Principais Eventos do Complexo Eólico (Set/20 a Agos/22).....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características técnicas do aerogerador.	33
Tabela 2 - Principais falhas dos aerogeradores de 1 a 5 (setembro/20 a agosto/22).	39
Tabela 3 - Coeficiente de determinação mensal do Aerogerador 1.	40
Tabela 4 - Coeficiente de determinação mensal do Aerogerador 2.	46
Tabela 5 - Coeficiente de determinação mensal do Aerogerador 3.	52
Tabela 6 - Coeficiente de determinação mensal do Aerogerador 4.	58
Tabela 7 - Coeficiente de determinação mensal do Aerogerador 5.	65
Tabela 8 - Velocidade média do vento dos aerogeradores.	71
Tabela 9 - Velocidade média do vento dos aerogeradores.	72
Tabela 10 - Monitoramento dos dados registrados para o aerogerador 4, durante o dia 03/07/2022.	73
Tabela 11 - Parâmetros da performance do Aerogerador 11.	75
Tabela 12 - Parâmetros da performance do Aerogerador 12.	76
Tabela 13 - Parâmetros da performance do Aerogerador 13.	77
Tabela 14 - Parâmetros da performance do Aerogerador 14.	80
Tabela 15 - Parâmetros da performance do Aerogerador 15.	80
Tabela 16 - Parâmetros da performance do Aerogerador 16.	81

LISTA DE ABREVIATURAS

BEN	Balanço Energético Nacional
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivos Específicos.....	16
1.2 Estrutura do Trabalho	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 Aerogerador.....	19
2.2 Complexo Eólico.....	21
2.3 Potencial Eólico	22
2.3.1 Coeficiente Limite de Betz.....	25
2.3.2 Curva de Potência.....	28
2.3.2.1 Anomalias mecânicas recorrentes	30
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 Extração dos dados de operação dos aerogeradores	33
3.2 Comparação das curvas utilizando o coeficiente de determinação	34
3.3 Análise de desempenho através do erro entre as curvas.....	36
3.4 Principais sistemas de interrupção do complexo	36
4 RESULTADOS E ANÁLISES	38
4.1 Correlação entre perda de potência e desvios da curva s.....	38
4.1.1 Resultados em cada cenário de estudo.....	39
4.1.1.1 Aerogerador 1	40
4.1.1.2 Aerogerador 2.....	45
4.1.1.3 Aerogerador 3.....	52
4.1.1.4 Aerogerador 4.....	58
4.1.1.5 Aerogerador 5.....	64
4.1.2 Análises em cada cenário de estudo	70
4.2 Correlação entre velocidade média do vento e desvios da curva s.....	70
4.2.1 Monitoramento da velocidade do vento	72
4.2.2 Sistema de controle de orientação das pás	73
4.3 Performance	73
4.3.1 Subperformance	74
4.3.1.1 Aerogerador 11	74

4.3.1.2 Aerogerador 12	75
4.3.1.3 Aerogerador 13	77
4.3.2 Sobreperformance.....	78
4.3.2.1 Aerogerador 14	78
4.3.2.2 Aerogerador 15	80
4.3.2.3 Aerogerador 16	81
4.4 Principais eventos de interrupção dos aerogeradores	82
5 CONSIDERAÇÕES.....	84
REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira é destaque mundialmente por dispor de um patamar renovável relevante, sendo o terceiro maior produtor de energia renovável do mundo em GWh (IRENA, 2020). Em 2021, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), o país se manteve nessa posição importante com 44,7% das fontes renováveis. No que se refere à matriz elétrica, ressalta-se que o país é predominantemente renovável, na qual a geração hidráulica é a principal fonte da oferta de energia. No Plano Decenal de Expansão de Energia (2031), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), é verificado o aumento em 1% e 2% da capacidade instalada através das fontes eólica e solar, respectivamente.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) apresenta cotidianamente os resultados dos tipos de geração em operação no Sistema Interligado Nacional (SIN). A geração eólica se destaca na evolução da capacidade instalada, com um aumento de 44,54% nos últimos quatro anos. Para os subsistemas de geração eólica existentes por região, o Nordeste possui 89,25% da capacidade total, devido às condições favoráveis do vento, que são fortes e unidirecionais, potencializando o trabalho dos aerogeradores.

O aerogerador é composto por quatro componentes principais: Nacele, Rotor, Pás e Torre. As pás do rotor captam a energia cinética do vento e transferem para o eixo do rotor em forma de torque e velocidade, de modo que essa potência é transferida para o multiplicador de velocidade, adequando a velocidade para o gerador; em seguida, o gerador recebe do multiplicador uma potência com alta velocidade e torque reduzido, convertendo, então, a potência mecânica em potência elétrica. Cada aerogerador possui uma curva de potência (curva s), que considera a potência gerada \times velocidade do vento.

A partir da crescente inserção da energia eólica na matriz elétrica mundial, verifica-se em paralelo os desafios que o setor eólico vem enfrentando. No qual está relacionado às anomalias das turbinas, devido a confiabilidade e vida útil de equipamentos, substituição e/ou reparo de componentes e outras eventuais irregularidades nos sistemas. Encontra-se na literatura diversos estudos avaliando as curvas de potência das turbinas, sendo possível, então, analisar o desempenho dos

aerogeradores e relacionar as possíveis anomalias existentes (ZHU, et al, 2018; CARVALHO, 2020).

Entre os avanços da implementação da geração eólica e as adversidades existentes nos sistemas das turbinas, verifica-se a relevância do estudo das curvas de potência dos aerogeradores. Sendo possível analisar, através da curva s, possíveis desvios dos valores esperados (de referência) e performance indesejada, decorrentes de anomalias no aerogerador, ou seja, devido a falhas no sistema de funcionamento da turbina.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de realizar um estudo comparativo do desempenho de aerogeradores presentes em um complexo eólico no estado da Bahia, através das suas respectivas curvas de potência.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Levantar as curvas de potência dos aerogeradores, através do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA);
- Comparar as curvas obtidas com a curva de referência;
- Analisar as curvas relacionando as anomalias das turbinas;
- Avaliar os principais eventos de interrupção para o funcionamento dos aerogeradores.

1.2 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 é apresentado a fundamentação teórica sobre a energia eólica, abordando assuntos relacionados à crescente inserção da geração eólica na matriz elétrica brasileira, o funcionamento dos complexos eólicos e do aerogerador e a análise do comportamento das curvas de potência.

No capítulo 3 é observado a metodologia implementada para a realização das análises das curvas de potência dos aerogeradores.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e as análises pertinentes ao estudo.

No capítulo 5 são expostas as conclusões finais, bem como propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partir da grande extensão territorial do Brasil, o país apresenta regiões com características positivas, que aprimoram o aproveitamento da geração de energia eólica. O Plano Nacional de Energia de 2050 apresenta estudos do potencial eólico brasileiro, sendo o vento um parâmetro importante para a potência de saída das turbinas. Para realização das análises do potencial eólico das regiões são verificados fatores atmosféricos, como a intensidade da velocidade e direção do vento, temperatura e pressão e, também observa-se particularidades geográficas, como o relevo e rugosidade do terreno (EPE, 2020).

Com o desenvolvimento das tecnologias dos aerogeradores, diante da geração de maiores potências e dimensões para operações em maiores alturas, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) em conjunto com Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), realizaram atualizações das simulações do potencial eólico para todo território nacional. Na Figura 1 é mostrada a velocidade média anual do vento para turbinas de 100 m e 120 m de altura, respectivamente.

Figura 1 - Velocidade média anual do vento.

(a) Turbinas de 100 m.



(b) Turbinas de 120 m.



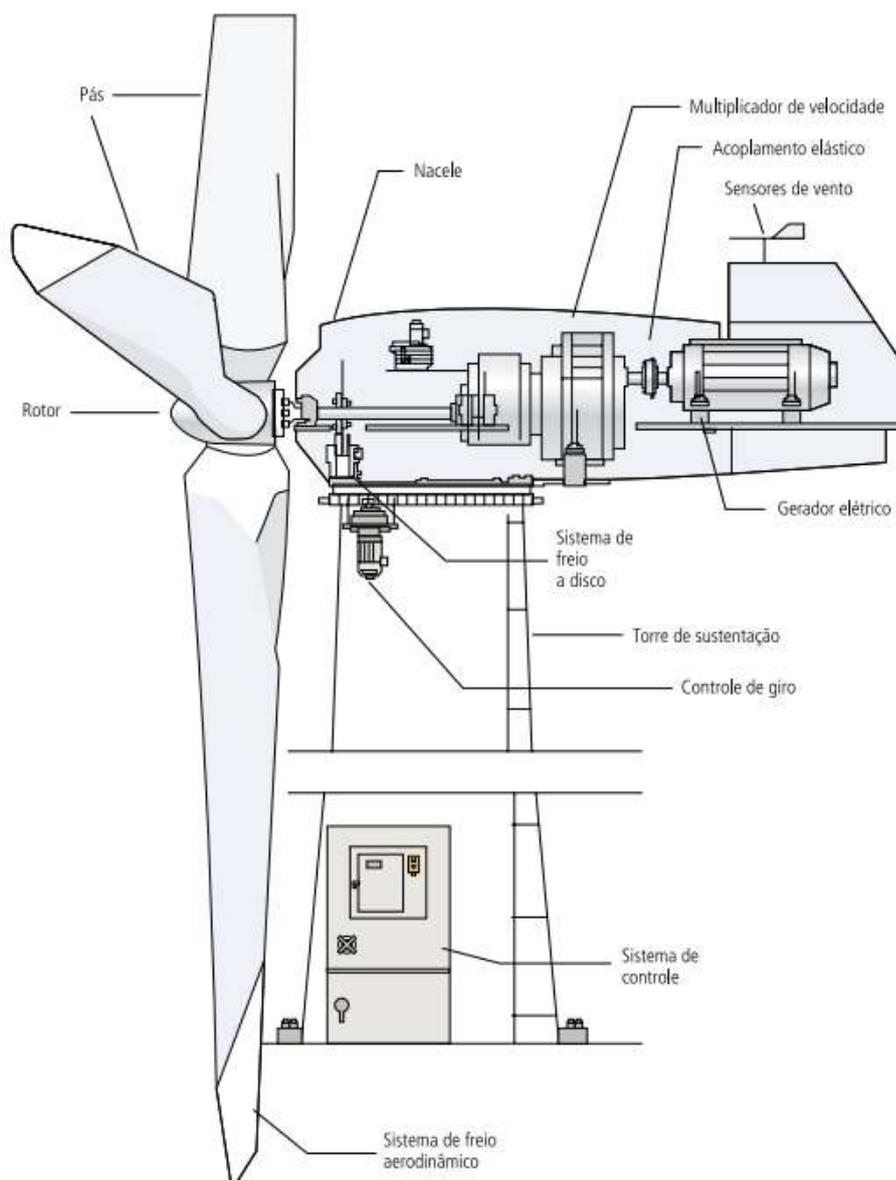
Fonte: CEPEL (2017).

É possível destacar o grande potencial eólico do Nordeste, que se caracteriza por altas intensidades, forte regularidade, constância direcional, baixos níveis de turbulência e pequeno gradiente de velocidade vertical. Por consequência, há uma crescente capacidade instalada da geração eólica no Nordeste. A Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias aponta que o Nordeste representa 88,7% da geração eólica no país. Ao analisar a geração eólica dessa região durante o ano, é possível destacar que a geração de energia durante os meses de julho a outubro é maior quando comparada aos outros meses, estando relacionado a variação das estações do ano, que refletem na direção do vento local, no qual a massa de ar pode ser canalizada, acelerando a velocidade do fluxo de ar. (SILVA, 2015; ABEEólica, 2021)

2.1 Aerogerador

A partir do crescente potencial eólico brasileiro e da capacidade de geração instalada é essencial entender o funcionamento do aerogerador e verificar a sua respectiva confiabilidade. Na Figura 2 é apresentado os principais componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal e logo em seguida, suas respectivas descrições (FADIGAS, 2011).

Figura 2 - Esquemático do aerogerador.



Fonte: ANEEL (2008).

- Rotor eólico:** É composto pelos componentes rotativos do aerogerador: (i) as pás são os elementos responsáveis por converter a energia eólica em energia mecânica de rotação e o (ii) mecanismo de controle do ângulo de passo das pás, que permite o movimento das pás em posições distintas para otimizar a força do vento, se adequando, então, a posição mais propícia para captação dos ventos.

- **Nacele:** Compõe os componentes elétricos, sistemas de controle, de transmissão e o conjunto de freios.
 - **Conjunto de freios:** Necessário para aumentar o nível de segurança do aerogerador. Esse sistema mantém o rotor na posição parada para serviços de manutenção e reparo de peças e também, auxilia no freio aerodinâmico.
 - **Caixa de multiplicação de velocidade (Gearbox):** Sistema que transmite a energia mecânica do eixo principal do rotor ao eixo do gerador elétrico. Devido a questões mecânicas a rotação do rotor da turbina é, normalmente, entre 15 a 200 rpm e possui um alto torque; há a transformação ao eixo para uma alta velocidade das rotações que o gerador precisa para realizar o seu funcionamento, de 1500 a 1800 rpm e um torque baixo.
 - **Gerador:** Converte a energia mecânica do eixo em energia elétrica. Os geradores elétricos usados em turbinas eólicas fornecem energia em tensões entre 380V e 690V trifásica.

- **Torre:** Sustentação dos componentes elétricos e mecânicos da turbina a uma determinada altura do solo.
 - **Sistema de controle:** Garante a conversão da energia eólica em elétrica de maneira eficiente, com segurança e confiabilidade. Realiza o monitoramento e controle de diversas variáveis essenciais para o aerogerador.

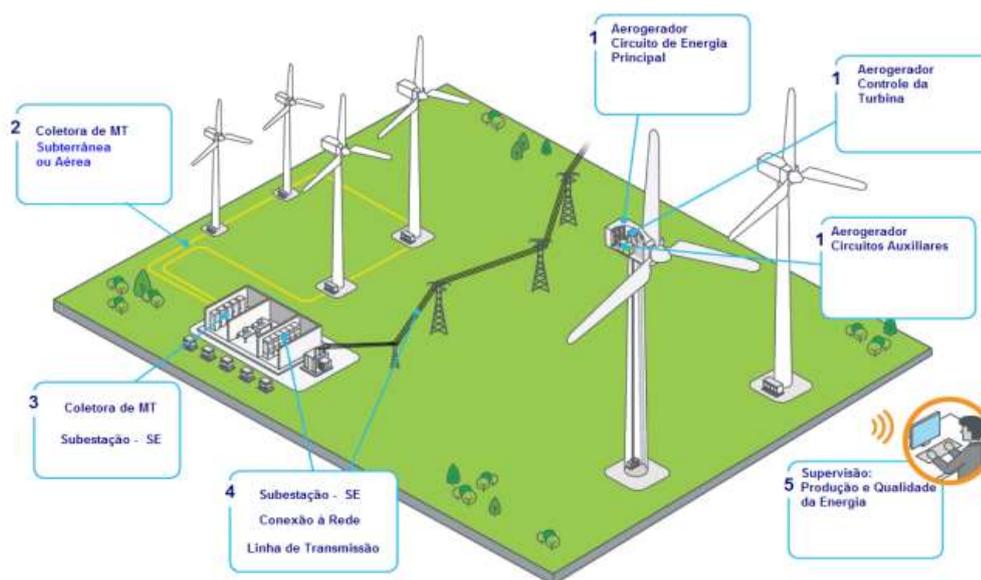
2.2 Complexo Eólico

Um complexo eólico é um local que concentra aerogeradores destinados a transformar energia eólica em energia elétrica. Há diversos setores que englobam o parque eólico, de modo a garantir a qualidade de geração. A Figura 3 apresenta a composição dos complexos eólicos.

Tem-se que a (1) manutenção e operação dos aerogeradores engloba os sistemas do circuito de energia principal e auxiliares e sistema de controle; (2) os transformadores unitários, atuantes na mudança do patamar de tensão; (3 e 4)

subestações, realiza a coleta de geração e realização do despacho através das Linhas de Transmissão e (5) Supervisão, no qual engloba engloba o monitoramento remoto, comando e geração de relatórios, direcionado a produção e qualidade da energia.

Figura 3 - Visão geral do complexo eólico.



Fonte: RESENDE, H (2012).

2.3 Potencial Eólico

A energia contida no vento é a energia cinética, ocasionada pela movimentação de massas de ar (Equação 1). Destaca-se que as equações apresentadas são obtidas de Fadigas (2011).

$$E = \frac{m v^2}{2} \quad (1)$$

Sendo:

E = energia cinética [J];

m = massa de uma partícula de ar [kg];

v = velocidade da massa de ar em movimento [m/s].

A energia por unidade de tempo é igual a potência (Equação 2):

$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad (2)$$

Sendo:

P = potência [W];

t = tempo [s].

Substituindo (2) em (1):

$$\Rightarrow P = \frac{m v^2}{2 \Delta t} \quad (3)$$

Sabendo que a massa de ar que se move por uma determinada área na unidade de tempo (taxa de fluxo da massa = m/t) é calculada é através da seguinte equação:

$$\frac{m}{\Delta t} = \rho v A \quad (4)$$

Sendo:

ρ = massa específica do ar [kg/m^3];

A = área [m^2].

Ao substituir (4) em (3), é possível resultar em:

$$P = \frac{\rho v^3 A}{2} \quad (5)$$

Sendo:

P = potência [J/s = W].

Na Figura 4 é exibida uma turbina de eixo horizontal, ao considerar a área varrida pelas suas pás é possível calcular a área do anel circular através da equação 6.

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (6)$$

Sendo:

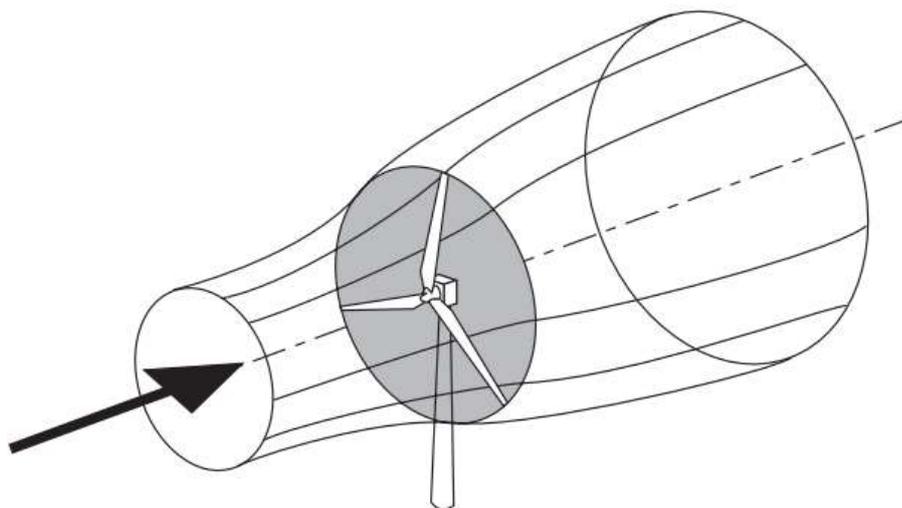
D = diâmetro do rotor [m].

Fadigas (2011) afirma que em locais que apresentam a mesma velocidade média dos ventos podem apresentar diferentes potências eólicas em função da

variação da massa específica do ar, sendo assim, é necessário comparar o potencial eólico local através da densidade de potência (P/A):

$$\frac{P}{A} = \frac{\rho v^3}{2} \quad (7)$$

Figura 4 - Área varrida pelas pás de uma turbina de eixo horizontal.



Fonte: Burton (2008).

Essa densidade de potência está contida no vento que atinge a parte frontal da turbina (Fadigas, 2011). A massa específica do ar é dada através da equação 8:

$$\rho = \frac{P_{\text{pressão}}}{R T} \quad (8)$$

Sendo:

$P_{\text{pressão}}$ = pressão do ar [Pa];

R = constante do gás [J/mol K];

T = temperatura em escala absoluta [K].

Para condições padrão (1 atm, 15°C, nível do mar), tem-se que a massa específica do ar é de $\rho = 1,2556 \text{ kg/m}^3$. Quando a altitude aumenta, a pressão do ar aumenta e, conseqüentemente, a densidade do ar aumenta. A altura do aerogerador impacta na velocidade do vento e assim, influencia diretamente na potência produzida. Assim, como a temperatura do ar e a pressão atmosférica variam com a altura é possível afirmar que as turbinas instaladas em um mesmo local, mas em alturas diferentes podem obter diferentes valores de densidades de potência (Fadigas, 2011).

2.3.1 Coeficiente Limite de Betz

Em 1919, Albert Betz demonstrou matematicamente a potência máxima de um aerogerador. Sabendo que equação (5) define a potência eólica, destaca-se que a velocidade do vento ao encontrar as pás do rotor terá seu perfil alterado, nessa passagem do fluxo de vento, uma parcela da potência é transformada em potência mecânica, no eixo da turbina e a parcela não aproveitada é levada pelo ar, ocasionando em uma redução na velocidade das pás (Fadigas, 2011). A Figura 5 apresenta o comportamento do vento ao passar pela turbina.

