



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

CATARINA GOMES MONTEIRO

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS MÉTRICAS DE DISPONIBILIDADE TEMPORAL E
DESEMPENHO ENERGÉTICO EM TURBINAS EÓLICAS LOCALIZADAS NO
BRASIL**

FORTALEZA

2022

CATARINA GOMES MONTEIRO

ANÁLISE COMPARATIVA DAS MÉTRICAS DE DISPONIBILIDADE TEMPORAL E
DESEMPENHO ENERGÉTICO EM TURBINAS EÓLICAS LOCALIZADAS NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior.

FORTALEZA

2022

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

M775a Monteiro, Catarina Gomes.

Análise comparativa das métricas de disponibilidade temporal e desempenho energético em turbinas eólicas localizadas no Brasil / Catarina Gomes Monteiro. – 2022.
47 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior.

1. Energia eólica. 2. Disponibilidade temporal. 3. Desempenho energético. 4. Impacto na geração. I. Título.
CDD 621.042

CATARINA GOMES MONTEIRO

ANÁLISE COMPARATIVA DAS MÉTRICAS DE DISPONIBILIDADE TEMPORAL E
DESEMPENHO ENERGÉTICO EM TURBINAS EÓLICAS LOCALIZADAS NO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias Renováveis.

Aprovada em: 12/12/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ana Fabiola Leite Almeida
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Claus Franz Wehmann
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus que sempre esteve comigo e me guiou em todos os obstáculos da minha vida, iluminando meus caminhos e enchendo minha vida de felicidade e aprendizados.

À minha mãe, que, devido a distância, não pôde estar comigo nesse momento final da graduação, mas que sempre torce por mim. Mãe, você é a minha maior inspiração.

À toda a minha família, que me ensinou a procurar sempre a melhor versão de mim e me deu todo o suporte necessário durante toda a vida. Obrigada especialmente a você pai, por ter priorizado a minha educação e a dos meus irmãos e ter se sacrificado tanto por nos dar uma vida confortável. Ao meu tio Marcelo, você é um segundo pai para mim, nunca esquecerei que me levou no meu primeiro dia de aula na UFC. À minha tia Reginete, que me ajudou a construir toda a base de conhecimento que tenho atualmente, você foi fundamental para essa conquista. Ao Iury e ao Erick por serem os melhores irmãos e à Marcela por ser a irmã que nunca tive.

Aos meus avós Maria, Zilma e Raimundo que participaram da minha criação e sempre me cobriram de amor. Ao meu avô Manoel, não conseguimos nos conhecer bem pessoalmente, mas o senhor está muito vivo nas lembranças de nossa família por sua determinação e personalidade singular.

À Pamela por dividir todos os fardos e alegrias da vida, por ser a amizade mais pura e verdadeira que uma pessoa pode ter. À Lara, por ter me feito rir tantas vezes e por estar sempre ao meu lado, seu foco e determinação sempre me inspiraram. Ao João Victor e à Vanessa, por serem pessoas tão prestativas e companheiras, não sei como teria conseguido passar pela graduação sem vocês.

À todos os meus amigos de graduação, especialmente do grupo de Engenharia de Apoio, por sempre me consolarem em momentos ruins, me ajudarem quando necessário e me fazer rir em todos os nossos encontros, vocês foram um dos meus maiores presentes da UFC.

À Rafaela, Lillian e Lucilene, por terem sido amigas tão presentes mesmo com a crescente distância da vida adulta.

Ao Joaquim por ser o homem mais companheiro, amoroso, compreensivo e determinado que já conheci, contigo aprendi a ser uma pessoa melhor, a entender o amor e perceber que independente do desafio, eu sou capaz de vencê-lo.

Aos meus amigos de trabalho, João Victor, Letícia, Gabriel e Bernardo, por serem os melhores companheiros de trabalho. Ao Tiago Maia, ao Paulo Régis e à Nathianne Andrade, por

serem líderes admiráveis.

À todos os professores da graduação por seus ensinamentos, todos contribuíram para que eu me tornasse a profissional atual. Agradeço especialmente ao professor Ilson, por ter aceitado o convite para ser meu orientador e me acalmar sempre que necessário, o senhor me deu todo o suporte preciso para a realização do presente trabalho.

Por fim, à empresa que forneceu os dados para a realização dos estudos de caso, sem eles seria impossível executar o este projeto.

“O sonho é que leva a gente para frente. Se a gente for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.”

(Ariano Suassuna)

RESUMO

Em decorrência das grandes Revoluções Industriais, especialmente a Revolução Técnico-Científico-Informacional, a necessidade de energia elétrica cresceu subitamente, uma vez que inúmeros aparatos tecnológicos foram criados com o fito de facilitar as atividades desenvolvidas pela humanidade. Em vista disso, a primeira fonte energética utilizada era provinda de origens fósseis, contudo, em razão dos impactos no ambiente e nas sociedades, o cenário energético mundial apresentou diversas mudanças a partir do investimento em fontes renováveis, sendo uma delas a eólica. Apesar da difusão da geração de energia através de turbinas eólicas, um importante fator tem sido entrave para as empresas investidoras, as perdas de energia por elevada indisponibilidade temporal ou baixo desempenho energético. O presente estudo teve como intuito calcular ambas as métricas isoladamente e a energia perdida por elas, baseado nas metodologias de cálculo das normas IEC 61400-12-1 e IEC 61400-26-1, assim como a comparação entre essas métricas em turbinas brasileiras. Fundamentado na investigação realizada, viu-se que ambos os eventos podem abalar significativamente a geração dos aerogeradores. No que concerne aos eventos de elevada indisponibilidade temporal, observou-se que uma turbina inoperante durante 32,73% de um mês pode apresentar um montante de energia perdida correspondente à 46,38% da geração. Além disso, referente aos eventos de baixo desempenho energético, avaliou-se que uma aderência à curva de potência de 77,88% pode acarretar a perda de energia referente à 28,9% da geração do período analisado. Destarte, foi notado a relevância de realizar o acompanhamento de ambas as métricas, a fim de garantir o pleno funcionamento dos complexos eólicos.

Palavras-chave: Energia eólica. Disponibilidade temporal. Desempenho energético. Impacto na geração.

ABSTRACT

As a result of the great Industrial Revolutions, especially the Technical-Scientific-Informational Revolution, the need for electricity grew suddenly, as countless technological devices were created with the aim of facilitating the activities developed by humanity. In view of this, the first energy source used was provided from fossil sources, however, due to the impacts on the environment and on societies, the world energy scenario presented several changes from the investment in renewable sources, one of which is wind. Despite the diffusion of energy generation through wind turbines, an important factor has been an obstacle for investing companies, energy losses due to high temporal unavailability or low energy performance. The present study aimed to calculate both metrics separately, based on the calculation methodologies of the IEC 61400-12-1 and IEC 61400-26-1 standards, and the energy lost by them, as well as the comparison between these metrics in Brazilian turbines. Based on the investigation carried out, it was seen that both events can significantly affect the generation of wind turbines. With regard to events of high temporal unavailability, it was observed that a turbine inoperative for 32.73% of a month can present an amount of lost energy corresponding to 46.38% of generation. In addition, referring to low energy performance events, it was evaluated that an adherence to the power curve of 77.88% can lead to energy loss related to 28.9% of the generation of the analyzed period. Thus, the importance of monitoring both metrics was noted, in order to guarantee the full functioning of the wind complexes.

Keywords: Wind energy. Time availability. Energy performance. Impact on generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo de fontes para geração de energia	16
Figura 2 – Modelos de TEEV	19
Figura 3 – Turbina Eólica de Eixo Horizontal	20
Figura 4 – Principais componentes de um aerogerador	21
Figura 5 – Rotor de uma turbina eólica	22
Figura 6 – Esquema de uma turbina eólica convencional	23
Figura 7 – Esquema de uma caixa multiplicadora de eixos paralelos	24
Figura 8 – Esquema de uma caixa multiplicadora planetária	25
Figura 9 – Simulação de fluxo de fluido sobre aerofólio	26
Figura 10 – Leitura de direção do vento	27
Figura 11 – Curva de potência teórica	29
Figura 12 – Distribuição de vento da Turbina A durante o período analisado	38
Figura 13 – Curva de potência teórica e real da Turbina A	39
Figura 14 – Distribuição de vento da Turbina B durante o período analisado	40
Figura 15 – Curva de potência teórica e real da Turbina B	41
Figura 16 – Curva de potência teórica e real da Turbina C	41
Figura 17 – Distribuição de vento da Turbina C durante o período analisado	42
Figura 18 – Curva de potência teórica e real da Turbina D	43
Figura 19 – Distribuição de vento da Turbina C durante o período analisado	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações técnicas da Turbina A	35
Tabela 2 – Informações técnicas da Turbina B	35
Tabela 3 – Informações técnicas da Turbina C	35
Tabela 4 – Informações técnicas da Turbina D	36
Tabela 5 – Resultados relacionados à indisponibilidade temporal da Turbina A	37
Tabela 6 – Resultados relacionados ao desempenho energético da Turbina A	38
Tabela 7 – Resultados relacionados à indisponibilidade temporal da Turbina B	39
Tabela 8 – Resultados relacionados ao desempenho energético da Turbina B	39
Tabela 9 – Resultados relacionados à indisponibilidade temporal da Turbina C	40
Tabela 10 – Resultados relacionados ao desempenho energético da Turbina C	42
Tabela 11 – Resultados relacionados à indisponibilidade temporal da Turbina D	43
Tabela 12 – Resultados relacionados ao desempenho energético da Turbina D	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GWEC	Global Wind Energy Council
HSS	High Speed-Shaft
ISS	Intermediate Speed-Shaft
LSS	Low Speed-Shaft
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SMF	Sistema de Medição e Faturamento
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical