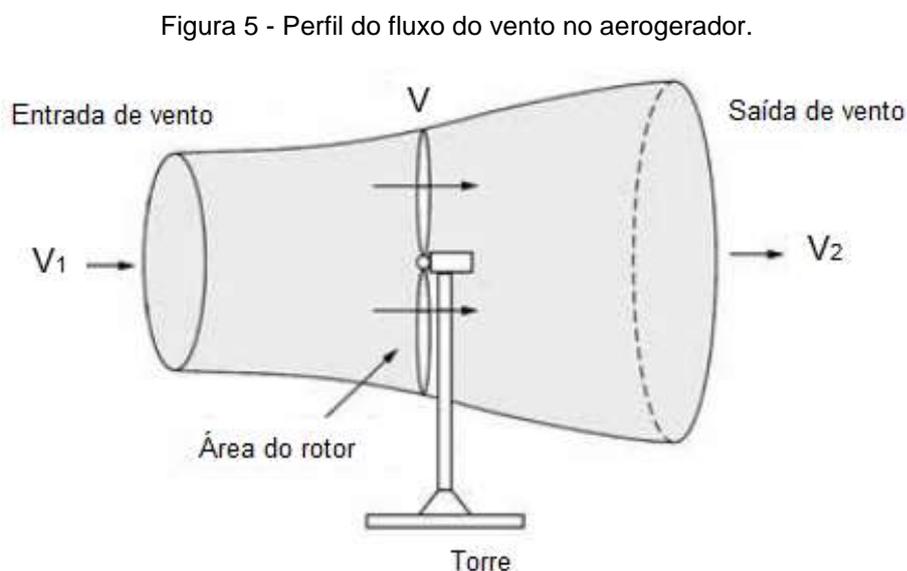
Sabendo da equação (4), a lei da continuidade de fluxo de massa apresenta que:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (9)$$

Sendo:

V_1 = velocidade do vento não perturbado [m/s];

V_2 = velocidade do vento atrás do aerogerador [m/s].



Fonte: Moura, et al. (2019).

O fluxo de massa de ar que chega até o conversor eólico é igual ao que sai (Fadigas, 2011). A potência mecânica extraída pelas pás é igual a diferença entre as potências de entrada e saída do conversor:

$$P_{mecânica} = \left(\frac{\rho A_1 V_1^3}{2} \right) - \left(\frac{\rho A_2 V_2^3}{2} \right)$$

$$\Rightarrow P_{mecânica} = \frac{\rho}{2} (A_1 V_1^3 - A_2 V_2^3) \quad (10)$$

Substituindo (9) em (10), é possível obter a potência mecânica extraída pelo conversor eólico, através da velocidade do fluxo:

$$P_{mec\ extraída} = \frac{\rho A_1 V_1}{2} (V_1^2 - V_2^2) \quad (11)$$

Sendo:

P_{mec} = Potência mecânica [W].

A partir da lei de conservação de momento, a força que o ar exerce no conversor é expressa na equação (12):

$$F = \rho v A (V_1 - V_2) \quad (12)$$

Sendo:

F = força [N].

Fadigas (2011) afirma que, conforme a Terceira Lei de Newton (Princípio da Ação e Reação), essa força (empuxo) deve possuir uma força igual agindo contra si, com uma velocidade V , efetuada pelo conversor. Desse modo, a potência é:

$$P = F V \quad (13)$$

Substituindo (12) em (13), tem-se que:

$$P = [\rho v A (V_1 - V_2)] V \quad (14)$$

Assim, a potência mecânica extraída é obtida através do empuxo e da velocidade do fluxo. Igualando as equações (11) e (14):

$$\frac{\rho A_1 V_1}{2} (V_1^2 - V_2^2) = [\rho v A (V_1 - V_2)] V \quad (15)$$

E, como:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (16)$$

É possível reescrever a equação (4) do fluxo de massa:

$$\begin{aligned} \frac{m}{\Delta t} &= \rho v A = \rho \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) A \\ \Rightarrow \frac{m}{\Delta t} &= \rho v A = \frac{\rho A}{2} (V_1 + V_2) \text{ [kg/seg]} \end{aligned} \quad (17)$$

Ao realizar a substituição da equação (17) em (11):

$$\begin{aligned} \Rightarrow P_{mec \text{ extraída}} &= \frac{1}{2} (\rho A_1 V_1) (V_1^2 - V_2^2) \\ \Rightarrow P_{mec \text{ extraída}} &= \frac{1}{2} \left[\frac{\rho A}{2} (V_1 + V_2) \right] (V_1^2 - V_2^2) \\ \Rightarrow P_{mec \text{ extraída}} &= \frac{\rho A V_1^3}{2} \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right]}{2} \end{aligned} \quad (18)$$

Considerando:

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right]}{2} \quad (19)$$

Sendo:

C_p = coeficiente de potência.

Tem-se que:

$$P = \frac{\rho V^3 A C_p(v)}{2} \quad (20)$$

Para obter a máxima eficiência é necessário derivar a equação de $C_p(v)$ em relação a $\frac{V_2}{V_1}$ e igualar seu resultado a zero. Resultando, então, em $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3}$. Logo, o coeficiente de potência torna-se máximo em:

$$C_p = \frac{16}{23} = 0,593 = 59,3\%$$

A eficiência de Betz é igual a 59,3%. Ressalta-se também que a potência extraída também deve considerar o processo de conversão mecânico-elétrico, desse modo:

$$P = \frac{\rho V^3 A C_p (v) \eta}{2} \quad (21)$$

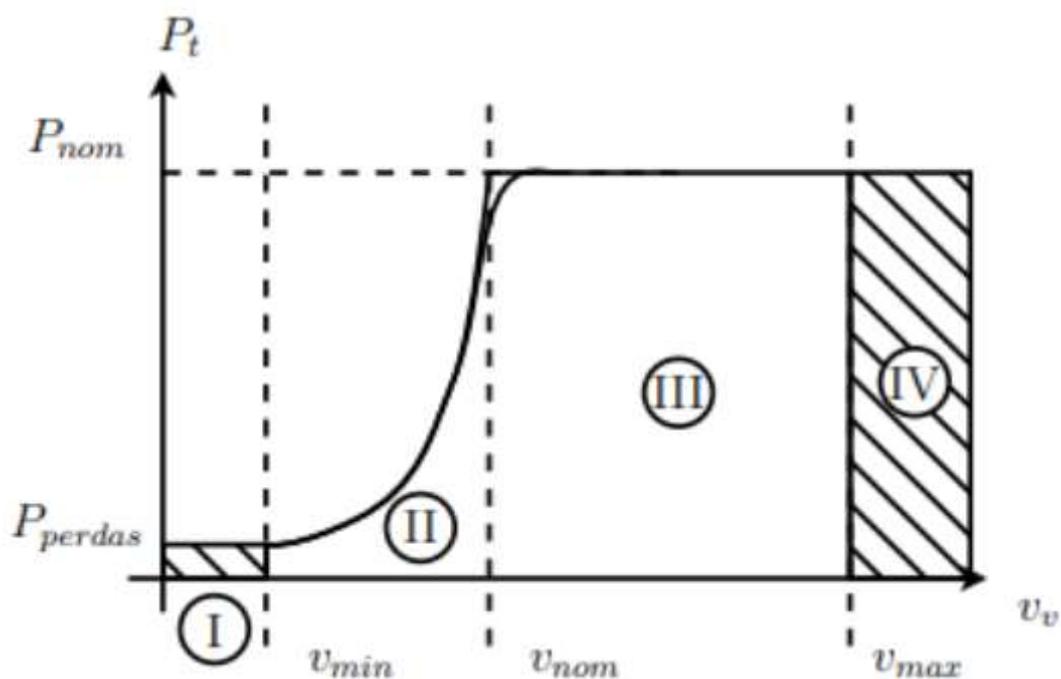
Sendo:

η = rendimento devido ao processo de conversão mecânico-elétrico.

2.3.2 Curva de Potência

Na Figura 5 verifica-se o comportamento de uma curva de potência (Curva s) de um aerogerador. Fadigas (2011) afirma que a curva s representa a capacidade de geração, ou seja, quanto de energia pode ser extraída do vento, a partir das condições ambientais e econômicas.

Figura 6 - Curva de potência de um aerogerador.



Fonte: DOBBIN (2014).

Na literatura é possível observar a descrição das regiões de operação do aerogerador (SANTOS & SOUZA, 2018; POHLENZ, 2020; CARVALHO, 2020):

- **Região I:** Verifica-se que a potência de saída é zero, devido a velocidade do vento ser inferior a uma velocidade mínima de partida (V_{min}); não compensando as perdas e os custos de operação.
- **Região II:** É possível notar que a potência de saída obtém um rápido crescimento, o sistema de controle realiza a variação da velocidade do gerador, buscando a maximização da geração de energia (máxima eficiência aerodinâmica).
- **Região III:** Potência de saída do aerogerador igual à potência nominal, a partir do vento nominal (V_{nom}) até o vento máximo (V_{max}). Havendo a atuação do sistema de *pitch*, através da limitação da potência extraída do vento. De maneira que, mesmo que aumente a velocidade do vento, a potência permanecerá a mesma.
- **Região IV:** Zona de saturação de potência, a turbina é desligada após o vento ultrapassar a velocidade máxima do vento permitida para geração, a partir da atuação dos freios mecânicos do sistema a turbina não está exposta a sobrecargas mecânicas, mantendo, então, a sua integridade física.

Através da curva de potência do aerogerador é possível representar o desempenho de seu funcionamento, sendo, então, um dos principais indicadores de avaliação de performance. Desvios dos valores reais da saída, ao comparar com a curva de referência, são denominados de *outliers* (fora da curva). Assim, as avaliações do comportamento das curvas de operação do aerogerador são essenciais, podendo relacionar as análises de falha de uma turbina e conseqüentemente, indicando possíveis indícios de desgaste de componentes, problemas no sistema e outros. (BARROS, 2013; SANTOS & SOUZA, 2018; WILLRICH, 2021).

2.3.2.1 Anomalias mecânicas recorrentes

As turbinas eólicas, quando em operação, podem desencadear falhas mecânicas em todo sistema, devido a frequências vibratórias; se ocorrer em grande intensidade pode causar, fadiga mecânica e redução da vida útil da turbina ou até mesmo o seu colapso (FERREIRA, 2018). O sistema de controle de giro realiza o mecanismo de orientação das pás das turbinas em relação ao vento, para esse processo é utilizado os motores e redutores para girar a nacele em conjunto com o rotor. Atuando, então, como um sistema de segurança do aerogerador.

Esse sistema de controle de orientação das pás é operado por um controlador lógico programável, variáveis são detectadas para acompanhamento das condições da máquina, a partir da utilização de transdutores, sensores indutivos, encoder, etc (FERREIRA, 2018). Na Figura 7, são apresentados sensores indutivos que realizam a contagem de giros na turbina.

Figura 7 - Sensores indutivos para contagem de giros de um rotor de turbina eólica.



Fonte: TURCK (2018).

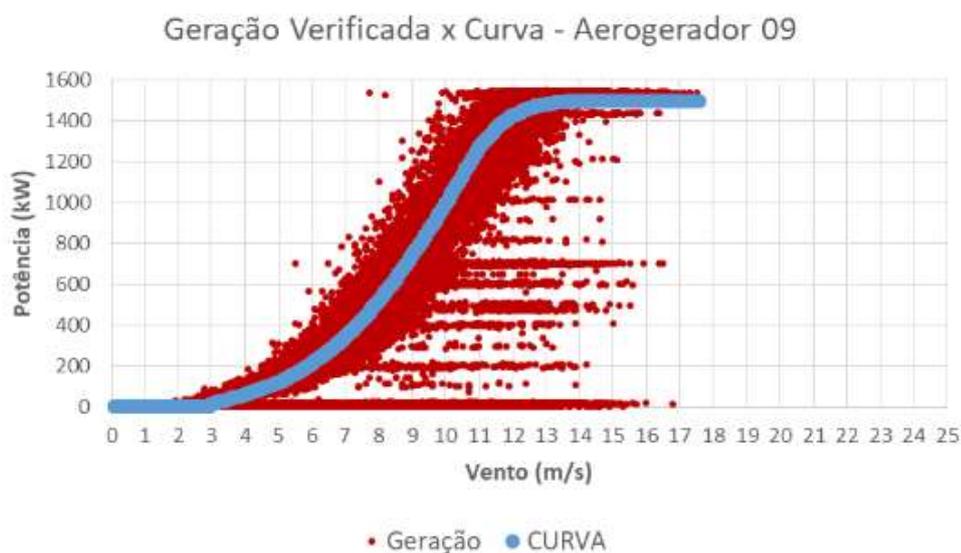
Ferreira (2018) afirma que quando ocorre a detecção de alguma anomalia, diante do monitoramento dessas grandezas da máquina, o sistema de controle realiza o processo de limitação de potência ou até mesmo a parada de emergência da turbina. Estudos de confiabilidade realizados por Wilkinson & Hendricks (2011) apontam que esse sistema de controle das pás é o segundo componente mecânico que mais

contribui para a ocorrência de falhas e, conseqüentemente, gera uma maior indisponibilidade da turbina.

Carvalho (2020) realizou um estudo de caso em um complexo eólico, obtendo a curva de potência das turbinas. Na Figura 8 observa-se o comportamento de um aerogerador, durante o período de julho de 2019 a junho de 2020. Ao obter o desempenho médio, tem-se que a geração de energia verificada para turbina em análise, foi de 391,6 kW, sendo a geração esperada de 583,9 kW, sendo, então, o desvio médio de 33%.

Ao realizar o estudo das anomalias existentes, foi verificada a queima de dois geradores, desde o início de operação da turbina. Avaliando as falhas existentes e condições climáticas do local, foi possível concluir que a queima dos geradores ocorriam devido a curto-circuito no enrolamento do estator, devido a falhas no isolamento, ocasionando também em corrosão dos ímãs do rotor.

Figura 8 - Curva de potência real e de referência de um aerogerador.



Fonte: CARVALHO (2020).

Em um estudo similar do desempenho de um parque eólico, Alewine et al. (2012), aponta que a maioria das falhas existentes foram decorrentes de eventos mecânicos (isolamento do rotor e estator, rolamento, cabo do rotor, curto-circuito em anéis coletores, sistema de refrigeração). A causa das falhas ocorridas foi relativa a condições ambientais severas (ambiente salino, umidade, poeira, etc), afetando os componentes de materiais ferrosos.

Assim, verifica-se na atual literatura a importância da realização do estudo das curvas de potência dos aerogeradores, correlacionando os seus respectivos desempenhos com as principais anomalias recorrentes, de modo a avaliar as performances.

No próximo capítulo será apresentada a metodologia adotada para realizar os estudos necessários.

3 METODOLOGIA

Neste estudo, foi realizado o acompanhamento do desempenho de 144 turbinas de um parque eólico do estado da Bahia. Dados da localização e aprofundamento da tecnologia da turbina não serão explanados, devido a preservação da confidencialidade da empresa que forneceu os dados.

O complexo eólico estudado iniciou a operação com algumas turbinas, em dezembro de 2018, mas apenas em abril de 2019 é que todas as turbinas (144) foram inseridas em operação comercial integral, disponibilizando 360 MW da capacidade instalada ao SIN. As características técnicas do tipo de aerogerador estudado são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Características técnicas do aerogerador.

Parâmetros técnicos da turbina	
Potência nominal	2,5 MW
Velocidade nominal do vento	12 m/s
Diâmetro do rotor	116 m
Altura da turbina	90 m

Fonte: Próprio autor.

3.1 Extração dos dados de operação dos aerogeradores

O acompanhamento da curva de potência e os parâmetros técnicos de cada turbina foram obtidos através do SCADA, como: disponibilidade, potência ativa, velocidade do vento, perda de geração, ocorrência e duração das falhas, e outras variáveis, a fim de avaliar suas respectivas performances. O supervisor registra as informações necessárias em um espaço de tempo de dez em dez minutos.

Ao obter a curva de potência de cada turbina, foi feito o comparativo com a curva de referência. Ao notar divergências de performance da turbina foi obtido o registro de eventos (falhas), análise das manutenções preventivas, preditivas e corretivas, e parâmetros de performance para avaliar os principais ofensores.

A obtenção desses dados necessários foram gerados durante o período de dois anos (setembro de 2020 a agosto de 2022). Esse período de tempo foi admitido devido as atualizações do sistema supervisório integrado, sendo possível extrair a curva de potência apenas durante o espaço de tempo especificado.

3.2 Comparação das curvas utilizando o coeficiente de determinação

A comparação dos dados da curva s com a curva de referência de cada gerador foi realizada através do coeficiente de determinação (R^2). Buscou-se verificar se o mesmo pode ser utilizado como parâmetro avaliativo de distorção da curva, apesar de linear. O R^2 é a medida estatística de quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada, esse modelo estatístico expressa a quantidade da variância dos dados. Este valor pode variar entre zero e um, quanto maior o R^2 mais explicativo é o modelo linear. Na equação 22 é verificado a forma de obter o valor do coeficiente de determinação (DEVORE, 2016):

$$R^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT}$$

$$\Rightarrow R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \underline{y})^2}$$

Sendo:

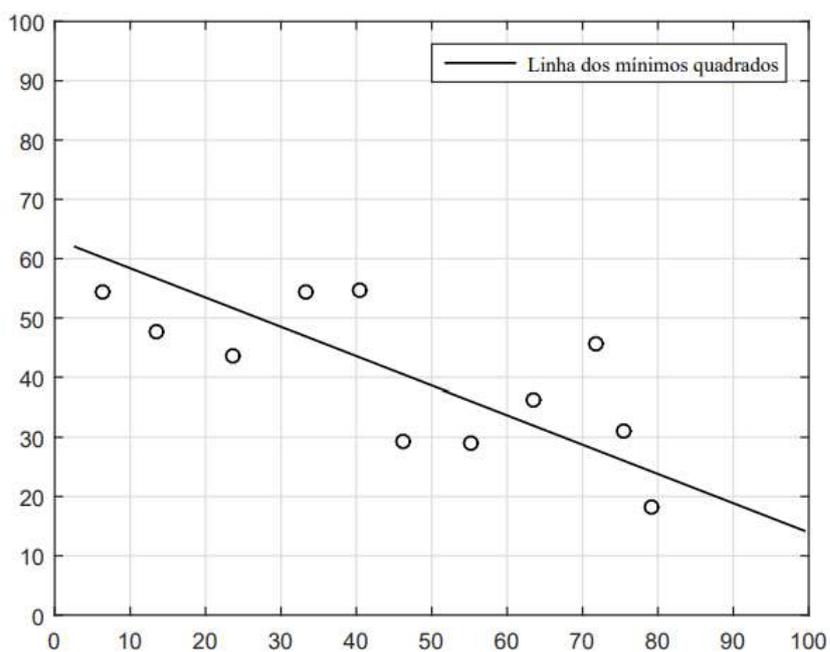
SQE = somatório do quadrado das diferenças entre os dados coletados y_i e o modelo analisado \hat{y}_i , ou seja, a soma dos quadrados dos erros;

SQT = somatório do quadrado das diferenças entre os dados coletados y_i e a média desses dados \underline{y} , ou seja, a soma dos quadrados totais.

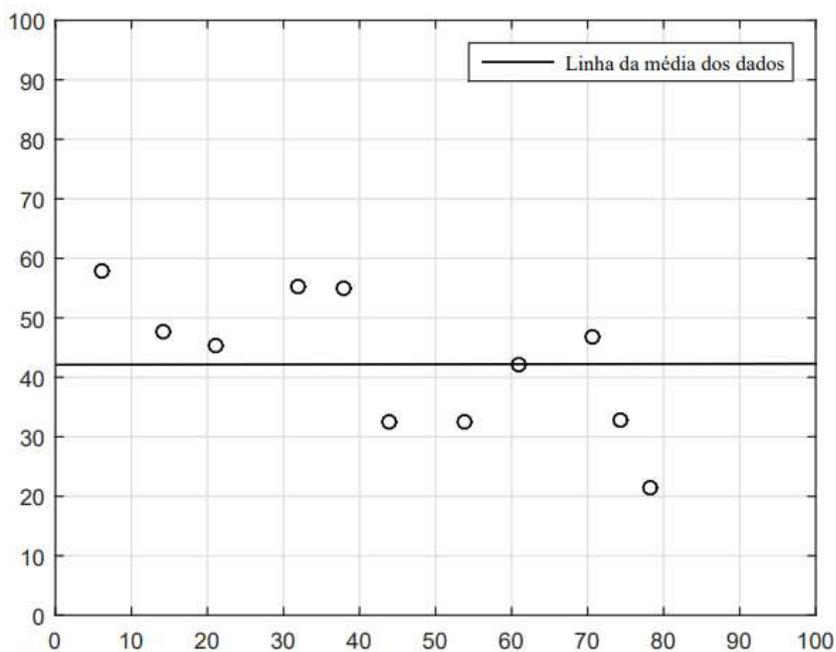
Na Figura 9 é apresentada uma ilustração sobre os valores de SQE e SQT.

Figura 9 - Ilustração dos parâmetros SQE e SQT.

(a) SQE.



(b) SQT.



Fonte: adaptado de DEVORE (2016).

Dessa maneira, ao utilizar o parâmetro R^2 para avaliar quantitativamente a curva de potência do aerogerador, espera-se que quanto maior o coeficiente há um melhor ajuste à amostra de dados e com isso, há um melhor comportamento da curva de potência da turbina. Assim, para os cenários avaliados, ao obter a curva de

potência dos aerogeradores, foi gerado o modelo de regressão e obtido o coeficiente de determinação para cada caso avaliado.