LISTA DE SÍMBOLOS

$Disp_{temp}$	Disponibilidade temporal
$Tempo_{disp}$	Tempo disponível
$Tempo_{tot}$	Tempo total
E_{pit}	Energia perdida por indisponibilidade temporal
CP	Curva de potência
Δt	Período de amostragem dos dados
ind_{temp}	Indisponibilidade temporal
$disp_{temp}$	Disponibilidade temporal
E_{esp}	Energia esperada
$Desemp_{energ}$	Desempenho energético
E_{med}	Energia medida
E_{pde}	Energia perdida por desempenho energético

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1	Tipos de turbinas eólicas	19
3.2	Principais componentes de um aerogerador	20
3.2.1	<i>Rotor</i>	21
3.2.2	<i>Eixo principal</i>	22
3.2.3	<i>Caixa Multiplicadora</i>	23
3.2.4	<i>Gerador</i>	25
3.2.5	<i>Sistema de pitch</i>	26
3.2.6	<i>Sistema de yaw</i>	26
3.2.7	<i>Sistema de controle</i>	27
3.2.8	<i>Torre</i>	27
3.3	Principais métricas de avaliação de parques eólicos	28
3.3.1	<i>Disponibilidade temporal</i>	28
3.3.2	<i>Desempenho energético</i>	29
4	METODOLOGIA	31
4.1	Cálculo da disponibilidade temporal	31
4.2	Energia perdida por indisponibilidade temporal	32
4.3	Cálculo do desempenho energético	32
4.4	Energia perdida por baixo desempenho energética	34
4.5	Apresentação das turbinas	34
4.5.1	<i>Turbina A</i>	34
4.5.2	<i>Turbina B</i>	35
4.5.3	<i>Turbina C</i>	35
4.5.4	<i>Turbina D</i>	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	45

REFERÊNCIAS	46
--------------------------	----

1 INTRODUÇÃO

A partir da 1^o Revolução Industrial, as sociedades humanas desenvolveram forte necessidade de geração de energia elétrica, visto que durante o período foram criadas as máquinas a vapor, as quais produziam energia elétrica para o funcionamento do maquinário de indústrias a partir do vapor de água aquecido com a queima de carvão.

Contudo, após a Revolução Técnico-Científico-Informacional, a necessidade por energia elétrica foi intensificada, uma vez que foram desenvolvidos diversos aparatos tecnológicos que foram adquiridos pelas grandes massas, já que eram ferramentas que facilitavam a execução de atividades primordiais e complexas.

Fundamentada nessa intensa procura por energia, foi necessário gerá-la a partir de formas mais eficientes que às aquelas empregadas durante a criação do maquinário a vapor, e, baseado nessa carência, outras fontes de energia foram descobertas e utilizadas (Figura 1).

A primeira delas foi apoiada na utilização de combustíveis fósseis derivados do petróleo, o qual é produzido a partir da decomposição de matéria orgânica em camadas do solo e detêm de altos valores de poder calorífico, proporcionando altas taxas de liberação de energia com sua queima, fazendo com que tenha sido amplamente utilizado.