3.3 Análise de desempenho através do erro entre as curvas

No que se refere ao estudo de desempenho do aerogerador é possível que exista um deslocamento da curva de potência da turbina, gerando casos nos quais a turbina gera acima do esperado, sobreperformance, bem como casos com geração abaixo do esperado, subperformance. Além da avaliação dos parâmetros da energia gerada e a esperada, com suas respectivas discrepâncias, também foram analisadas as anomalias existentes para cada cenário. A quantificação de sub ou sobreperformance foi realizada através do erro com relação a curva de referência. Considerou-se a seguinte equação:

$$\varepsilon = P_{med} - P_{ref}$$

Sendo:

P_{med} = Potência medida [W];

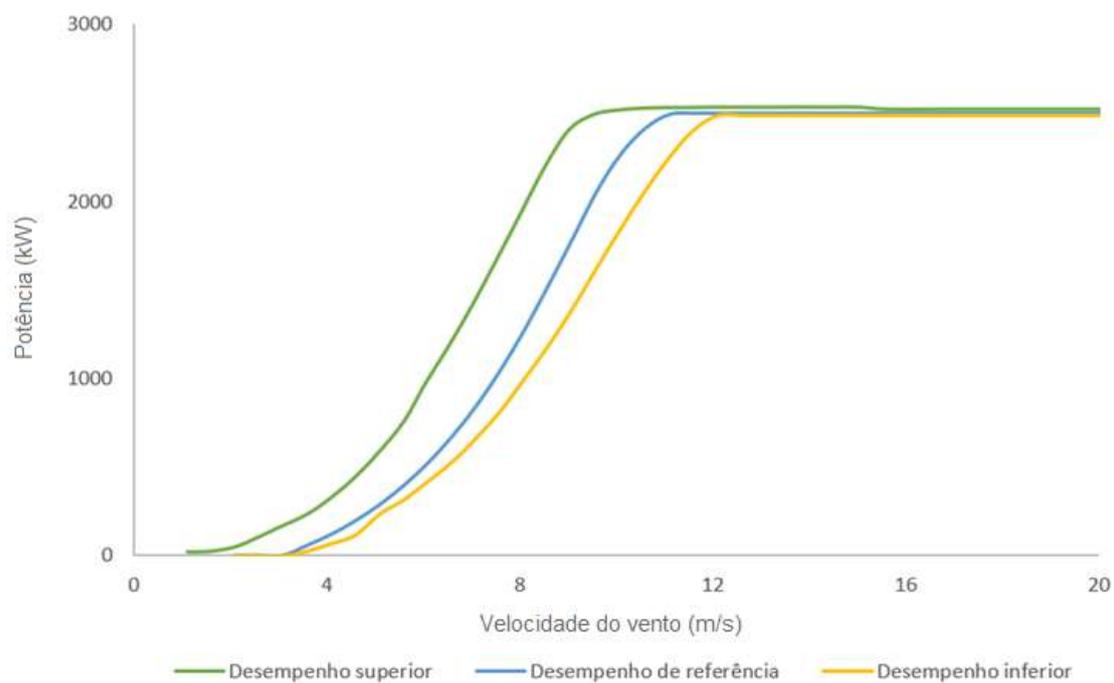
P_{ref} = Potência de referência [W].

Sendo assim, se $\varepsilon > 0$, o aerogerador está em sobreperformance. E, se $\varepsilon < 0$, a turbina comporta-se em subperformance. Na Figura 10 é exibido o comportamento das curvas para cada caso: de referência, desempenho superior e desempenho inferior.

3.4 Principais sistemas de interrupção do complexo

Por fim, além das análises comparativas do desempenho das curvas de potência também foram avaliados os principais sistemas de interrupção dos aerogeradores do complexo, através do registro de componentes afetados durante os dois anos de desempenho da turbina. A partir dos dados extraídos e avaliados, foi gerado um gráfico com os principais ofensores.

Figura 10 - Desempenho das curvas de potência.



Fonte: Próprio autor.

No capítulo a seguir serão apresentados os resultados obtidos, bem como as análises realizadas referente a cada resultado.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e as análises referentes às curvas de potência dos aerogeradores do complexo eólico.

4.1 Correlação entre perda de potência e desvios da curva s

A partir da verificação dos eventos existentes nos aerogeradores do complexo eólico, foi possível observar que a anomalia do sistema de controle de *pitch* ocorreu em cinco turbinas das 144 analisadas, a partir deste momento numerados como aerogeradores número 1 à 5. É importante ressaltar que cada aerogerador possui um sistema de controle de *pitch*, que tem como função realizar a redução dos esforços mecânicos do eixo do aerogerador, através da angulação das pás do rotor da turbina.

O sistema de controle é composto por quatro sensores indutivos (4 a 20mA), que ficam a uma distância de 5 a 7mm do rotor; os componentes são projetados para estar espaçados em 90° no flange principal do eixo do rotor, ou seja, os sensores são distribuídos em 45°, 135°, 225° e 315° graus. Os sensores captam os sinais das distâncias das pás e, a partir disso, o sistema calcula o quanto cada pá deve se movimentar (em graus) para compensar o possível desbalanceamento do rotor.

Desse modo, quando há a ocorrência de grandes estresses mecânicos dos componentes do aerogerador pode gerar erros nas capturas dos sinais dos sensores, influenciando diretamente no comportamento das curvas de potência das turbinas e impactando na redução da capacidade de geração de energia. Na tabela 2 são apresentados os registros das principais ocorrências das falhas e suas respectivas perdas de energia, que aconteceram nos aerogeradores de 1 a 5. É possível verificar que as principais anomalias que impactaram diretamente o desempenho dos aerogeradores de 1 a 5 estão relacionadas ao impacto mecânico do sistema.

Tabela 2 - Principais falhas dos aerogeradores de 1 a 5 (setembro/20 a agosto/22).

Principais Impactos dos Aerogeradores de 1 a 5			
Código	Eventos	Ocorrências	Perda de geração (MW)
A	Vibração da base do gerador	1048	300,86
B	Freio do rotor	212	36,19
C	Vibração da torre	203	96,42
D	Reparo	142	7035,62
E	Controle de orientação das pás	115	1413,04

Fonte: Próprio autor.

Os eventos A, B e C atuam no sistema de proteção da estrutura e foram as falhas que mais ocorreram durante o tempo avaliado, gerando suas respectivas perdas de geração. À medida que há um alto impacto no funcionamento do aerogerador, devido aos estresses mecânicos, verifica-se que o sistema de controle de orientação da pás é afetado (Evento E), gerando uma significativa perda de energia. Ressalta-se que a falha de reparo (Evento D) foi a que gerou uma maior perda de geração, no entanto é decorrente das manutenções preventivas e corretivas.

Com isso, as análises foram divididas em cinco cenários, um para cada aerogerador com anomalia no sistema de *pitch*. Em cada cenário foram consideradas as curvas de potência da turbina no período completo (setembro de 2020 a agosto de 2022), sendo, então, avaliado os dois meses com maior e menor coeficiente de determinação. Além da obtenção do R^2 mensal, também foi gerado a ocorrência de falhas e perda de energia (MWh), para o estudo dos principais ofensores.

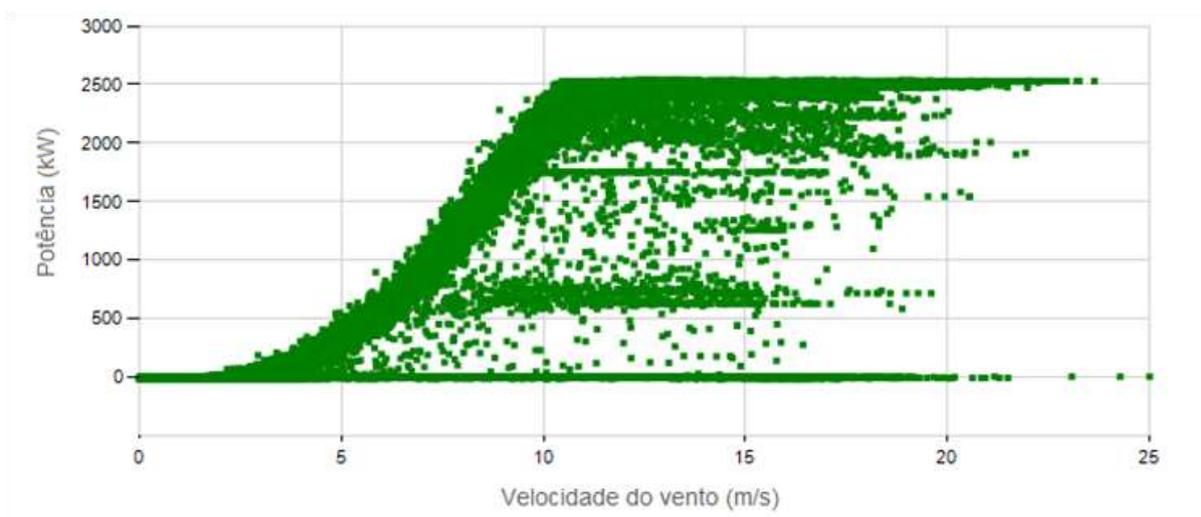
4.1.1 Resultados em cada cenário de estudo

Ao obter as falhas ocorridas no complexo, foi possível verificar que os aerogeradores de 1 a 5 apresentaram eventos relacionados à vibração mecânica da estrutura e, conseqüentemente, impactando no sistema de controle de orientação das pás. As análises foram distribuídas nos seguintes cenários:

4.1.1.1 Aerogerador 1

Na figura 11 é apresentada a curva de potência do Aerogerador 1, cujo período analisado é de dois anos (setembro/20 a agosto/22).

Figura 11 - Curva de potência do Aerogerador 1: setembro/20 a agosto/22.



Fonte: Próprio autor.

Para ter um acompanhamento mensal dos dados avaliados e assim verificar com uma maior precisão as anomalias existentes, foi realizado uma análise quantitativa da curva s mensal do aerogerador, através da obtenção da média do coeficiente de determinação. Na Tabela 3 é apresentado o R^2 para os meses avaliados, durante o período de dois anos de estudo (agos/20 a set/22).

Tabela 3 - Coeficiente de determinação mensal do Aerogerador 1.

Mês	Média do Coeficiente de Determinação (R^2)	Quantidade de Falhas	Perda de Energia (MWh)
janeiro	0,83	16	37,73
fevereiro	0,89	10	31,53

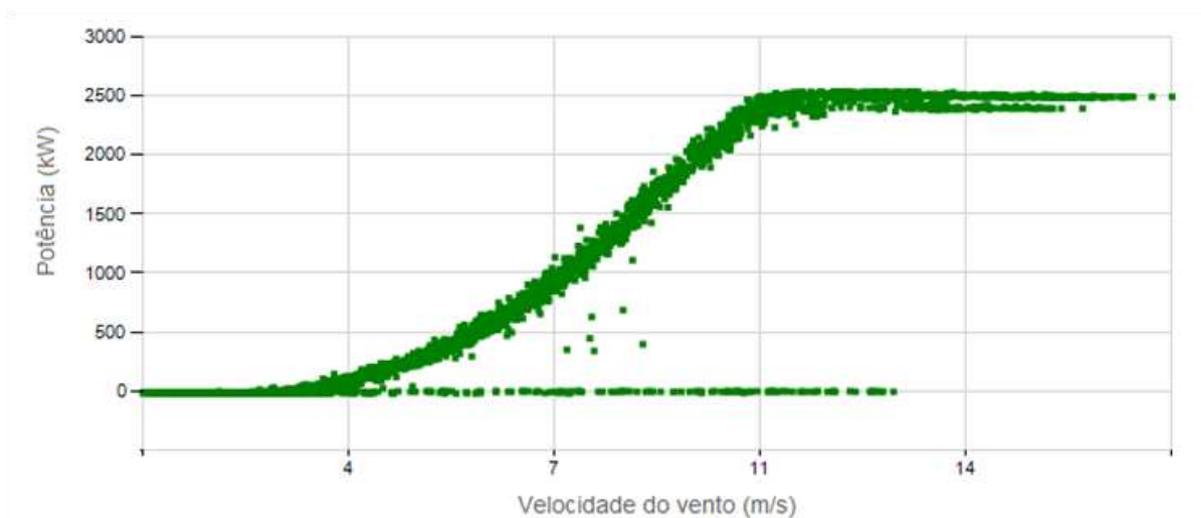
março	0,80	11	57,90
abril	0,80	13	21,43
maio	0,66	12	16,46
junho	0,74	10	50,04
julho	0,53	33	354,16
agosto	0,48	12	86,54
setembro	0,63	38	46,66
outubro	0,78	39	90,63
novembro	0,85	19	53,27
dezembro	0,84	7	04,70

Fonte: Próprio autor.

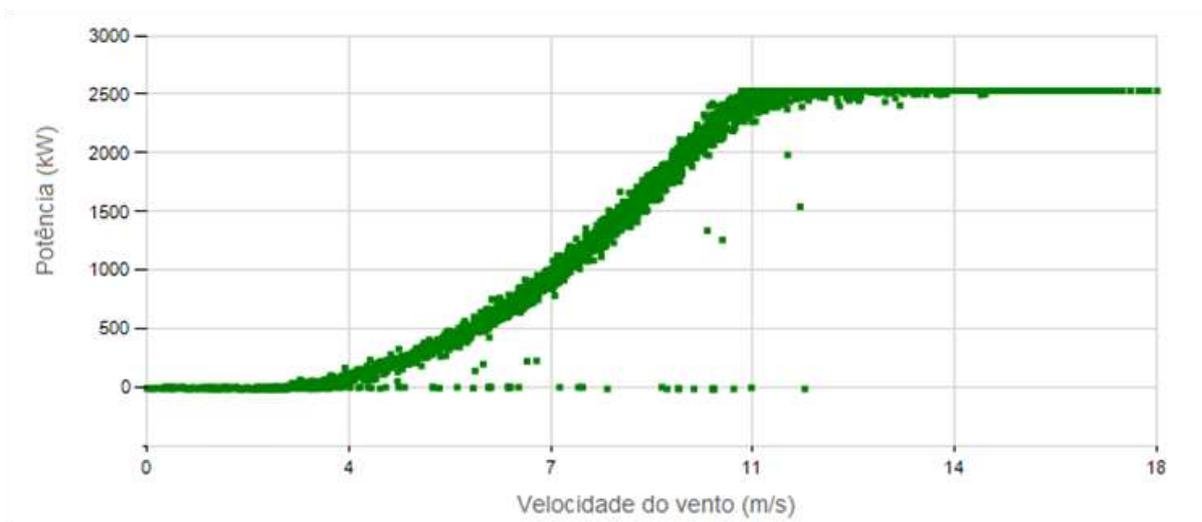
Ao observar os resultados, é importante destacar que os meses de fevereiro e novembro, apresentaram os dois maiores valores médios do coeficiente de determinação, com 0,89 e 0,85, respectivamente. Na Figura 12 e 13 é possível observar o comportamento da curva s desses meses especificados.

Figura 12 - Curva de potência do Aerogerador 1: fevereiro.

(a) fevereiro/21.



(b) fevereiro/22.

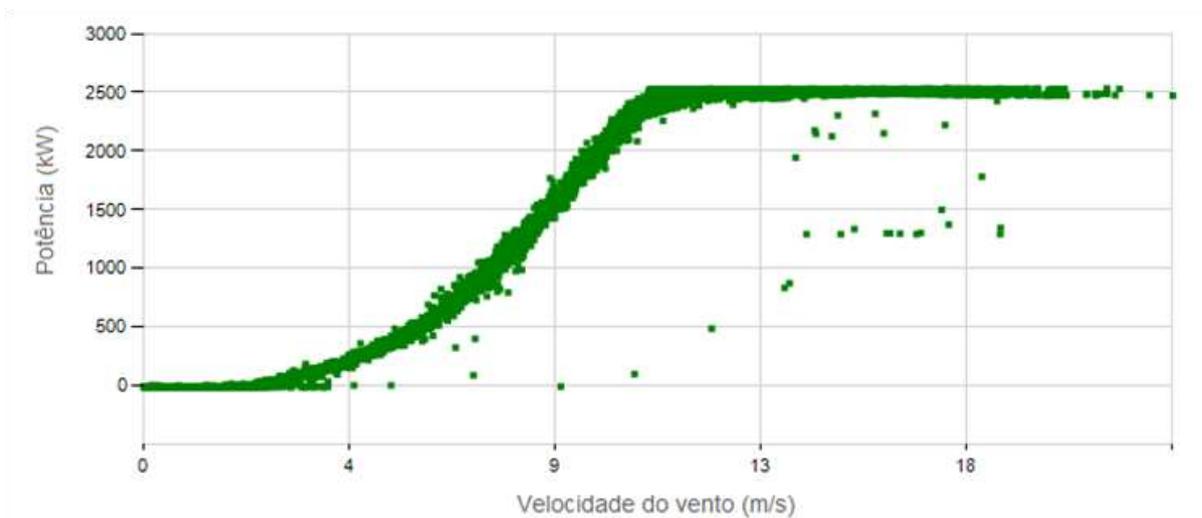


Fonte: Próprio autor.

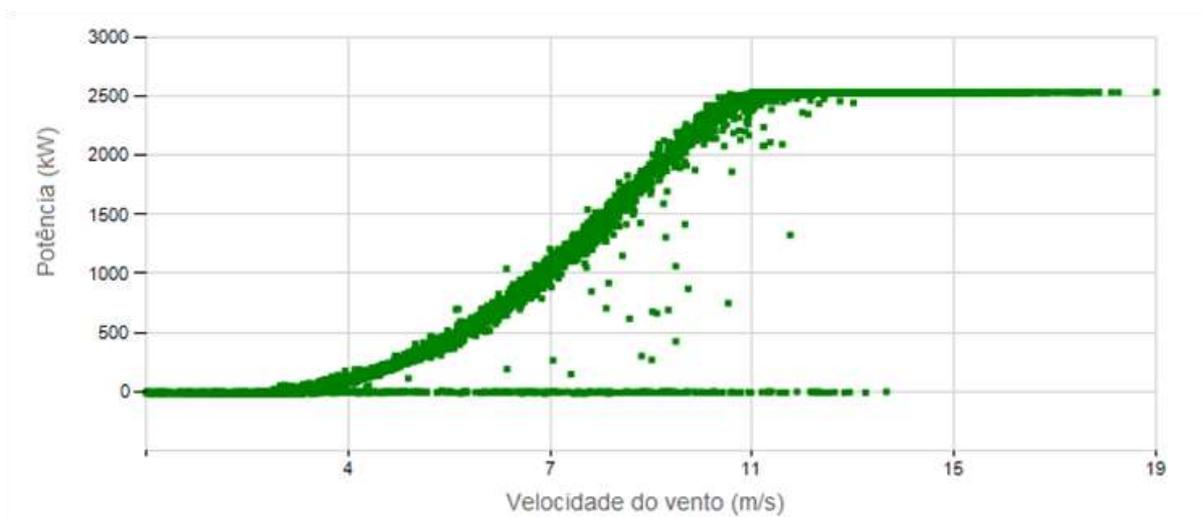
Para o mês de fevereiro/21 foi observado uma perda de geração de 28,45 MWh, destacam-se as ocorrências das falhas de alarme de proteção do motor, impactando em 91,12% da perda de energia; há também eventos de teste de freio e manutenção. Em fevereiro/22, houve a perda de geração de 3,08 MWh, sendo a atividade de manutenção que acarretou em uma maior perda de geração, com 69,16%, falhas de subtensão e de rede também impactaram.

Figura 13 - Curva de potência do Aerogerador 1: novembro.

(a) novembro/20



(b) novembro/21



Fonte: Próprio autor.

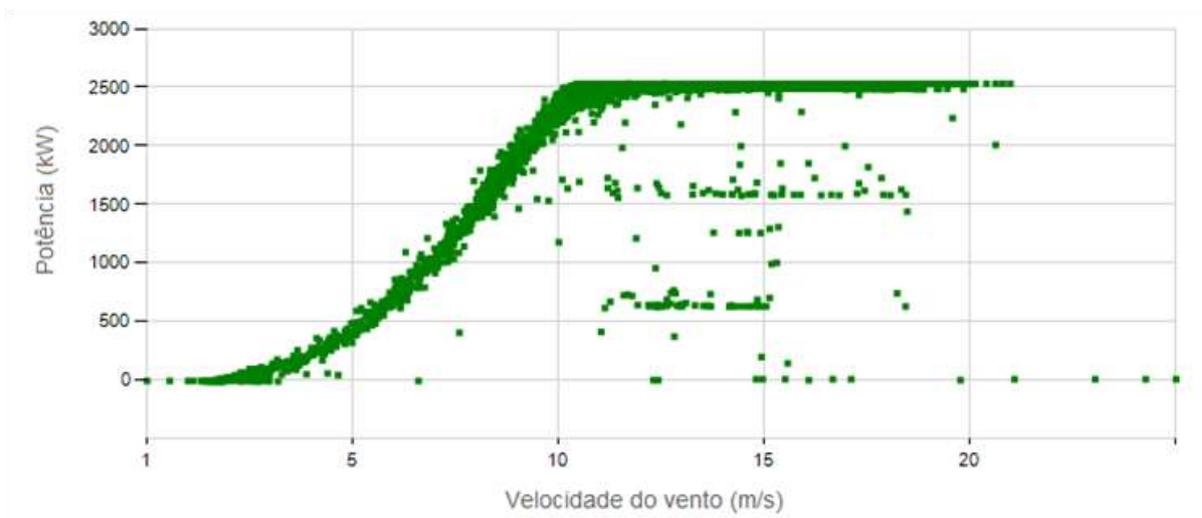
Já para novembro/21, observou-se a perda de energia de 1,11 MWh, devido à ocorrência de evento de baterias de *pitch*, acarretando em 87,39% da perda de geração mensal e também de atividade de manutenção. Em novembro/21 foi verificado a perda de 52,16 MWh da geração, 56,73% dessa perda foi decorrente da falha de conversor; evento de desgaste das escovas do gerador acarretou em 40,20% da perda de geração, falhas de subfrequência e atividade de reparo também foram verificadas.

Para os meses com menor R^2 , são verificados os meses de julho com 0,53 e os meses de agosto, cujo valor é de 0,48. Ao observar as Figuras 14 e 15, nota-se a presença de desvios na curva s , impactando na performance do aerogerador durante esses meses especificados.

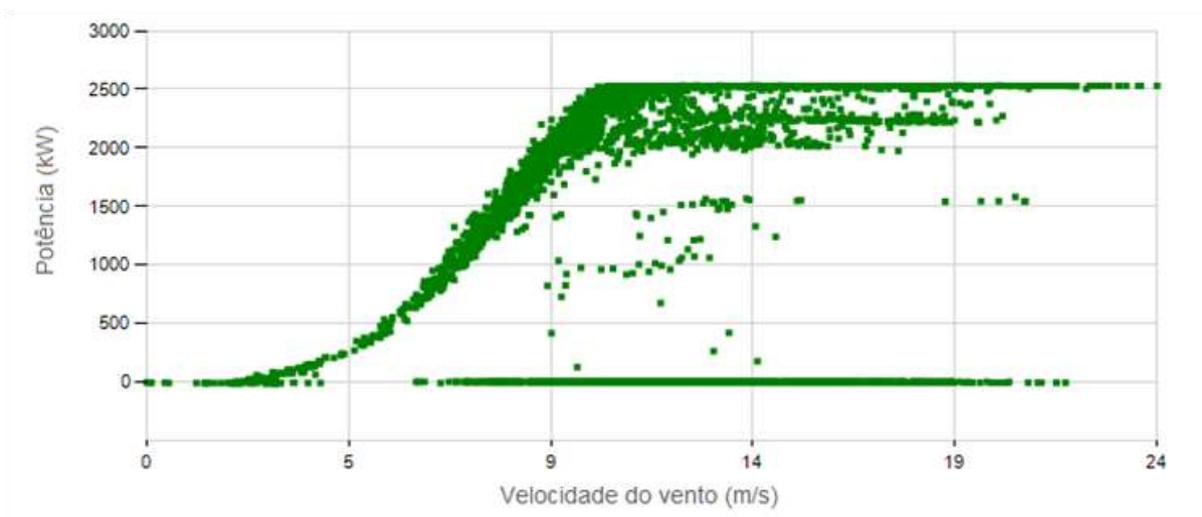
Em julho/21 observou a perda de 7,01 MWh de energia, decorrente de evento de subtensão, com 51,21% da perda de geração. Destaca-se também que 8,13% da perda de energia mensal foi devido a vibração da base do gerador, eventos de teste de freio e manutenção também ocorreram. Para julho/22, houve a perda de 347,15 MWh, os principais impactos relacionam-se a vibração mecânica do sistema, impactando com 12,63%, o sistema de controle de pás também acarretou em 8,75% das perdas, atividade de reparo, para realização da manutenção necessária, impactou em 41,03% da perda de energia mensal.

Figura 14 - Curva de potência do Aerogerador 1: julho.

(a) julho/21.



(b) julho/22.

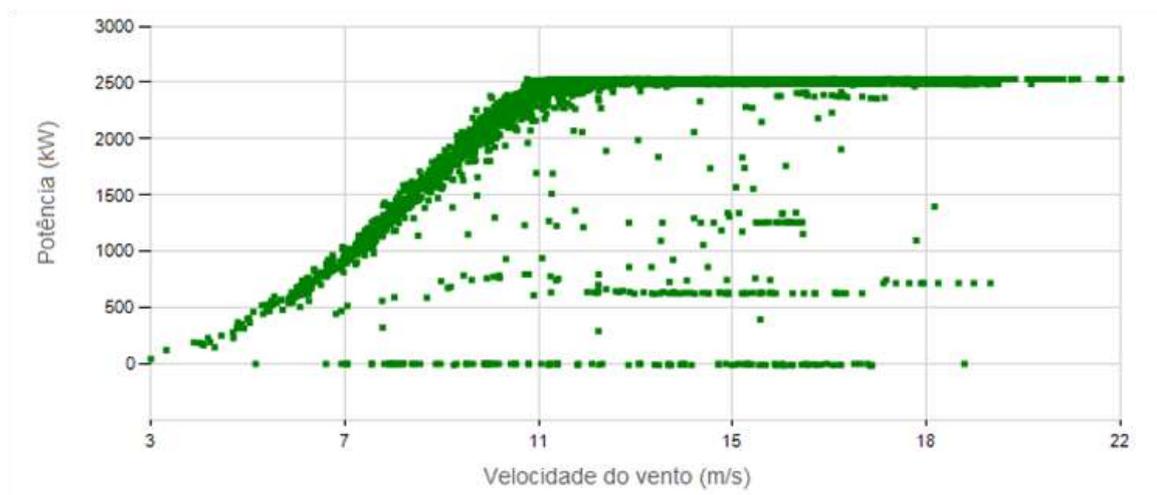


Fonte: Próprio autor.

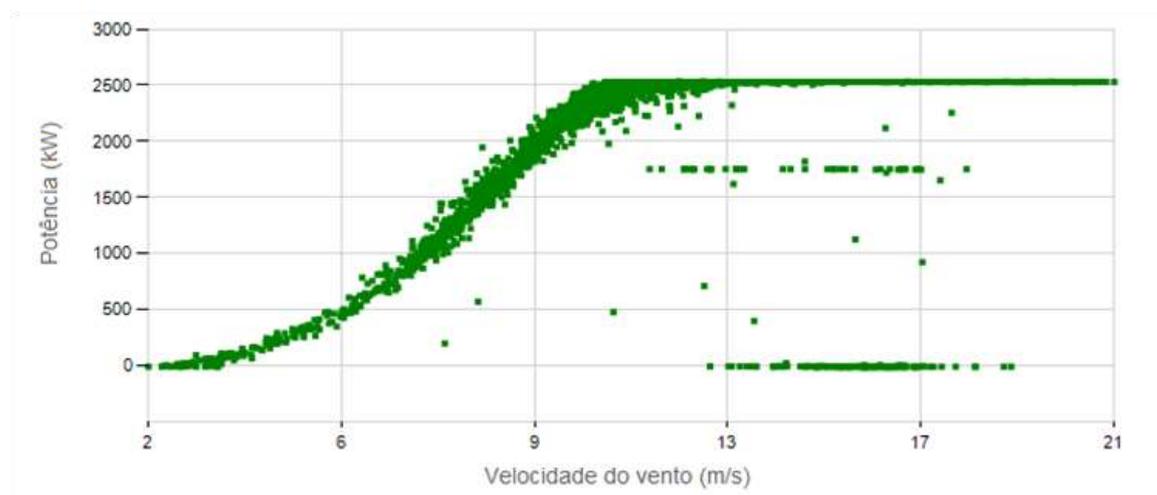
Para agosto/21, ressalta-se a perda de 24,63 MWh de geração, no qual 48,45% dessa perda é decorrente da vibração da torre, atividades de manutenção preventiva e reparo, para solucionar as falhas também impactaram. Em agosto/22, houve a perda de 61,91 MWh e, similar ao ano anterior, tem-se que 29,10% das perdas decorreram das falhas de vibração mecânica; eventos de manutenção e subtensão também ocorreram nesse mês.

Figura 15 - Curva de potência do Aerogerador 1: agosto.

(a) agosto/21.



(b) agosto/22.

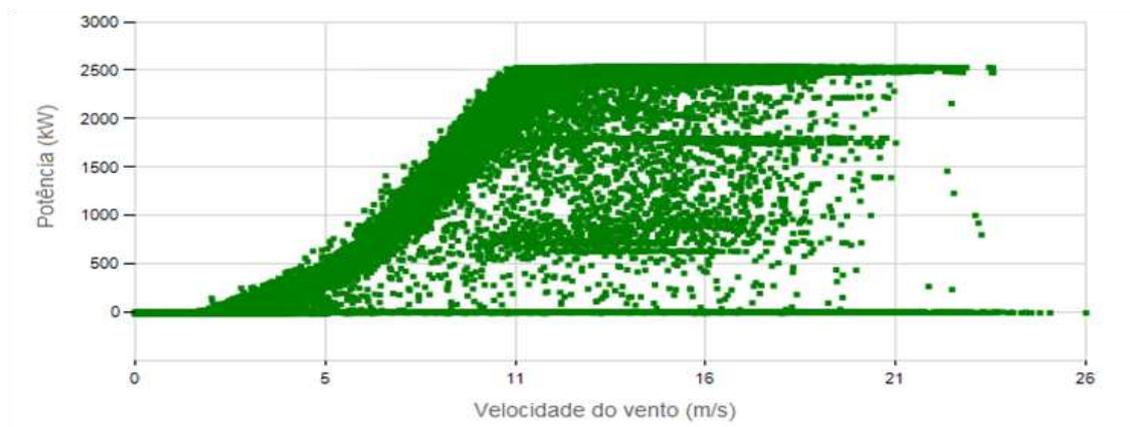


Fonte: Próprio autor.

4.1.1.2 Aerogerador 2

De maneira similar ao cenário anterior, na figura 16 é apresentada a curva de potência do Aerogerador 2 (setembro/20 a agosto/22).

Figura 16 - Curva de potência do Aerogerador 2: setembro/20 a agosto/22.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 4 é apresentado o coeficiente de determinação e os parâmetros técnicos mensal, durante o período de dois anos de estudo.

Tabela 4 - Coeficiente de determinação mensal do Aerogerador 2.

Mês	Média do Coeficiente de Determinação (R²)	Quantidade de Falhas	Perda de Energia (MWh)
janeiro	0,81	25	72,61
fevereiro	0,88	17	10,93
março	0,78	62	39,90
abril	0,75	112	110,82
maio	0,66	141	119,32
junho	0,67	116	131,94
julho	0,43	253	390,27
agosto	0,42	136	1.861,7
setembro	0,60	52	294,75

outubro	0,78	31	19,52
novembro	0,84	27	100,66
dezembro	0,83	13	4,21

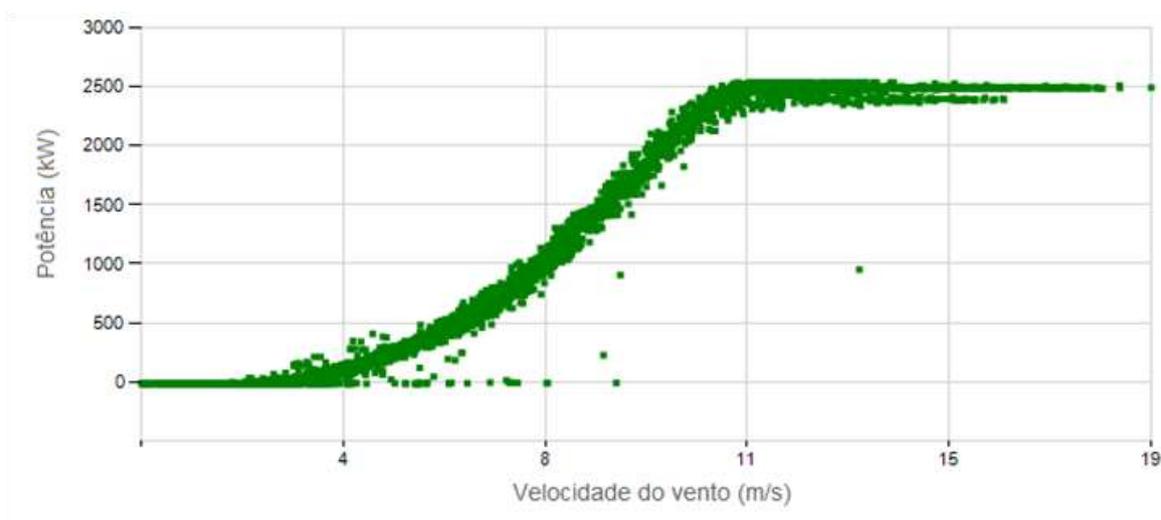
Fonte: Próprio autor.

Para os meses com maiores valores de coeficiente de determinação avaliados, destacam-se os meses de fevereiro e novembro, com R^2 de 0,88 e 0,84, respectivamente. Com isso, o modelo linear gerado explica 88% e 84% da variância da variável dependente a partir dos regressores (variáveis independentes) incluídos nos casos avaliados. Nas Figuras 17 e 18 são apresentados as curvas de potência de ambos os meses analisados.

Em fevereiro/21, houve 1,57 MWh de perda de geração, destacam-se os eventos de pitch, ocasionando em 44,59% da perda de geração; desgaste nas escovas do gerador, com 31,85% da perda e outros eventos, com menos impacto.

Figura 17 - Curva de potência do Aerogerador 2: fevereiro.

(a) fevereiro/21.



(b) fevereiro/22.

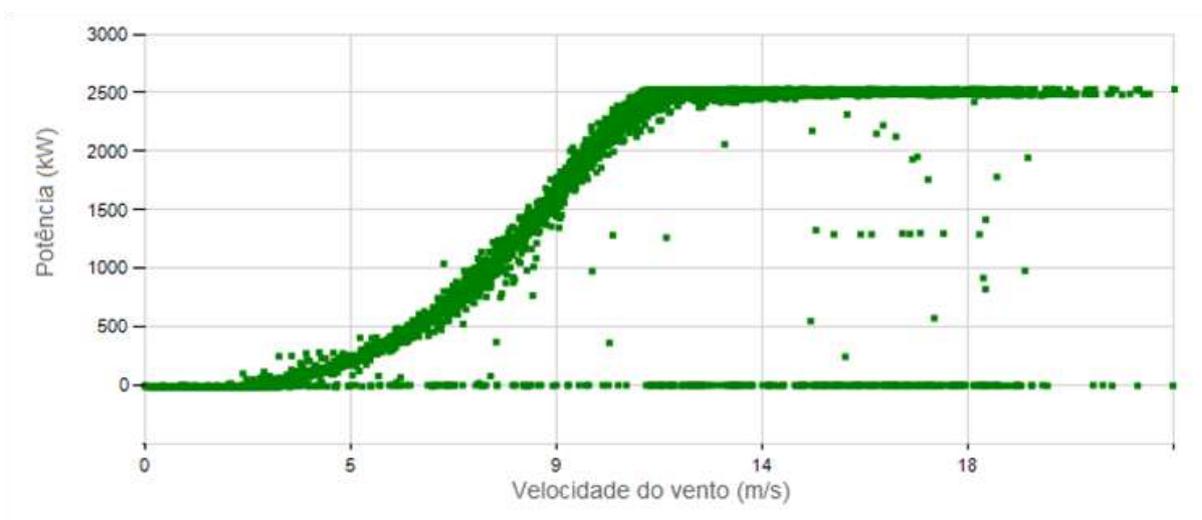


Fonte: Próprio autor.

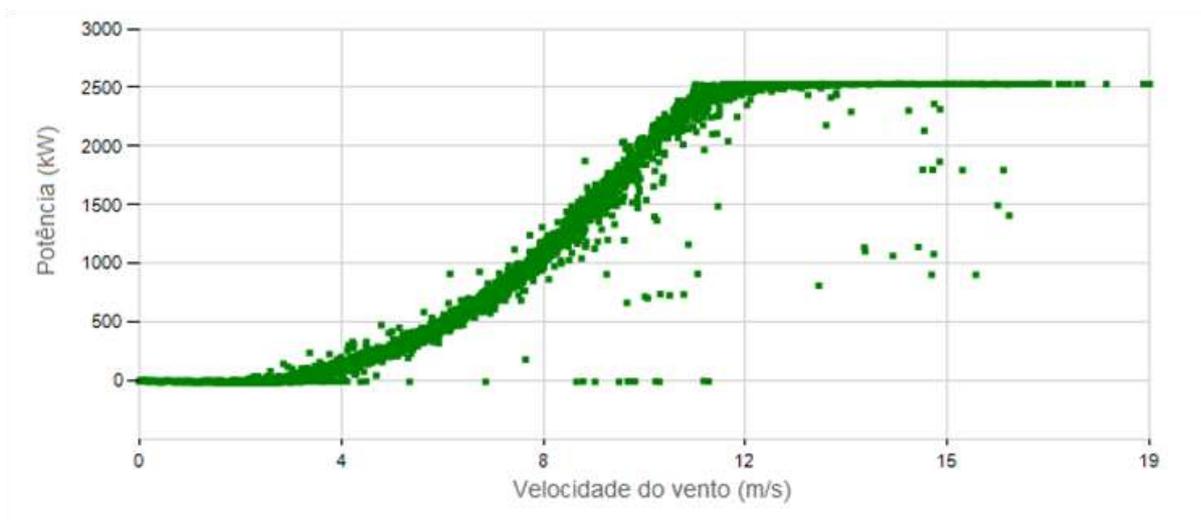
E, em fevereiro/22, tem-se a perda de 9,36 MWh de geração, com a presença de falhas de carregadores de baterias, cujo 69,98% da perda de energia, outros eventos de comunicação do conversor e vibração da base do gerador também ocorreram.

Figura 18 - Curva de potência do Aerogerador 2: novembro.

(a) novembro/20.



(b) novembro/21.



Fonte: Próprio autor.

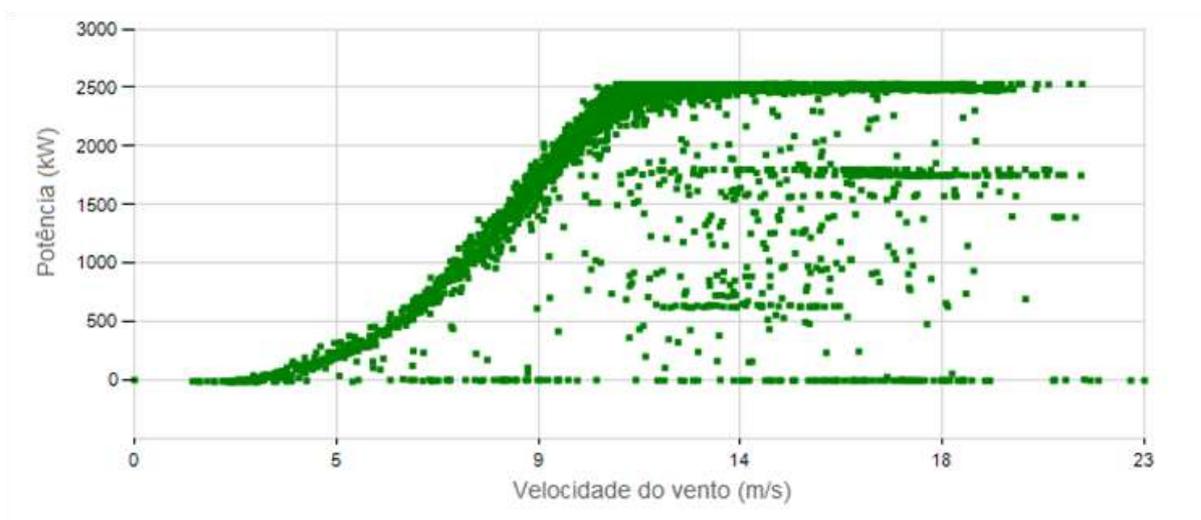
O mês de novembro/21 gerou uma perda de 3,14 MWh de energia, com apenas a presença de duas falhas: vibração da base do gerador, com 71,02% da perda e evento de falha de comunicação do conversor. E, em novembro/22, observou-se a perda de 32,14 MWh de geração. Destaca-se o evento de subtensão do sistema, com 89,58% da perda, falhas de vibração da base do gerador e de falta de fase na rede também ocorreram.

Nos meses com menor coeficiente de determinação, verifica-se a presença de desvios da curva real, em relação a curva de referência. O mês de julho obteve R^2 de 43% e agosto, com R^2 de 42%. Nas Figuras 19 e 20 são apresentados os comportamentos das curvas de potência do aerogerador 2, durante esses meses.

Em julho/21, obteve 50,52 MWh de perda de geração, a falha de vibração da base do gerador, acarretou em 74,85% dessa perda de geração de energia mensal, também houve eventos de vibração da torre e comunicação do conversor.

Figura 19 - Curva de potência do Aerogerador 2: julho.

(a) julho/21.



(b) julho/22.

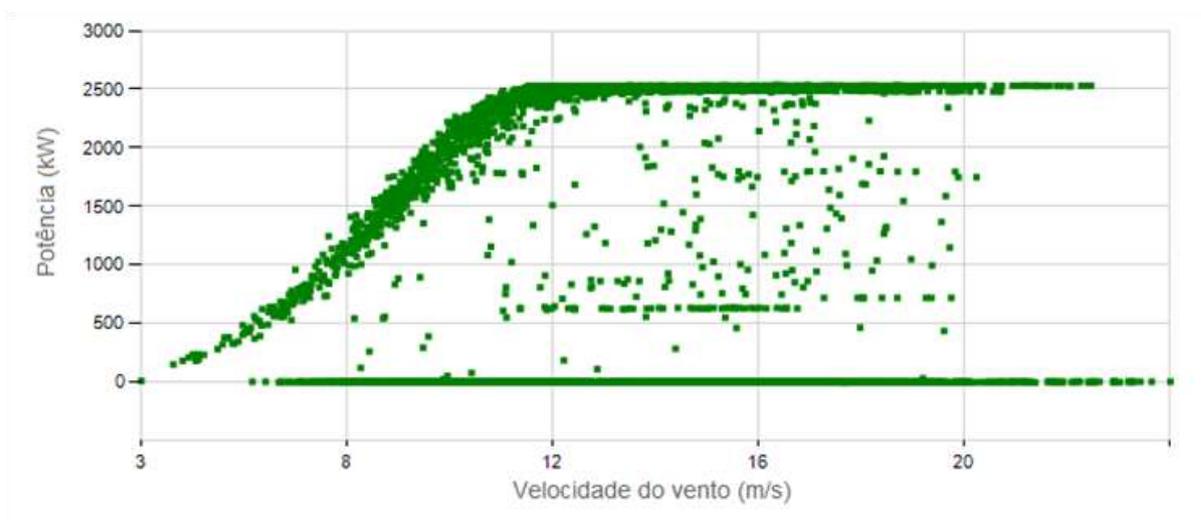


Fonte: Próprio autor.