Entretanto, a exploração do petróleo como forma de energia gera vários impactos negativos, tanto na sociedade quanto no meio ambiente, tais como acidificação de lagos e rios causados pelas chuvas ácidas, originadas do dióxido de enxofre, principal poluente liberado na queima de combustíveis fósseis; aumento de doenças que atingem o trato pulmonar de seres humanos, como asma e câncer de pulmão; vazamentos de óleo no mar, impactando à vida aquática. (FEY, 2017)

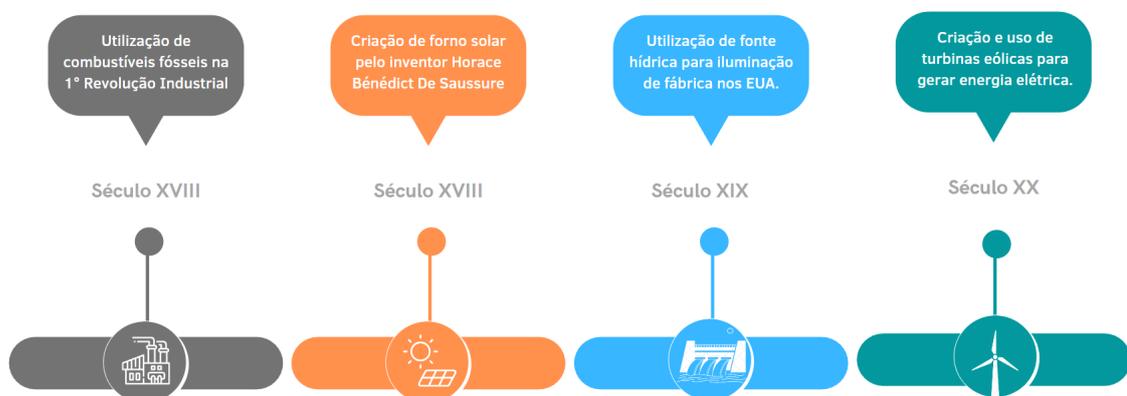
Sabido isso, outra forma de gerar energia elétrica foi com o aproveitamento de energias renováveis. A pioneira deste âmbito foi a hidrelétrica, a qual converte a energia potencial de cursos de água em torque e, após isso, energia elétrica. Anteriormente, essa fonte era empregada no moinho de grãos e abastecimento hídrico de cidades, sendo utilizada para o dado fim apenas em 1880, com o intuito de abastecer o sistema de iluminação da fábrica Wolverine Chair, nos Estados Unidos. (MOURA *et al.*, 2019)

Além disso, outra fonte energética renovável empregada largamente no contexto mundial é a partir do aproveitamento de energia solar, a qual pode ser extraída energia térmica para o aquecimento de água a partir de coletores solares, mais conhecida como energia solar térmica. Segundo Santos *et al.* (2018), esse tipo de aplicação do aproveitamento da matriz solar

é realizada desde meados de 1767 a partir da criação de um forno solar pela inventor Horace Bénédict De Saussure. Além disso, há também a energia solar fotovoltaica, em que transforma a energia luminosa solar em energia elétrica com o intermédio das placas solares.

Outrossim, similarmente à hidrelétrica, a energia eólica também foi empregada desde civilizações antigas, para moagem de grãos e abastecimento hídrico, apesar disso, segundo Garcia-Sanz (2019), apenas no século XX foi utilizada para gerar energia através da criação dos primeiros modelos de aerogeradores desenvolvidos pelo americano Charles Brush.

Figura 1 – Linha do tempo de fontes para geração de energia



Fonte: Elaborado pela autora.

Atualmente, um dos principais entraves no que concerne a energia eólica decorre do fim da vida útil dos parques, visto que são equipamentos de grande porte e que podem acarretar diversos impactos ambientais, caso sejam descartados erroneamente. Dado isso, segundo a EPE (2021), pode haver a modernização das máquinas, através de *retrofits* nos principais equipamentos ou descomissionamento, no qual haveria reutilização, reciclagem ou descarte do maquinário.

Contudo, apesar desse impasse, de acordo com o *Global Wind Energy Council* (GWEC) ou Conselho Global de Energia Eólica, o potencial eólico instalado mundialmente é de, aproximadamente, 837 GW no ano de 2022, evitando que mais de 1,2 bilhões de toneladas de CO_2 sejam descarregados na atmosfera anualmente, o que equivale às emissões totais anuais da América do Sul.

Em vista deste crescimento acentuado da utilização da energia cinética do vento para transformação de energia, houve uma necessidade de avaliação do desempenho das turbinas eólicas usadas para o dado fim e, com isso, diferentes metodologias para verificá-lo. A primeira delas é a avaliação de disponibilidade temporal do aerogerador, o qual calcula, essencialmente, o tempo em que a turbina eólica permanece em operação. Essa métrica é amplamente utilizada

no mercado eólico, visto que pode ser facilmente calculada, sendo necessário apenas obter os registros de eventos que fazem com que a máquina não opere.