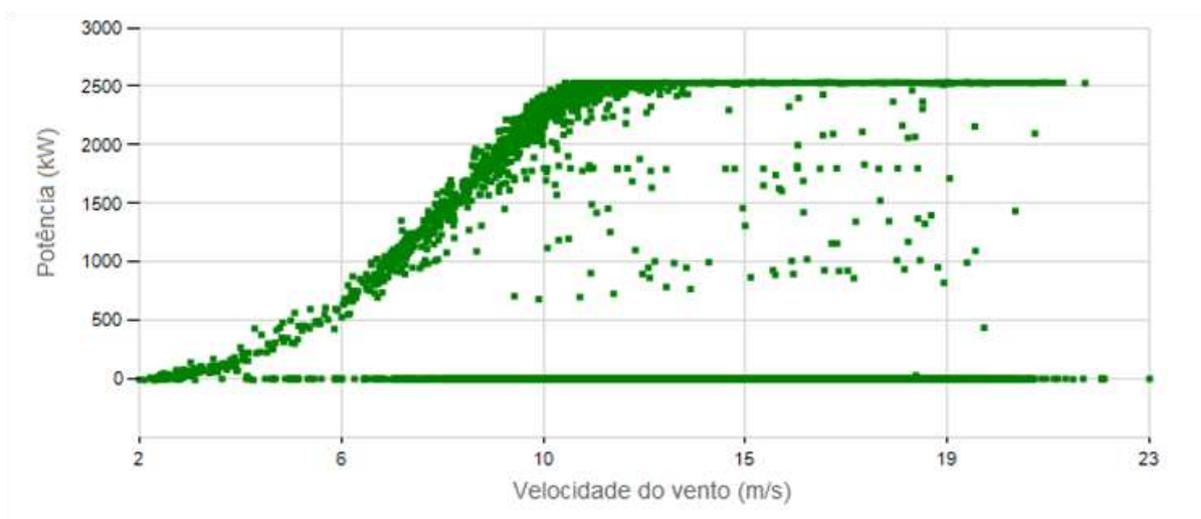
Em julho/22, houve 339,75 MWh de perda de energia, há a presença de falhas decorrentes da vibração mecânica da base do gerador e destaca-se a ocorrência da anomalia do sistema de orientação das pás, ocasionando 54,08% da perda de geração mensal.

Figura 20 - Curva de potência do Aerogerador 2: agosto.

(a) agosto/21.



(b) agosto/22.



Fonte: Próprio autor.

Em agosto de 2021 houve perda de 446,13 MWh, destacam-se as falhas de vibração da base do gerador, com 3,83% da perda de geração; e de reparo, com 79,68% da perda, decorrente da atuação da equipe de operação e manutenção na máquina. Já para agosto de 2022, a perda de geração foi de 1.415,57 MWh, observa-se que a atividade de reparo também foi o maior causador da perda, com 97,35%, eventos de vibração da torre e do sistema de orientação geraram 0,94% de perda.

4.1.1.3 Aerogerador 3

Analogamente às análises anteriores, observa-se na Figura 21 a curva s do Aerogerador 3 (setembro/20 a agosto/22).

Figura 21 - Curva de potência do Aerogerador 3: setembro/20 a agosto/22.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 5 é apresentado o coeficiente de determinação para os meses estudados.

Tabela 5 - Coeficiente de determinação mensal do Aerogerador 3.

Mês	Média do Coeficiente de Determinação (R²)	Quantidade de Falhas	Perda de Energia (MWh)
janeiro	0,83	37	37,08
fevereiro	0,91	16	28,28
março	0,82	23	21,28
abril	0,79	73	160,10

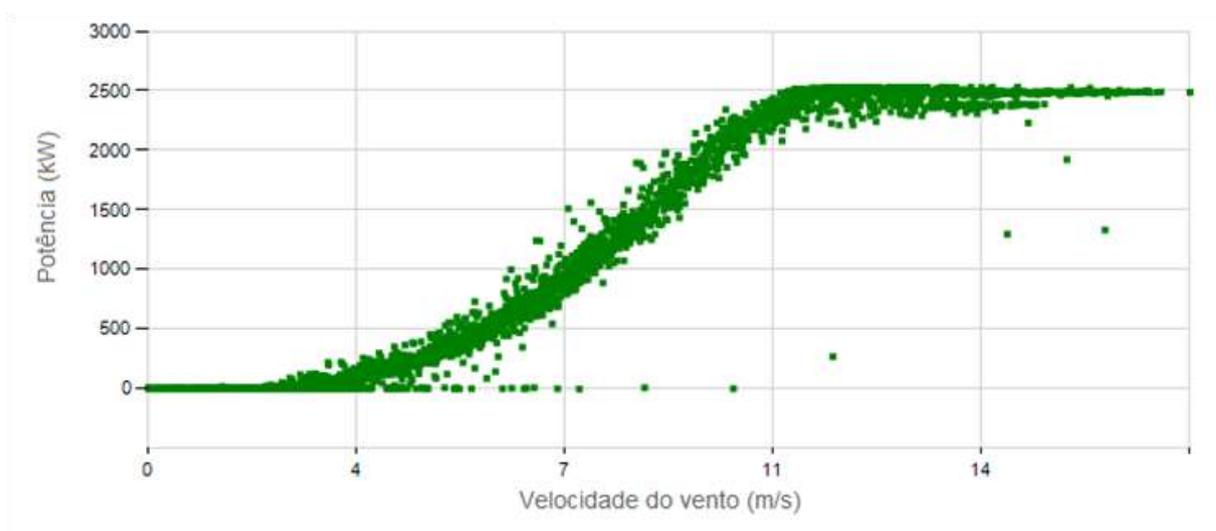
maio	0,80	30	2.579,18
junho	0,76	55	737,84
julho	0,55	113	622,05
agosto	0,36	88	2.296,05
setembro	0,66	48	114,41
outubro	0,81	78	249,43
novembro	0,89	24	626,66
dezembro	0,86	29	391,24

Fonte: Próprio autor.

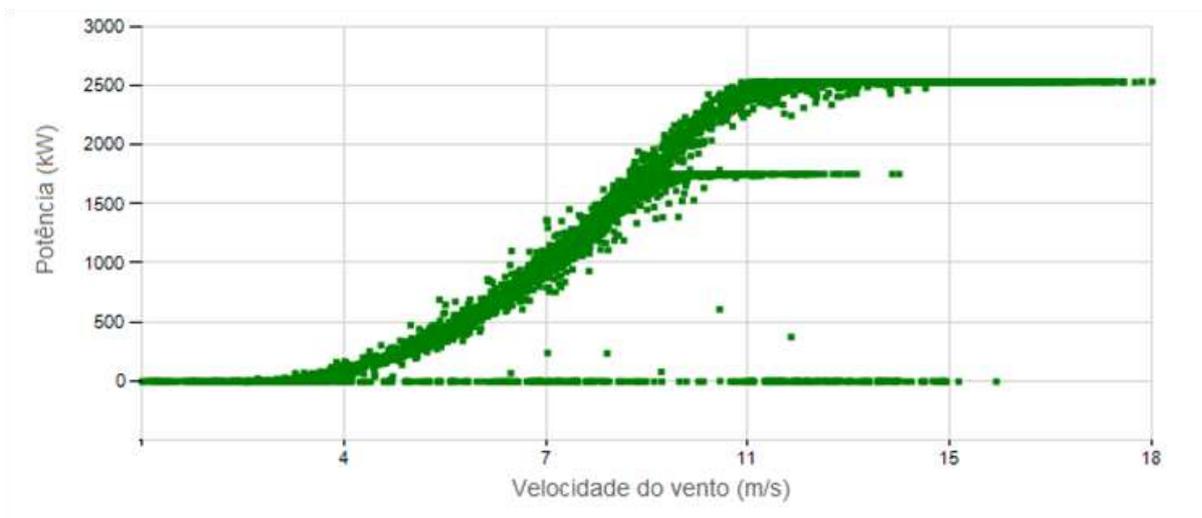
Os meses de fevereiro e novembro apresentam um bom desempenho das suas curvas de potência, cujo R^2 é de 91% e 89%, respectivamente. Nas Figuras 22 e 23 são exibidos os seus respectivos comportamentos.

Figura 22 - Curva de potência do Aerogerador 3: fevereiro.

(a) fevereiro/21.



(b) fevereiro/22

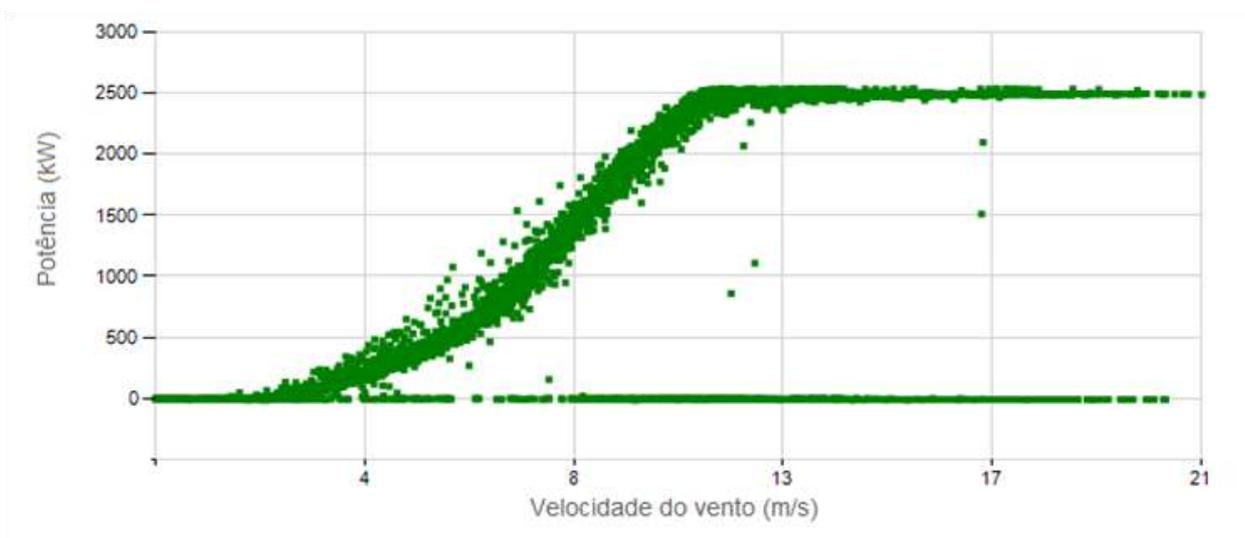


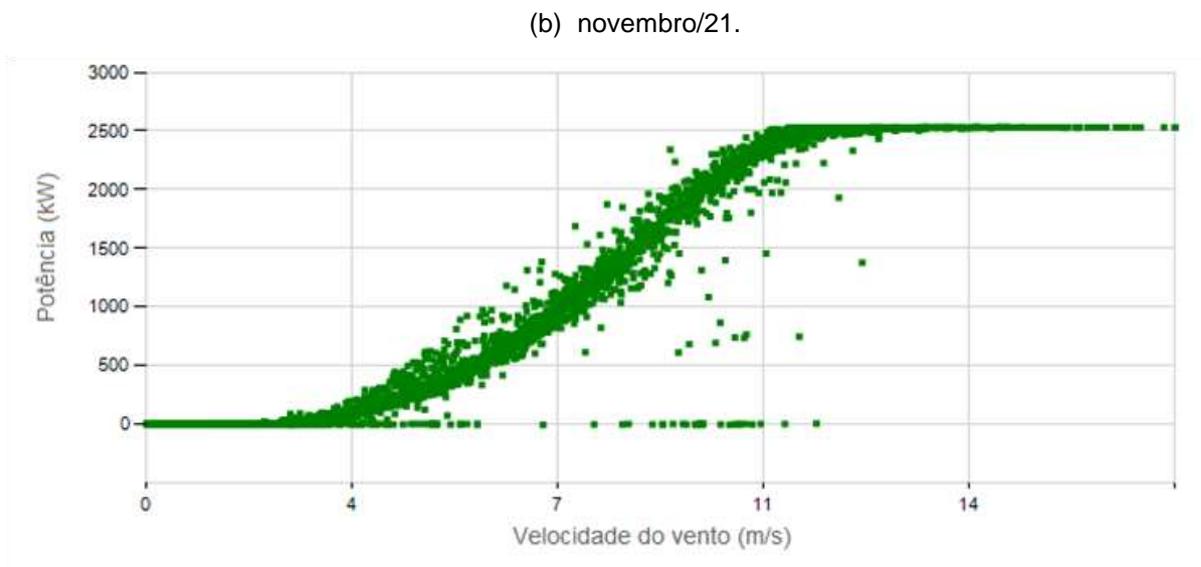
Fonte: Próprio autor.

O mês de fevereiro/21 obteve uma perda de energia de 1,54 MWh, as principais falhas que ocasionaram essa perda estão relacionadas ao teste de freio da turbina e atividades de manutenção. Em fevereiro/22 ocorreu a perda de 26,74 MWh, no qual 80,59% da perda foi devido a fusíveis queimados, falhas de comunicação do conversor e atividades de reparo também impactaram.

Figura 23 - Curva de potência do Aerogerador 3: novembro.

(a) novembro/20.





Fonte: Próprio autor.

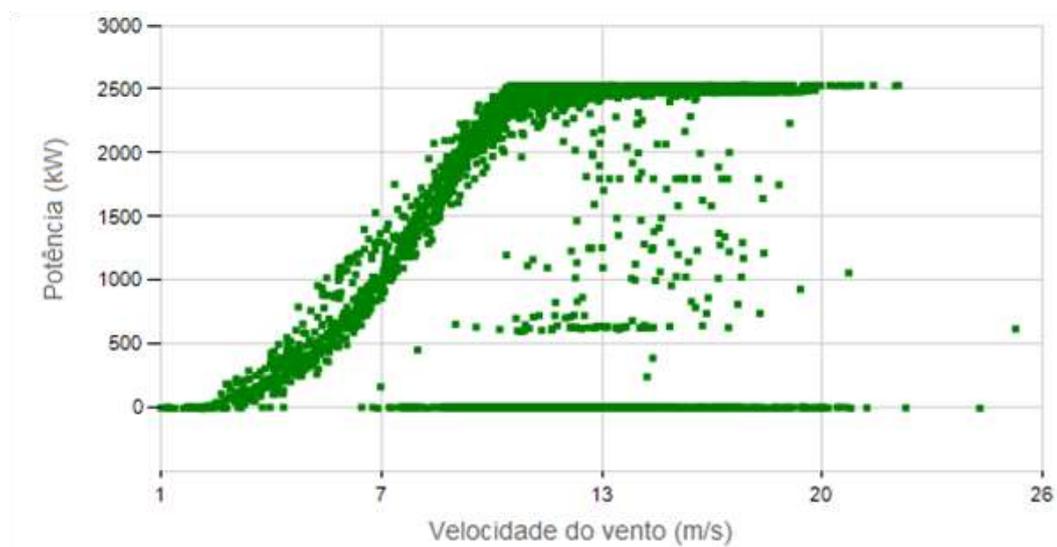
Em novembro/20 houve a perda de geração de 612,42 MWh, ressalta-se que a atividade para reparo foi a que gerou mais impacto, com 99,78% da perda, os outros eventos existentes estão relacionados a vibração da torre e baterias de pitch. Para novembro/21, tem-se a perda de 14,24 MWh de energia, tendo como principal impacto a anomalia relacionada aos carregadores de bateria da *pitch*, com 36,66% da perda mensal, também há a presença de eventos de falha na comunicação do conversor, vibração da base do gerador e angulação das pás.

Para os meses com menores coeficientes de determinação, observou-se que julho apresentou um valor médio do R^2 de 0,55 e agosto, com 0,36. Nas Figura 24 e 25 são apresentados o comportamento das curvas de potência do aerogerador 3 durante o período de julho e agosto, respectivamente.

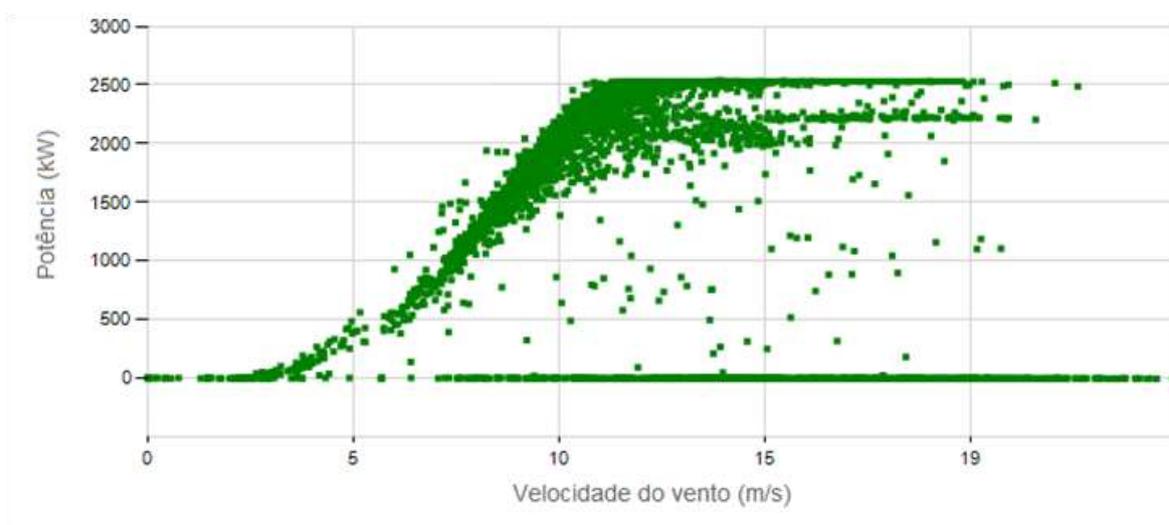
Para julho/21 tem-se a perda de geração de 324,35 MWh, ressalta-se que 39,99% dessa perda é decorrente da anomalia na nacelle, no qual a mesma se movimenta sem o controle de direcionamento, outros eventos tão ocorreram: queima de fusíveis, vibração da torre, mal funcionamento no filtro da gearbox e atividades de reparo.

Figura 24 - Curva de potência do Aerogerador 3: julho.

(a) julho/21.



(b) julho/22.

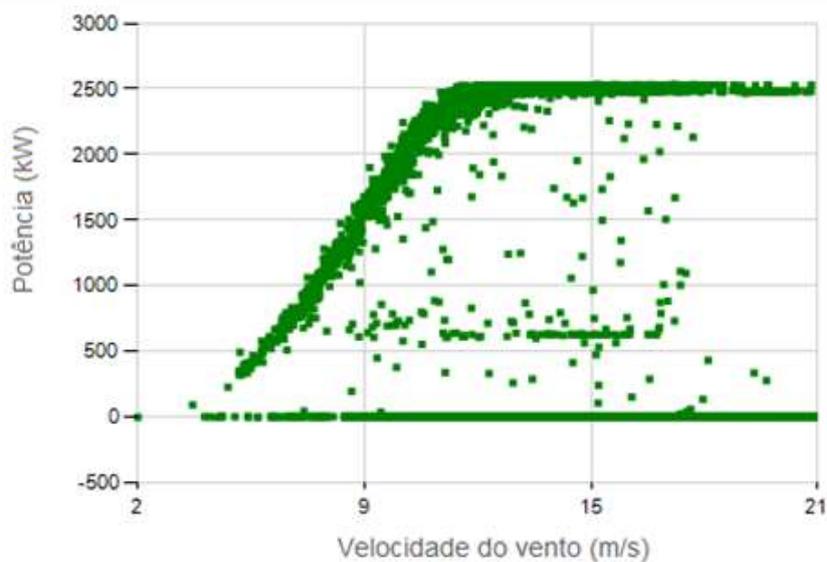


Fonte: Próprio autor.

Em julho/22 obteve uma perda de 297,70 MWh de energia, tem-se que 86,03% da perda mensal é devido ao evento de controle de orientação das pás, também observou falhas relacionadas a vibração mecânica do aerogerador, acarretando em 3% das perdas; a atividade para reparo dessas anomalias também impactou.

Figura 25 - Curva de potência do Aerogerador 3: agosto.

(a) agosto/21.



(b) agosto/22.



Fonte: Próprio autor.

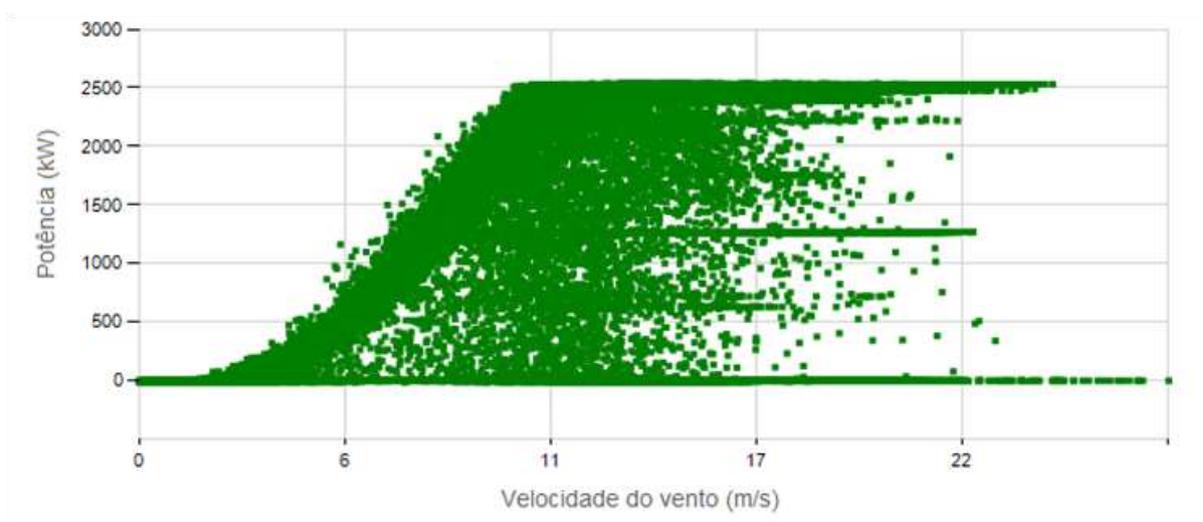
No mês de agosto/21 houve uma perda de 745,47 MWh, destaca-se o evento na nacele, devido a movimentação sem o controle de direcionamento, impactando em 73,21% da perda de geração, outras anomalias de queima de fusíveis, vibração da base do gerador e atividades de manutenção também ocorreram nesse mês. Para agosto/22, há uma perda de geração de 1.550,58 MWh, destaca-se que a turbina ficou muito tempo na atividade de reparo, impactando em 92,73% da perda de energia,

atividades resultantes das falhas do sistema de orientação das pás, acarretando em uma perda de 3,72%, além de anomalia devido a queima de fusíveis e manutenção.

4.1.1.4 Aerogerador 4

Na Figura 26 é apresentado a curva de potência do Aerogerador 4 (setembro/20 a agosto/22).

Figura 26 - Curva de potência do Aerogerador 4: setembro/20 a agosto/22.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 6 é apresentado o coeficiente de determinação para os meses estudados.

Tabela 6 - Coeficiente de determinação mensal do Aerogerador 4.

Mês	Média do Coeficiente de Determinação (R²)	Quantidade de Falhas	Perda de Energia (MWh)
janeiro	0,74	24	165,9

fevereiro	0,83	15	111,15
março	0,68	15	48,96
abril	0,72	37	107,66
maio	0,46	44	219,2
junho	0,43	32	193,21
julho	0,42	91	137,83
agosto	0,21	52	206,20
setembro	0,56	16	26,71
outubro	0,71	46	191,05
novembro	0,79	39	9,22
dezembro	0,75	22	8,47

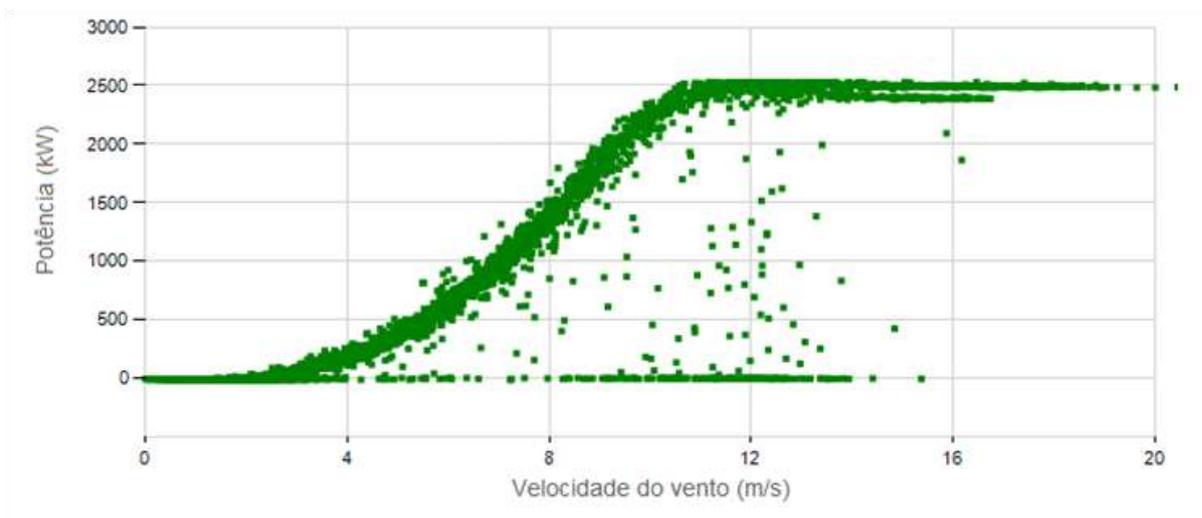
Fonte: Próprio autor.

Os meses de fevereiro e novembro apresentam um maior R^2 , com 83% e 79%, respectivamente, havendo então, menores desvios da curva de saída. Nas Figuras 27 e 28 são observados os comportamentos das curvas do aerogerador 4, durante esses períodos.

Foi possível verificar que em fevereiro/21 houve uma perda de geração de 7,40 MWh, tem-se que 91,35% dessa perda é decorrente do evento de teste de freio; falhas de comunicação do conversor e atividade de manutenção também foram verificadas. Em fevereiro/22 verificou-se a perda de energia de 103,75 MWh, sendo o principal ofensor decorrente do sistema de *pitch* (47,88% da perda de geração), falhas de comunicação com o conversor e atividades de reparo e manutenção também foram observadas.

Figura 27 - Curva de potência do Aerogerador 4: fevereiro.

(a) fevereiro/21.



(b) fevereiro/22.



Fonte: Próprio autor.

O mês de novembro/21 obteve uma perda de 3,97 MWh, verificou-se que ocorreram eventos relacionados ao sistema de pitch e de teste frio, sendo que a falha de sistema de pitch impactou em 55,24% da perda mensal. Já em novembro/22, houve uma perda de 5,25 MWh, a partir da ocorrência de evento de conversor.

Figura 28 - Curva de potência do Aerogerador 4: novembro.

(a) novembro/20.



(b) novembro/21.



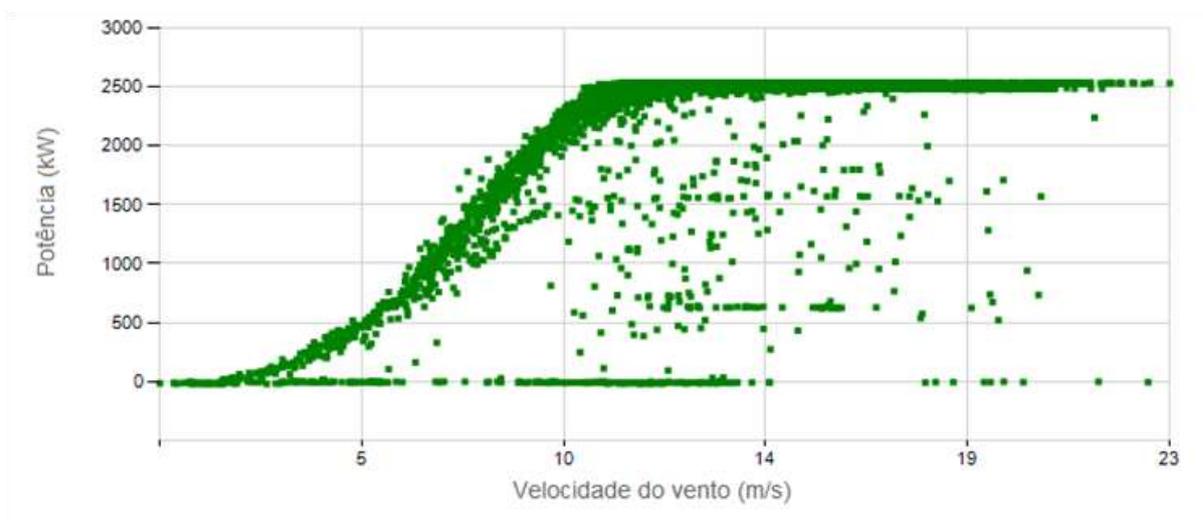
Fonte: Próprio autor.

Para os meses com menores coeficientes de determinação, destaca-se os meses de julho, com R^2 de 42% e agosto, com 21%. Os comportamentos da curva s, durante esses intervalos de tempo, são apresentados nas Figuras 29 e 30.

Em julho/21 ocorreu uma perda de 22,98 MWh, foi possível verificar que 36,16% dessa perda foi consequência do evento de proteção de motor ou fusível, destaca-se também a falha de vibração da base do gerador, acarretando em 25,33% da perda; anomalias relacionadas a comunicação no conversor e vibração da torre também ocorreram nesse mês.

Figura 29 - Curva de potência do Aerogerador 4: julho.

(a) julho/21.



(b) julho/22.



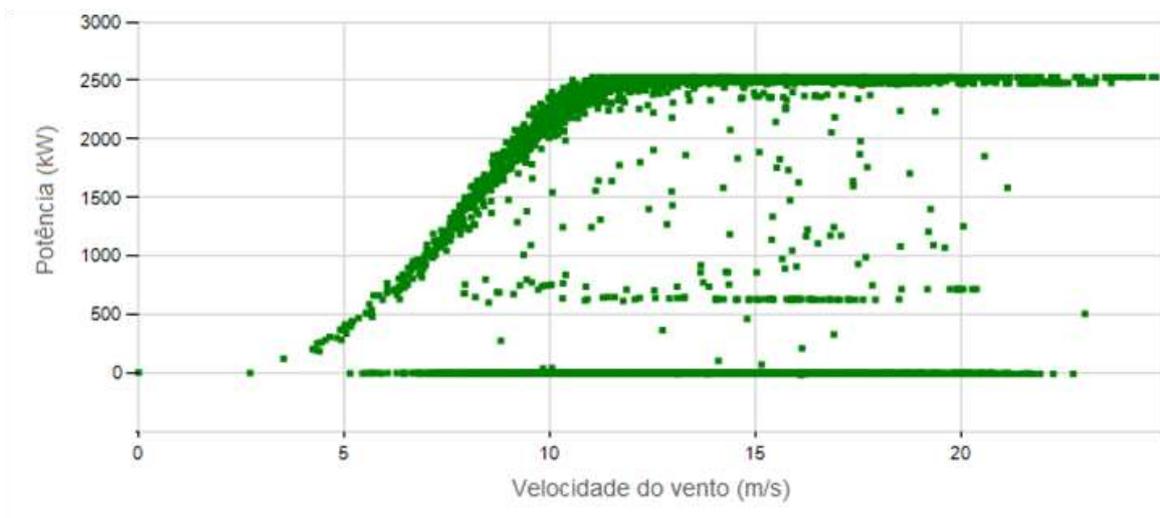
Fonte: Próprio autor.

Para o mês de julho/22 houve uma perda de 114,85 MWh, o evento do sistema de orientação das pás impactou 51,13% dessa perda de energia, falhas de vibração (da torre e base do gerador) também foram observadas, gerando 15,56% de indisponibilidade, além de outros eventos.

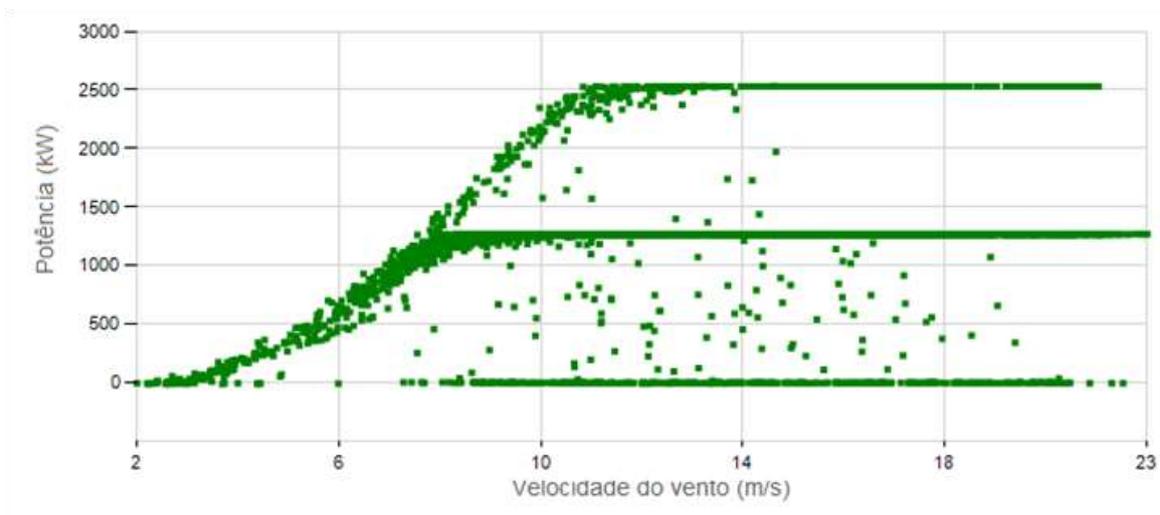
O mês de agosto/21 obteve uma perda de 102,16 MWh, ocorrendo anomalias de vibração mecânica do aerogerador, acarretando em 6,92% das perdas de geração; destaca-se que as atividades de manutenção e reparo foram as que provocaram maior indisponibilidade neste mês.

Figura 30 - Curva de potência do Aerogerador 4: agosto.

(a) agosto/21.



(b) agosto/22.



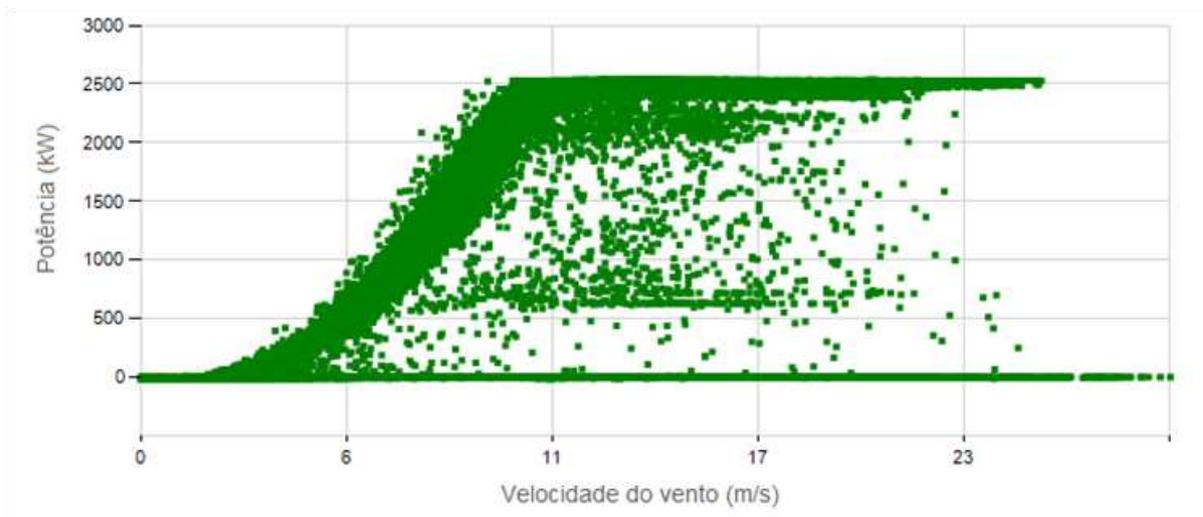
Fonte: Próprio autor.

Em agosto/22 foi verificado uma perda de 104,04 MWh, tem-se que 80,81% dessa perda de geração é decorrente do sistema de orientação das pás; eventos de vibração mecânica, subtensão e manutenção também foram recorrentes. É importante ressaltar, que para esse mês de agosto/22, devido a alta ocorrência da falha de orientação das pás, tem-se que o sistema não consegue captar as leituras necessárias para realizar a redução dos esforços na turbina e automaticamente, devido a essa anomalia, o aerogerador é limitado, performando com a potência abaixo da nominal, como forma de proteção. Nota-se a limitação em 50%, ou seja, a turbina passou a gerar, aproximadamente, 1,3MW.

4.1.1.5 Aerogerador 5

De maneira similar aos cenários anteriores, é apresentado na Figura 31 a curva do Aerogerador 5 (setembro/20 a agosto/22).

Figura 31 - Curva de potência do Aerogerador 5: setembro/20 a agosto/22.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 7 é apresentado o coeficiente de determinação para os meses estudados. Como meses de maiores desempenhos avaliados, a partir da obtenção do coeficiente de determinação, tem-se que os meses de fevereiro e novembro apresentaram um R^2 de 0,83 e 0,79, respectivamente.

Tabela 7 - Coeficiente de determinação mensal do Aerogerador 5.

Mês	Média do Coeficiente de Determinação (R²)	Quantidade de Falhas	Perda de Energia (MWh)
janeiro	0,78	11	6,88
fevereiro	0,93	9	51,75
março	0,73	7	19,87
abril	0,74	25	18,52
maio	0,67	38	148,85
junho	0,63	16	206,11
julho	0,45	37	313,43
agosto	0,33	43	70,88
setembro	0,56	24	79,44
outubro	0,73	24	43,85
novembro	0,81	12	7,39
dezembro	0,80	20	6,72

Fonte: Próprio autor.

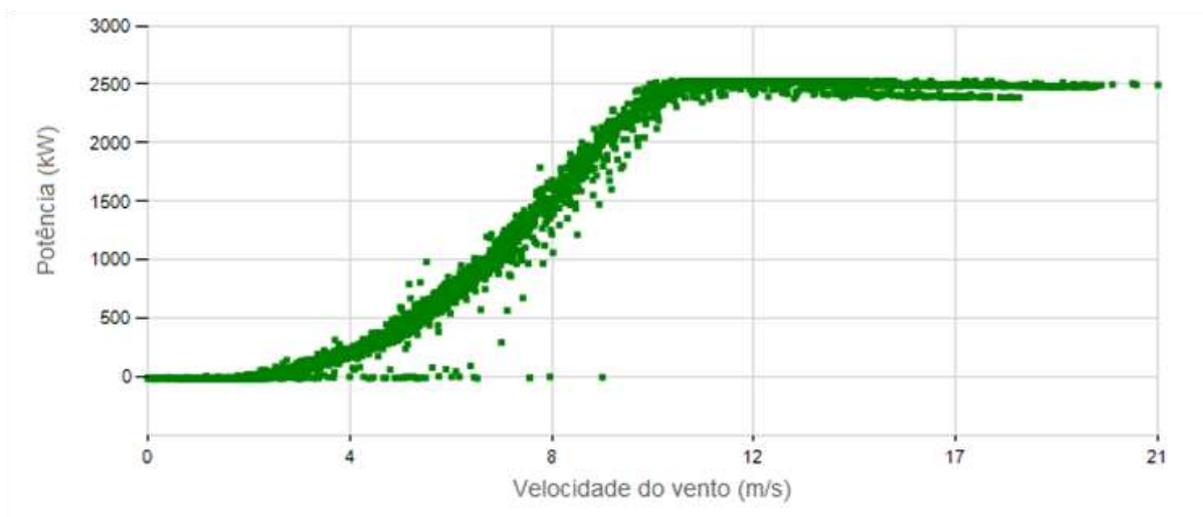
Nas Figuras 32 e 33 são apresentadas as curvas de potência durante esses meses de maior R².

No mês de fevereiro/21 ocorreu uma perda de energia de 1,85 MWh, destaca-se que a falha de bateria de uma das pás gerou uma perda de 42,16%, anomalias de comunicação do conversor e teste de freio também foram observadas. O mês de fevereiro/22 obteve uma perda de 49,90 MWh, de maneira similar ao ano anterior, também teve como principal ofensor a anomalia de baterias de em uma das pás do

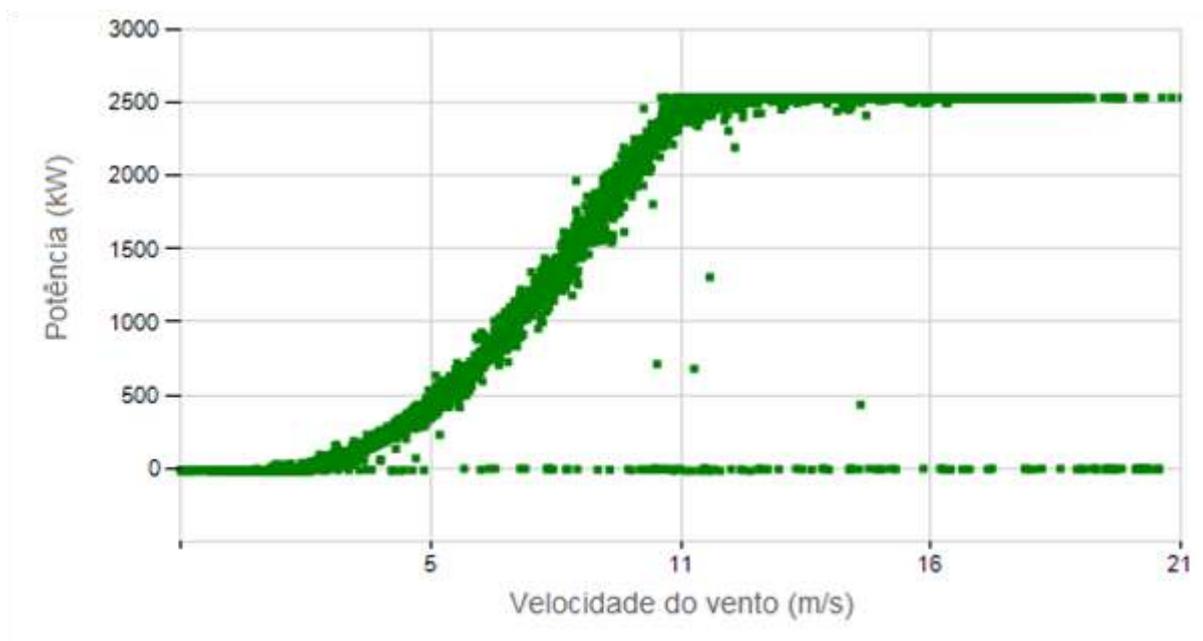
aerogerador, impactando em 78,98% da perda de geração; falhas de comunicação do conversor e atividade também ocorreram nesse mês.

Figura 32 - Curva de potência do Aerogerador 5: fevereiro.

(a) fevereiro/21.



(b) fevereiro/22.



Fonte: Próprio autor.