No entanto, a disponibilidade temporal é uma métrica simplista e que não possibilita a análise profunda de desempenho do aerogerador, visto que ele pode apresentar alta disponibilidade temporal, com poucos alarmes que acarretem o desligamento, mas concomitantemente pode apresentar uma limitação de potência, fazendo com que ele gere metade da sua capacidade nominal.

Destarte, torna-se evidente a necessidade do uso de métricas que permitam a devida avaliação das turbinas, de forma que operem com a melhor *performance*.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Comparar os efeitos de indisponibilidade temporal e baixo desempenho energético na geração de energia em turbinas eólicas brasileiras.

2.2 Objetivos Específicos

- Expor os diferentes indicadores que quantificam o desempenho de uma turbina eólica;
- Computar a indisponibilidade temporal das turbinas eólicas a partir da metodologia prevista na norma IEC 61400-26-1;
- Calcular o impacto na produção de um aerogerador que apresenta elevada indisponibilidade temporal;
- Aplicar filtros previstos na IEC 61400-12-1 nos dados de geração para avaliação de desempenho energético;
- Computar o desempenho energético das turbinas eólicas;
- Calcular o impacto na produção de um aerogerador que apresenta baixo desempenho energético;
- Salientar a relevância da implantação de softwares que realizam o acompanhamento de ambos os indicados em complexos eólicos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Tipos de turbinas eólicas

Atualmente, no ramo da geração de energia por parte da matriz eólica, há dois tipos de turbinas, as quais se diferenciam em razão da direção dos eixos. A primeira delas é a Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV), que tem como principal característica a orientação de 90° em relação ao solo, como possível observar na Figura 2. Essas máquinas têm torres menores, o que faz com que a construção e manutenção seja mais simplificada. Além disso, também produzem menos poluição sonora durante a operação, tornando-as ideais para os ambientes urbanos. Apesar disso, não produzem tanta energia se comparadas às de eixo horizontal, uma vez que, por não serem tão altas, não conseguem aproveitar as maiores velocidades de vento dos ambientes, as quais se dão, geralmente, em alturas mais elevadas e, em decorrência disso, não são usualmente utilizadas.

Figura 2 – Modelos de TEEV



Fonte: Lima (2020)

Além das turbinas de eixo vertical, há também as Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH), que tem como principais características o eixo principal paralelo ao solo e elevadas

alturas, o que possibilita o aproveitamento de velocidades de vento superiores, fazendo com que elas sejam mais energeticamente superiores às demais e, em vista disso, são os modelos mais difundidos mundialmente, estando presente em grande parte das grandes unidades geradores de energia eólica. Em virtude disso, o modelo de aerogerador que será estudado no presente trabalho será o TEEH.

Figura 3 – Turbina Eólica de Eixo Horizontal



Fonte: Lima (2020)

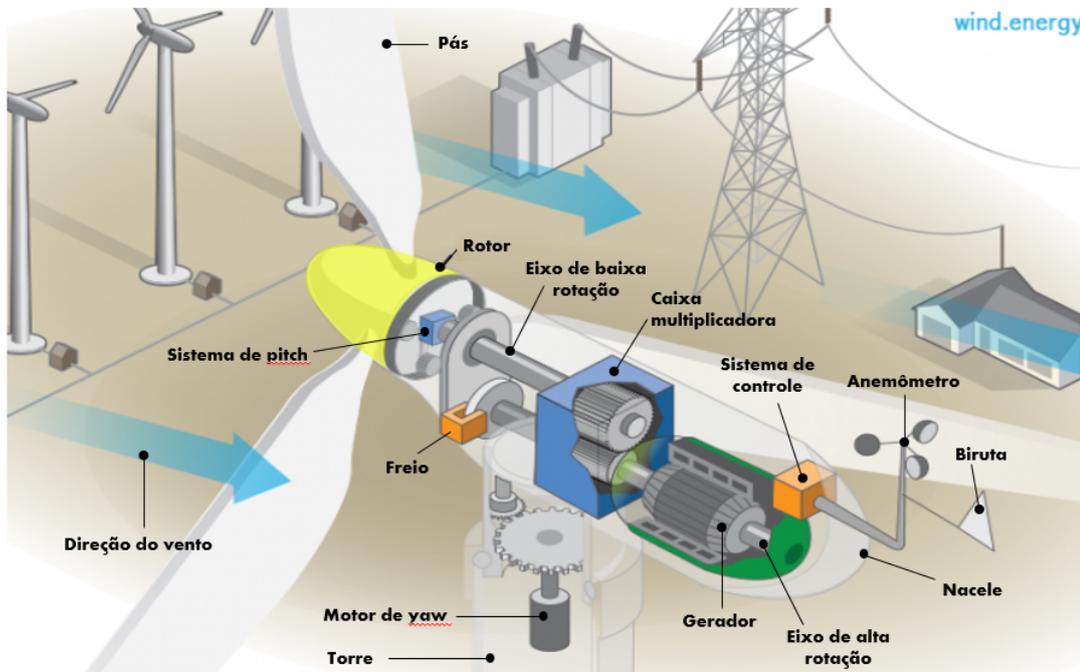
3.2 Principais componentes de um aerogerador