Em novembro/20 o aerogerador perdeu uma geração de 3,83 MWh, tendo como principal impacto a atividade de manutenção, acarretando em 45,69% de indisponibilidade, eventos de vibração da torre e bateria das pás também impactaram.

Figura 33 - Curva de potência do Aerogerador 5: novembro.

(a) novembro/20.



(b) novembro/21.



Fonte: Próprio autor.

Já em novembro/21 obteve uma perda de 3,56 MWh, sendo o principal ofensor a falha de comunicação do conversor, gerando 59,83% dessa perda de geração, atividade de manutenção e reparo também foi observado.

Os meses de julho e agosto apresentaram um menor coeficiente de determinação, de 0,45 e 0,33, respectivamente. Nas Figuras 34 e 35 são apresentados os comportamentos da curva s do aerogerador 5.

Figura 34 - Curva de potência do Aerogerador 5: julho.

(a) julho/21.



(b) julho/22.



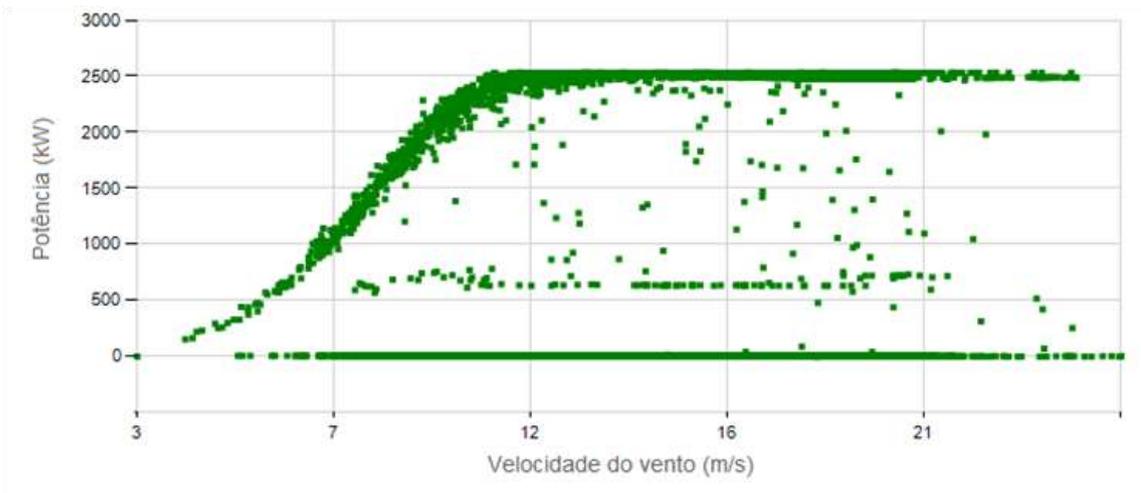
Fonte: Próprio autor.

Para o mês de julho/21 foi observado uma perda de geração de 14,88 MWh, tendo como principais ofensores: evento de comunicação do conversor (17,61% da perda), falha de vibração mecânica (16,13% da perda), anomalia de teste de freio (9,54% da perda) e eventos de baterias das pás e atividade de manutenção. Já em

julho/22, houve uma perda de 298,55 MWh, tem-se que o evento do sistema de orientação das pás impactou em 60,80% da perda de geração, assim como falhas de carregador de bateria das pás, acarretando em 34,25% da perda; eventos de vibração mecânica (1,88% da perda) e atividade de reparo também impactaram.

Figura 35 - Curva de potência do Aerogerador 5: agosto.

(a) agosto/21.



(b) agosto/22.



Fonte: Próprio autor.

Em agosto/21 houve uma perda de 21,12 MWh, com 69,36% das perdas relacionadas à atividade de manutenção, destaca-se também que 15,01% dessas perdas foram decorrentes de vibração mecânica; outras falhas de comunicação do conversor e baterias das pás também foram verificadas. Para agosto/22 foi possível

verificar uma perda de 49,76 MWh, tem-se que o sistema de orientação das pás impactou em 51,61% das perdas, assim como atividades de manutenção e reparo, com 35,73% das perdas; foi observado também falhas de vibração mecânica (6,19% das perdas) e comunicação do conversor.

4.1.2 Análises em cada cenário de estudo

Ao comparar o coeficiente de determinação com a perda de energia mensal, para cada cenário avaliado é possível concluir que o parâmetro R^2 não está relacionado a uma maior ou menor perda de energia, já que quando o aerogerador não está em operação, decorrente de falhas e manutenções, a geração é zero e o R^2 depende diretamente da variação da geração, a partir dos desvios existentes. Dessa maneira, verificou-se que o coeficiente de determinação está relacionado a um mal comportamento da curva de potência, devido aos desvios da potência de saída.

4.2 Correlação entre velocidade média do vento e desvios da curva s

Sabendo que a velocidade do vento é um parâmetro importante para a análise do estudo, foi extraída a velocidade média do vento dos aerogeradores de 1 a 5, durante os meses de julho e agosto de 2022, meses que obtiveram maiores desvios do comportamento da curva de potência. Todos os dados foram coletados do SCADA.

Considerando que as turbinas são inseridas em localizações diferentes, devido a análise de implementação do projeto, também foi observado o desempenho de mais cinco turbinas do complexo, nomeadas de aerogerador 6 a 10, com o objetivo de comparar o comportamento da velocidade média do vento, no mesmo período de tempo analisado. Foram obtidos os dados de velocidade média do vento e o coeficiente de determinação das curvas de potência, de cada turbina.

Ao observar os comportamentos das curvas de potência dos cinco cenários avaliados e relacionar com os eventos registrados, foi verificado que para todos os casos, os meses com menor coeficiente de determinação obtiveram falhas relacionadas à vibração, ou seja, houve um esforço relevante nas estruturas mecânicas das turbinas. Essas falhas são decorrentes de uma maior velocidade de

vento que atinge o aerogerador, ocasionando impactos em seus componentes. Na tabela 8 é apresentada a velocidade média do vento dos aerogeradores de 1 a 5, durante o período de julho e agosto de 2022, ressalta-se que esses meses obtiveram um menor R^2 .

Tabela 8 - Velocidade média do vento dos aerogeradores.

Turbina	Julho/22		Agosto/22	
	Velocidade média do vento (m/s)	Coefficiente de determinação (R^2)	Velocidade média do vento (m/s)	Coefficiente de determinação (R^2)
Aerogerador 1	12,19	0,50	12,72	0,56
Aerogerador 2	12,20	0,45	13,18	0,52
Aerogerador 3	11,98	0,50	13,80	0,32
Aerogerador 4	12,72	0,36	13,13	0,14
Aerogerador 5	12,85	0,43	13,61	0,47

Fonte: Próprio autor.

Também foi obtido os mesmos parâmetros para outras cinco turbinas do complexo, aerogeradores 6 a 10, a fim de verificar o comportamento da velocidade média do vento e o índice de R^2 . Na tabela 9 é observado os parâmetros avaliados.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que, os aerogeradores de 1 a 5 obtiveram menores valores do coeficiente de determinação, a partir da alta velocidade média do vento, durante o período crítico de julho e agosto/22, interferindo diretamente no desempenho das curvas de potência das turbinas.

Tabela 9 - Velocidade média do vento dos aerogeradores.

Turbina	Julho/22		Agosto/22	
	Velocidade média do vento (m/s)	Coefficiente de determinação (R ²)	Velocidade média do vento (m/s)	Coefficiente de determinação (R ²)
Aerogerador 6	9,39	0,81	9,38	0,82
Aerogerador 7	9,76	0,80	9,75	0,83
Aerogerador 8	10,29	0,71	10,60	0,80
Aerogerador 9	10,16	0,71	10,51	0,75
Aerogerador 10	10,24	0,72	10,13	0,80

Fonte: Próprio autor.

Já para os aerogeradores de 6 a 10, que obtiveram uma menor velocidade média de vento, o R² se aproximou de um, ou seja, a potência de saída real não gerou desvios significativos, performando, então, similar a curva de referência.

4.2.1 Monitoramento da velocidade do vento

Sabendo que o Aerogerador 4 apresentou um menor coeficiente de determinação para os meses de julho e agosto, de 36% e 14%, respectivamente, foi verificado o registro do monitoramento dos parâmetros da curva de potência, velocidade média do vento e potência ativa, com o objetivo de observar o comportamento da potência na ocorrência do valor médio máximo da velocidade do vento. Com isso, é possível acompanhar o comportamento de geração à medida que ocorrem oscilações bruscas de velocidade.

No dia 03 de julho de 2022 houve o registro da maior velocidade do vento mensal com o valor de 23 m/s; como apresentado anteriormente, julho tem uma velocidade média de 12,72 m/s. Na tabela 10 é apresentado o monitoramento da geração do dia 03 de julho, em alguns horários.

Tabela 10 - Monitoramento dos dados registrados para o aerogerador 4, durante o dia 03/07/2022.

Tempo	Velocidade do vento (m/s)	Potência (kW)
03/07/2022 05:50	21	931
03/07/2022 08:20	23	480
03/07/2022 13:50	13	1053
03/07/2022 19:20	11	2488
03/07/2022 23:20	12	2252

Fonte: Próprio autor.

A partir desse acompanhamento, tem-se a conclusão que à medida que há um aumento intenso da velocidade do vento ocorre uma redução na capacidade de geração do aerogerador. Ressalta-se que o monitoramento também foi realizado para os outros cenários, sendo válida a mesma consideração.

4.2.2 Sistema de controle de orientação das pás

Devido a grande ocorrência da vibração do aerogerador, foi verificado que o posicionamento dos sensores não estavam conforme o previsto, de 5 a 7mm do rotor, fazendo, então, com que houvesse a falha nas suas respectivas leituras e conseqüentemente, interferindo no controle de orientação das pás. Como forma de solução para o problema tratado, é considerada a realização imediata dos ajustes dos sensores.

4.3 Performance

Sendo verificado discrepâncias significativas, maiores que 5%, da energia gerada, quando comparada à energia esperada, impactando diretamente na curva de potência das turbinas, foram analisados três cenários de subperformance, a partir de

agora denominados de aerogeradores 11 a 13, e três cenários e sobreperformance, denominados aerogeradores 14 a 16.

Para esses casos foram considerados gráficos de linha da curva de potência dos aerogeradores, obtendo, então, uma melhor visualização do comportamento da curva real e de referência, já que as análises reportam-se à intensidade de geração.

4.3.1 Subperformance

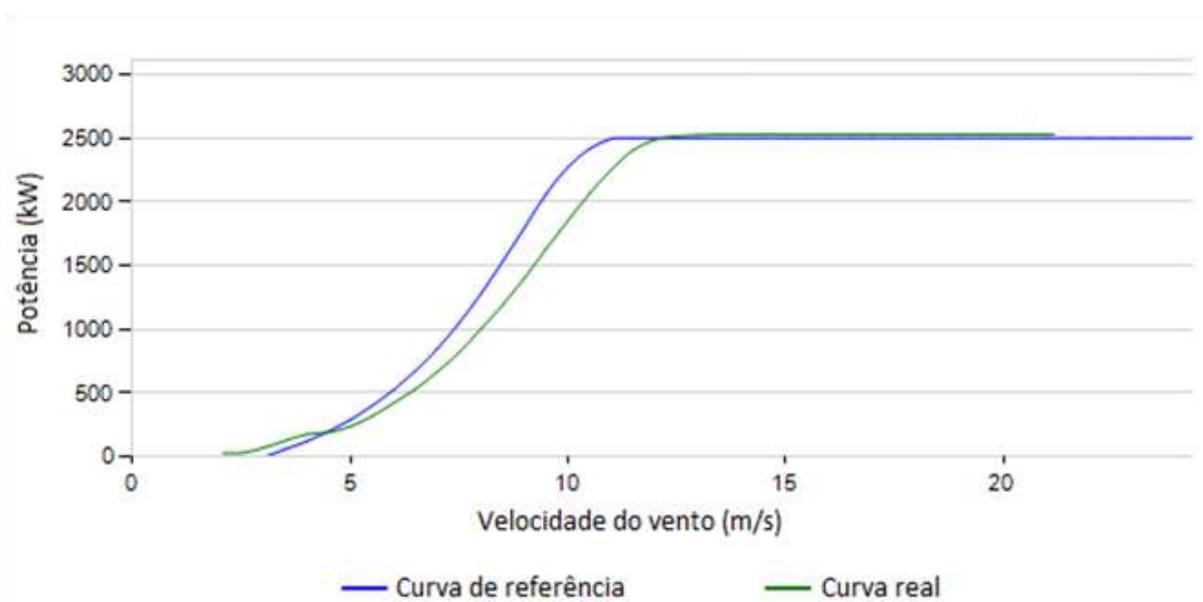
A seguir é apresentado o comportamento do desempenho inferior de três turbinas do complexo e seus impactos.

4.3.1.1 Aerogerador 11

Na Figura 36 é apresentado o comportamento da curva de potência do Aerogerador 11, durante o período estudado (setembro/20 a agosto/22).

Verifica-se, através da curva s, que o aerogerador obtém um comportamento de baixa performance. Na tabela 11 é apresentado as características do seu desempenho.

Figura 36 - Curva de potência do Aerogerador 11 (setembro/20 a agosto/22).



Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 - Parâmetros da performance do Aerogerador 11.

Parâmetros	
Velocidade do vento (m/s)	9,93
Disponibilidade (%)	86,14
Energia produzida (MWh)	23.841,95
Energia esperada (MWh)	31.428,84
Erro de desempenho (kW)	- 7,59
Discrepância da Energia (%)	24,14

Fonte: Próprio autor.

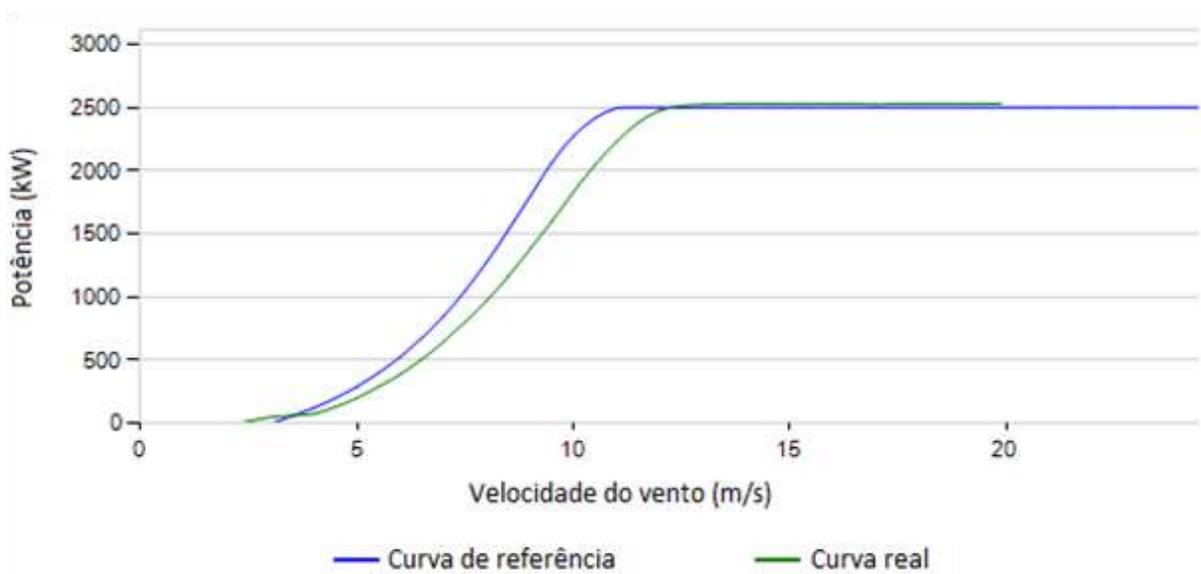
Ao avaliar os eventos ocorridos na turbina, destaca-se que entre os dias 10/02/2021 e 18/05/2021 a turbina ficou parada, ou seja, sem geração. Esse evento foi resultante de uma anormalidade na *gearbox*, sendo necessário a troca do componente; como é uma atividade de alta especificidade, que demanda uma equipe própria e depende das condições ambientais do local, o aerogerador ficou parado durante grande período de tempo, impactando diretamente na sua disponibilidade, de 86,14%. A anormalidade na caixa multiplicadora foi decorrente do desalinhamento com o gerador, causando desgastes irregulares no sistema mecânico de engrenagem. Ressalta-se a redução de 24,14% da energia gerada, quando comparada à produção de energia esperada.

4.3.1.2 Aerogerador 12

Para análise de performance do Aerogerador 12 foi observado o comportamento da sua curva de potência apresentado na Figura 37.

De maneira análoga ao cenário anterior, o aerogerador 12 também ficou parado durante um longo período, afetando a disponibilidade de geração, cujo percentual é de 93,73%.

Figura 37 - Curva de potência do Aerogerador 12.



Fonte: Próprio autor.

Na tabela 12 é apresentado as características do desempenho da turbina:

Tabela 12 - Parâmetros da performance do Aerogerador 12.

Parâmetros	
Velocidade do vento (m/s)	9,71
Disponibilidade (%)	93,73
Energia produzida (MWh)	23.215,44
Energia esperada (MWh)	27.265,08
Erro de desempenho (kW)	- 4,05
Discrepância da Energia (%)	14,85

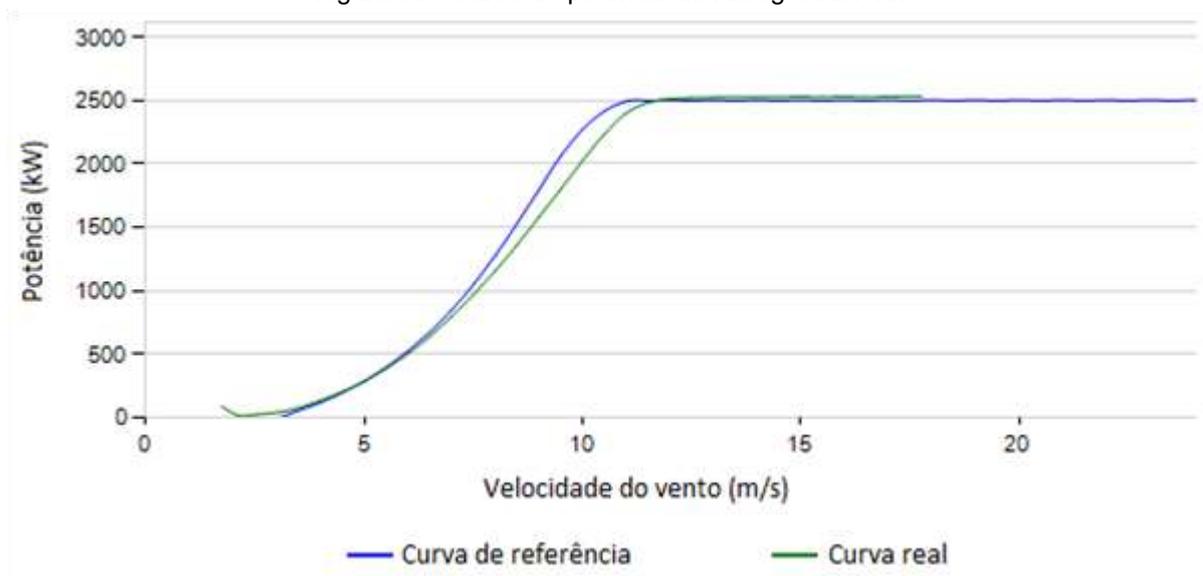
Fonte: Próprio autor.

Do dia 02/10/2021 até o dia 30/12/2021 a máquina não gerou energia devido a necessidade da troca da gearbox. O evento foi decorrente de danos encontrados no engrenamento do primeiro estágio planetário, no qual resultou no rompimento do redutor.

4.3.1.3 Aeroogerador 13

Na Figura 38 observa-se o comportamento da curva de potência do Aeroogerador 13.

Figura 38 - Curva de potência do Aeroogerador 13.



Fonte: Próprio autor.

Visualmente, nota-se que o aerogerador também obtém um comportamento de baixa performance. Na tabela 13 é apresentado as características do seu desempenho:

Tabela 13 - Parâmetros da performance do Aeroogerador 13.

Parâmetros	
Velocidade do vento (m/s)	8,25
Disponibilidade (%)	93,70
Energia produzida (MWh)	21.096,26
Energia esperada (MWh)	24.625,03
Erro de desempenho (kW)	- 3,53
Discrepância da Energia (%)	14,33

Fonte: Próprio autor.

A disponibilidade do aerogerador é de 93,70% para o período avaliado, ao verificar os eventos ocorridos, destaca-se a presença de paradas não programadas, devido a falha de teste de freio da turbina, impactando no seu desempenho, reduzindo 14,33% da energia esperada.

Quando o aerogerador não atua o sistema de freio durante um período de 1400 horas é realizado, automaticamente, um teste do freio secundário, para verificar o seu funcionamento. Após o teste bem sucedido, a turbina é inserida em operação automaticamente, caso contrário, a turbina é parada para reparo. É importante ressaltar que esse teste é uma forma de proteção aos estresses mecânicos de vibração da turbina, com o objetivo de garantir um funcionamento adequado de orientação das pás, para captação de uma melhor angulação em relação a velocidade do vento.

Sendo assim, para esse cenário, verificou a reprovação do teste de freio da turbina, sendo necessário a atuação direta da equipe de operação e manutenção, resultando em horas significativas do aerogerador parado e conseqüentemente impactando na geração.

4.3.2 Sobreperformance

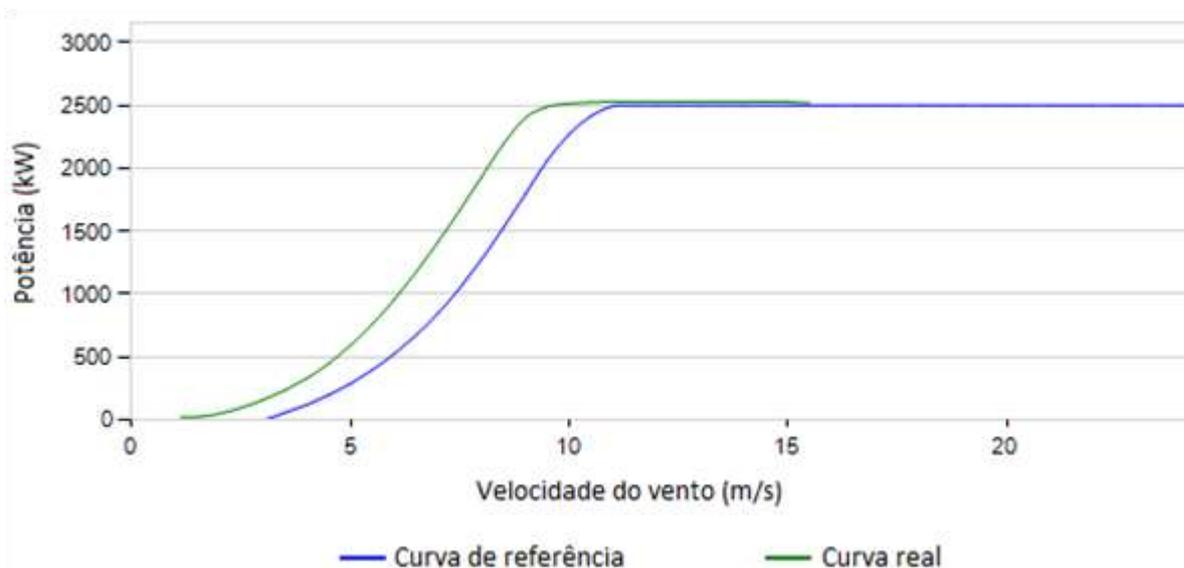
Para o desempenho superior dos aerogeradores, foram observados os seguintes cenários:

4.3.2.1 Aerogerador 14

Ao analisar o desempenho do Aerogerador 14, através da curva de potência, verificou o seu comportamento em sobreperformance, conforme apresentado na Figura 39.

Ao analisar a curva s da turbina e suas respectivas características técnicas, nota-se a relação direta dos dois principais controles existentes no sistema: de pitch e de yaw, no qual há a extração do máximo potencial dos ventos, resultando, então, no aumento de 38,61% da energia gerada.

Figura 39 - Curva de potência do Aerogerador 14.



As características técnicas da turbina são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros da performance do Aerogerador 14.

Parâmetros	
Velocidade do vento (m/s)	6,67
Disponibilidade (%)	96,26
Energia produzida (MWh)	22.244,12
Energia esperada (MWh)	16.048,50
Erro de desempenho (kW)	6,19
Discrepância da Energia (%)	38,61

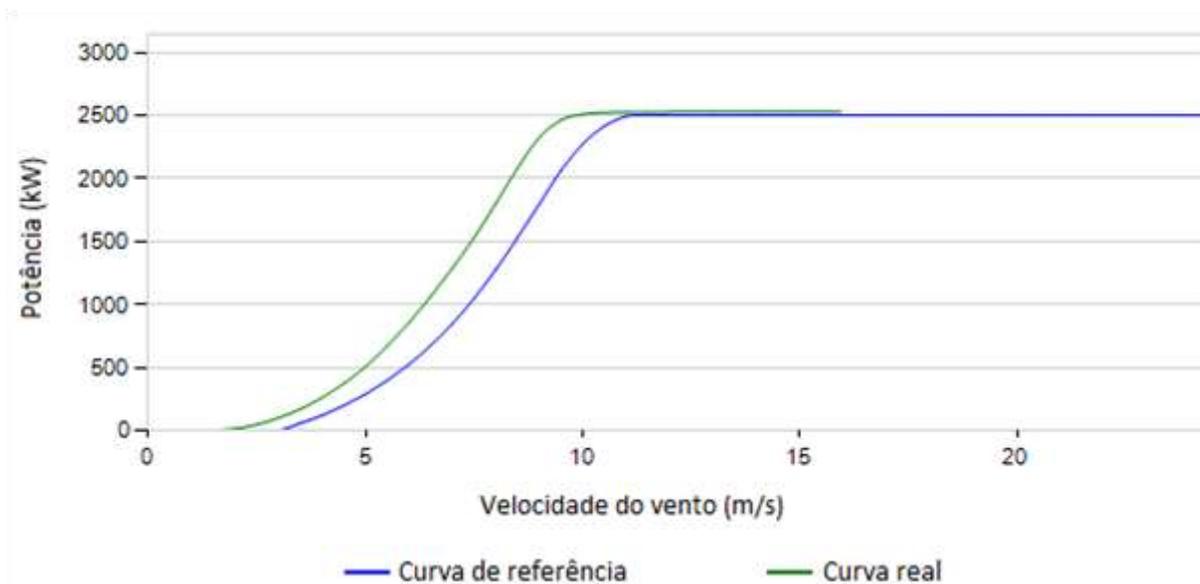
Fonte: Próprio autor.

A partir do controle de pitch, há o ajuste do ângulo das pás em relação ao vento, de modo a direcionar as pás de acordo com a velocidade dos ventos. E, no que se refere ao controle do yaw, tem-se o posicionamento da nacela em relação a direção do vento.

4.3.2.2 Aeroerador 15

Também foi observado o comportamento de sobreperformance no Aeroerador 15, conforme apresentado na Figura 40.

Figura 40 - Curva de potência do Aeroerador 15.



Na Tabela 15 é apresentado os parâmetros de performance da turbina.

Tabela 15 - Parâmetros da performance do Aeroerador 15.

Parâmetros	
Velocidade do vento (m/s)	7,02
Disponibilidade (%)	94,67
Energia produzida (MWh)	22.509,98
Energia esperada (MWh)	18.090,17
Erro de desempenho (kW)	4,42
Discrepância da Energia (%)	24,43

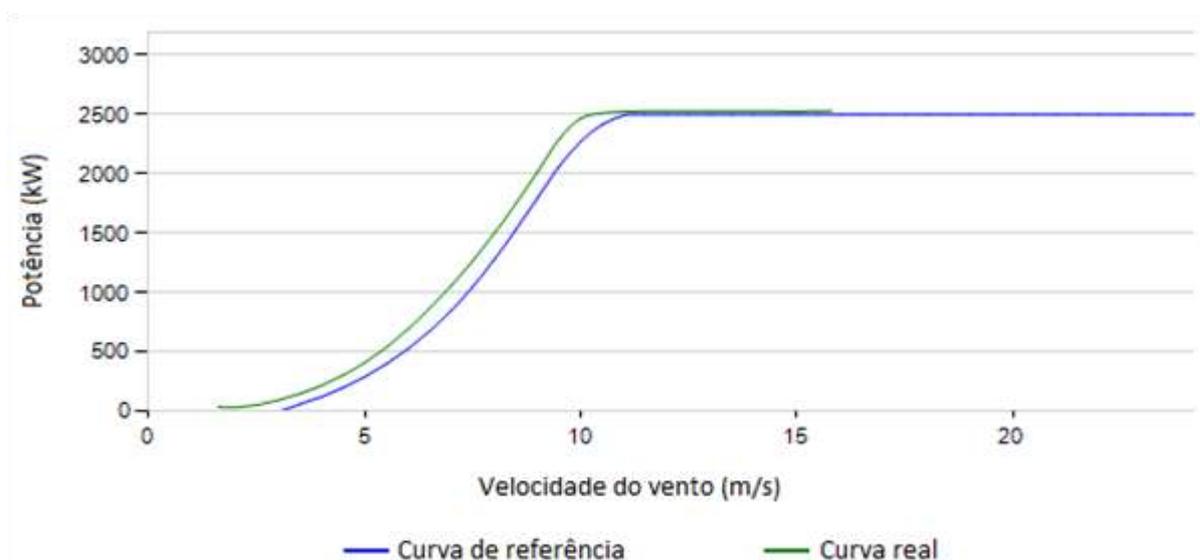
Fonte: Próprio autor.

De maneira análoga ao cenário anterior, também foi avaliado a eficiência dos controles de pitch e yaw, corroborando diretamente na alta performance de geração de energia do aerogerador. Ressalta-se o aumento de 24,43% da energia gerada.

4.3.2.3 Aerogerador 16

A curva de potência do Aerogerador 16 apresenta um comportamento de sobreperformance, conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 - Curva de potência do Aerogerador 16.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 16 é apresentado os parâmetros da turbina 16.

Tabela 16 - Parâmetros da performance do Aerogerador 16.

Parâmetros	
Velocidade do vento (m/s)	8,36
Disponibilidade (%)	99,23

Energia produzida (MWh)	28.077,26
Energia esperada (MWh)	26.510,51
Erro de desempenho (kW)	1,57
Discrepância da Energia (%)	5,91

Fonte: Próprio autor.

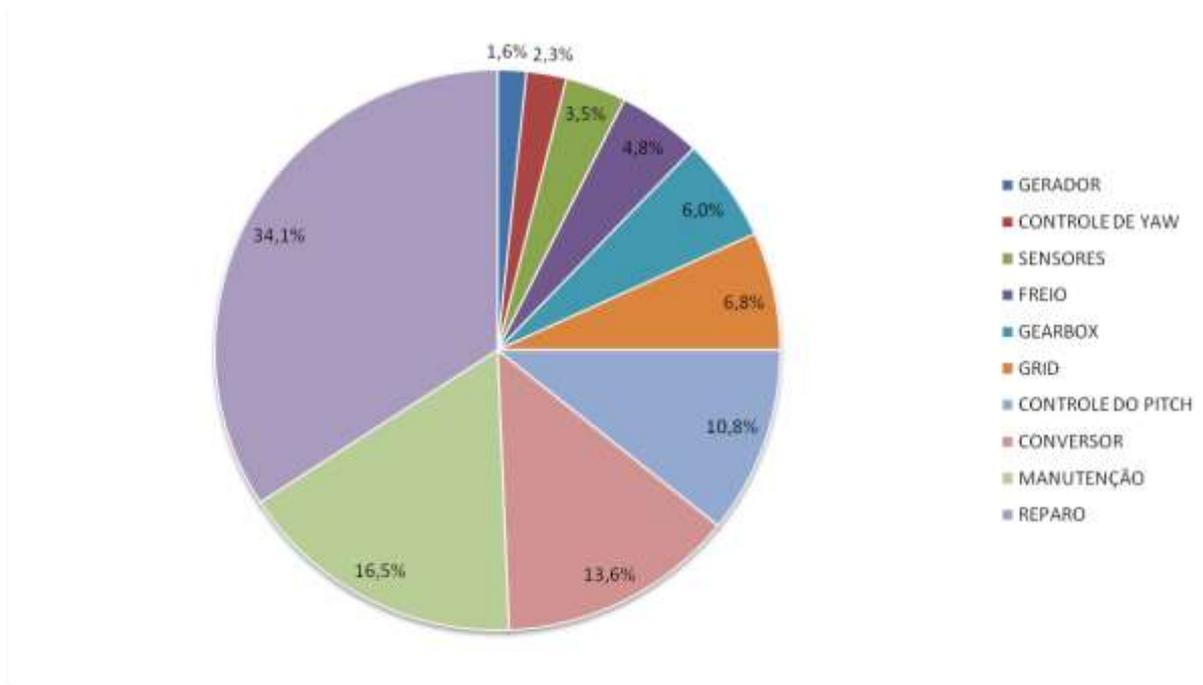
Para esse cenário, é importante ressaltar a disponibilidade de 99,23% da turbina, quando comparado aos cenários anteriores, é possível observar que a mesma esteve mais tempo disponível para produzir energia, ou seja, menos tempo designados a manutenções, reparos e outras falhas.

4.4 Principais eventos de interrupção dos aerogeradores

A partir da obtenção dos registros de eventos existentes em todas as 144 turbinas do complexo, foi gerado um gráfico com os principais ofensores existentes no parque e que influenciaram diretamente na performance da curva de potência dos aerogeradores. As principais anomalias, bem como a proporção em que cada um ocorre, são apresentados na Figura 42.

O evento de reparo refere-se ao tempo de parada na turbina, seja ela programada ou não, devido às atividades corretivas. Como já abordado em cenários anteriores, os Aerogeradores 11 e 12 são exemplos desse ofensor, pois as turbinas ficaram paradas durante um longo período, devido a substituição da gearbox; nesse caso, nota-se o impacto da disponibilidade e performance do complexo devido aos desafios encontrados nas substituições dos componentes da turbina. O segundo maior ofensor, com 16,5%, é decorrente das manutenções, de atividades preventivas ou preditivas, que são necessárias para um bom comportamento do aerogerador.

Figura 42 - Principais Eventos do Complexo Eólico (Set/20 a Agos/22).



Fonte: Próprio autor.

Impactos relacionados ao controle de *pitch*, com 10,8%, de freio, com 4,8% e controle de yaw, com 2,3%, também foram observados nas análises do estudo das curvas de potência, no qual obtém-se um alto peso nas performances dos aerogeradores. Assim como as falhas de conversores, grid, gearbox, sensores e de gerador, causando uma grande indisponibilidade para o complexo.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES

As curvas de potência foram adquiridas através do sistema SCADA de forma a representar o comportamento de 16 turbinas (5 com a presença de anomalias, 5 em estado de funcionamento normal, 3 em superperformance e 3 em sobreperformance). Cada curva foi obtida a partir dos dados registrados de 10 em 10 minutos durante o período de setembro/20 a agosto/22. Os parâmetros técnicos, como: disponibilidade, velocidade do vento, potência ativa, perda de geração, ocorrência e duração de falhas e eventos de manutenções foram observados para avaliação das performances.

Em todos os cenários avaliados foi realizada uma análise comparativa da curva real obtida com a curva de referência de cada aerogerador. Através da utilização do coeficiente de determinação foi verificado a correlação da perda de potência e os desvios dos valores reais da saída da curva s , para os aerogeradores de 1 a 10. Para os aerogeradores de 11 a 16 foi utilizado a análise de desempenho através do erro entre as curvas, de modo a quantificar a subperformance (geração abaixo do esperado) ou sobreperformance (geração acima do esperado) das turbinas.

Ao extrair os eventos existentes no complexo, observou-se a presença da falha do sistema de controle de *pitch* nos aerogeradores de 1 a 5, sendo, então, avaliado os dois meses com maior e menor coeficiente de determinação. Para os cinco cenários foi verificado que os meses de fevereiro e novembro obtiveram um maior R^2 e os meses de julho e agosto possuem um menor R^2 . Ao analisar as ocorrências existentes e perda de energia, é possível concluir que os meses de menor coeficiente apontam eventos do sistema de controle de pás, vibração da base do gerador e vibração da torre; foi possível destacar que o aerogerador 4 (cenário mais crítico) em agosto/22, não houve a captação das leituras corretas do sistema de pás, acarretando em uma limitação da turbina, fazendo, então, com que a mesma performe com uma potência de saída em 50% da nominal. De maneira geral, diante desses cinco cenários avaliados foi possível concluir que o coeficiente de determinação não está relacionado diretamente a uma maior perda de energia e sim a um mau comportamento da curva de potência, devido aos desvios da potência de saída.

Ao analisar também o desempenho dos aerogeradores 6 a 10, foi obtido a velocidade média e o coeficiente de determinação durante os meses de julho e agosto de 2022, sendo possível avaliá-las comparativamente com os cenários anteriores, dos aerogeradores de 1 a 5. Diante disso, foi possível concluir que com a baixa velocidade

média do vento dos aerogeradores de 6 a 10, houve um maior valor do parâmetro R^2 , ou seja, a potência de saída gerou menores desvios na curva de potência, diferentemente do comportamento dos aerogeradores de 1 a 5, que devido a sua localização de projeto há uma maior velocidade média de vento e conseqüentemente há um maior impacto na vibração mecânica das turbinas, gerando, então, maiores desvios na curva s . Ao realizar o monitoramento diário da velocidade do vento do aerogerador 4, tem-se que no dia 03 de julho de 2022 atingiu um valor máximo de velocidade, de 23 m/s; através deste monitoramento foi observado que a medida que há um aumento intenso na velocidade do vento ocorre uma redução na capacidade de geração do aerogerador. Como forma de solucionar a presença do evento do sistema de controle de pás, foi proposto a realização imediata dos ajustes dos sensores indutivos.

No que se refere a performance dos aerogeradores, foi avaliado cenários que tinham discrepâncias significativas, maiores que 5% da energia gerada, ao comparar com a energia esperada. Sendo assim, observou-se que os aerogeradores de 11 a 13 tinham um comportamento de subperformance, no qual os seus desempenhos eram inferiores aos de referência. A baixa performance das turbinas 11 e 12 foram resultantes da troca de um dos grandes componentes: a *gearbox*, impactando em uma grande perda de geração; já o desempenho reduzido do aerogerador 13 é decorrente da falha do sistema de freio, sendo necessário a atuação direta da equipe de manutenção. Ao analisar cenários de sobreperformance, verificou-se que os aerogeradores 14 a 15 geraram mais energia do que o esperado, é possível destacar o bom desempenho dos componentes e controles das turbinas, principalmente aos sistemas de *pitch* e *yaw*, realizando uma maior extração do máximo potencial dos ventos, a partir do ajuste de angulação das pás e do posicionamento da nacele.

E, por fim, foram avaliados os principais sistemas de interrupção dos aerogeradores do complexo eólico (144 turbinas), a partir do registro de eventos durante os dois anos de estudo. Foi possível concluir que as atividades de reparo e manutenção são os principais eventos, ressalta-se que o evento de reparo refere-se ao grande tempo de execução das atividades para solucionar corretivas planejadas ou não planejadas, como verificado nos aerogeradores 11 e 12, tendo a ocorrência da substituição da *gearbox*, como analisado anteriormente. Impactos no sistema de controle de *pitch*, apresentaram 10,8% dos eventos existentes, destaca-se que esse

ofensor ocasiona grandes desvios na curva de potência, como observado nos aerogeradores de 1 a 5, durante os meses de julho e agosto.

Como proposta de trabalhos futuros, considera-se a importância do estudo detalhado das principais falhas no complexo, que causam uma maior perda de energia. Nesse caso, é possível destacar que a falha de conversor é responsável por 13,6% dos eventos do complexo; sendo assim, buscar assimilar a ocorrência dessa falha e seus parâmetros técnicos é essencial para solucionar o terceiro ofensor do complexo e conseqüentemente, aumentar a disponibilidade dos aerogeradores.

REFERÊNCIAS

ALEWINE, K.; CHEN, W. A Review of Electrical Winding Failures in Wind Turbine Generators. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012. Vol. 28, Nº 4.

Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias. Boletim anual 2021.

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPEL. Brasília, 2017.

Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021. Empresa de Pesquisa Energética. Relatório Síntese. Rio de Janeiro, 2022.

BARROS, A. Revisitando o problema de classificação de padrões na presença de outliers usando técnicas de regressão robusta. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

BURTON, T. et al. Wind Energy Handbook. Londres: John Wiley & Sons, 2001.

CARVALHO, A. Avaliação da Disponibilidade e Desempenho de um Parque Eólico após 10 anos de Operação. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2020.

DEVORE, J. L. Probability and Statistics for Engineering and the Sciences. 9ed.. ed. [S.l.]: Cengage Learning; Brooks Cole; Cengage, 2016. ISBN 1305251806,978-1-305-25180-9.

DOBBIN, T. Modelagem e Controle de um Aerogerador duplamente alimentado com turbina de velocidade variável para estudos de estabilidade eletromecânica. Dissertação de Mestrado. COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, 2014.

Evolução da Capacidade Instalada de Geração Eólica. Operador Nacional de Energia. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/evolucao_capacidade_instalada.aspx>. Acesso em: 10 de set. 2022.

FADIGAS, E. Energia Eólica. Barueri, São Paulo: Manole, 2011. 285 p.

FERREIRA, G. Otimização para o Acionamento de Sistemas Yaw em Turbinas Eólicas. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Caraúbas, Rio Grande do Norte, 2018.

Geração e Fator de Capacidade Mensal. Operador Nacional de Energia. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-fator-capacidade-medios-mensais.aspx>>. Acesso em: 10 de set. 2022.

Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2022.

POHLENZ, V. Aplicação de Machine Learning e Ferramentas Estatísticas para Modelagem e Análise de Falhas em Aeroogerador. Universidade Federal de Santa Catarina. Trindade, Florianópolis, 2020.

Plano Nacional de Energia 2050. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2020.

Recordes de Geração Eólica. Operador Nacional de Energia. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/recordes.aspx>>. Acesso em: 10 de set. 2022.

RESENDE, H. Engenharia Elétrica na Construção de Parques Eólicos. Centro de Tecnologias do Gás e Energia Renováveis. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, SENAI. Natal, 2012.

SANTOS, D.; SOUZA, L. Aplicação de Modelos Locais Robustos Baseados na Rede de Kohonen para Estimção da Curva de Potência de Aeroogeradores. 14ª Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Ouro Preto, Minas Gerais, 2019.

SILVA, F. Potencial Eólico do Nordeste Brasileiro. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2015.

TURCK. Disponível em: <www.turck.com.br/pt/posicionamento-do-rotor-em-turbinas-eolicas-549.php>. Acesso em: 10 set. 2022.

WILLRICH, L. Implementação de Procedimento Normatizado para a Determinação da Curva de Potência de um Aeroogerador. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2021.

WILKINSON, M.; HENDRIKS, B. Reliawind - report on wind turbine reliability. Albuquerque: Garrad Hassan, 2011.

ZHU, C.; Li, Y. Reliability Analysis of Wind Turbines. Artigo de Revista Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines. Chongqing, China: Edited by Kenneth Eloghene Okedu. 2018.