Uma turbina eólica é constituída por diversos equipamentos que são essenciais para o funcionamento dessas máquinas (Figura 4), os principais componentes são:

- Rotor
- Nacele
- Caixa multiplicadora
- Gerador
- Eixo de baixa e alta rotação
- Sistema de pitch
- Sistema de yaw

- Sistema de controle
- Torre

Figura 4 – Principais componentes de um aerogerador



Fonte: Adaptado de DOE (2016)

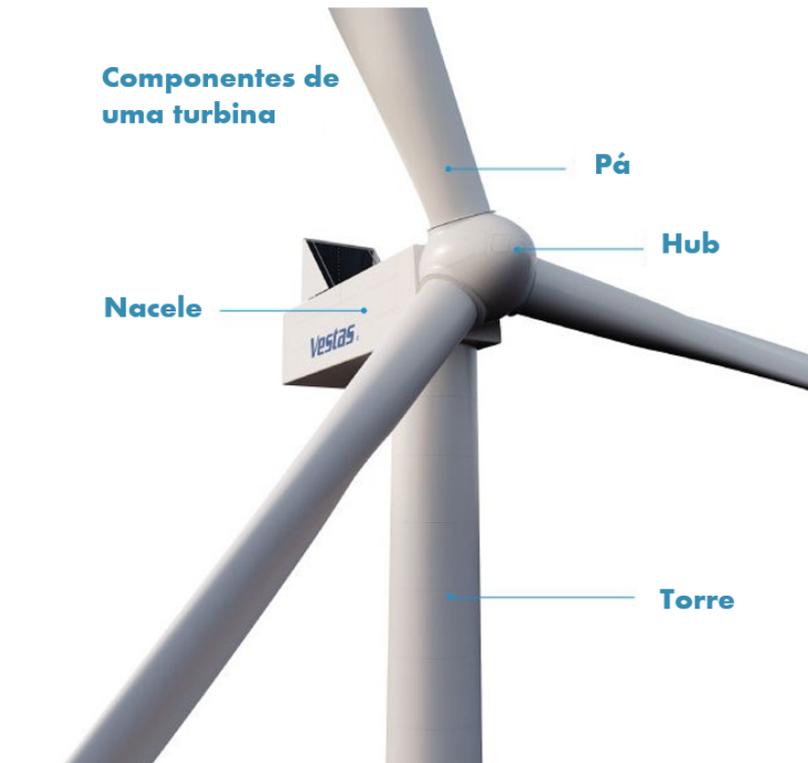
3.2.1 Rotor

O rotor é o conjunto responsável por extrair a energia cinética do vento e transformá-la em energia mecânica de rotação, a qual será transmitida para os demais componentes através do eixo de baixa velocidade.

Ele é constituído por duas partes principais que incluem as pás e o hub (Figura 5). As pás são dispositivos fundamentais na conversão da energia do vento em torque, e, para que isso ocorra, é necessário que elas tenham um perfil aerodinâmico e sejam fabricadas com materiais como o usualmente utilizado composto de fibra de vidro e resina, fazendo com que as pás sejam resistentes e leves. A combinação destes fatores proporciona a máxima extração de energia sem comprometimentos estruturais da turbina.

No que tange o hub, ele é um aparelho que conecta as pás no eixo de baixa velocidade e, conseqüentemente, aos demais dos componentes existentes.

Figura 5 – Rotor de uma turbina eólica



Fonte: Adaptado de Vestas (2017)

3.2.2 Eixo principal

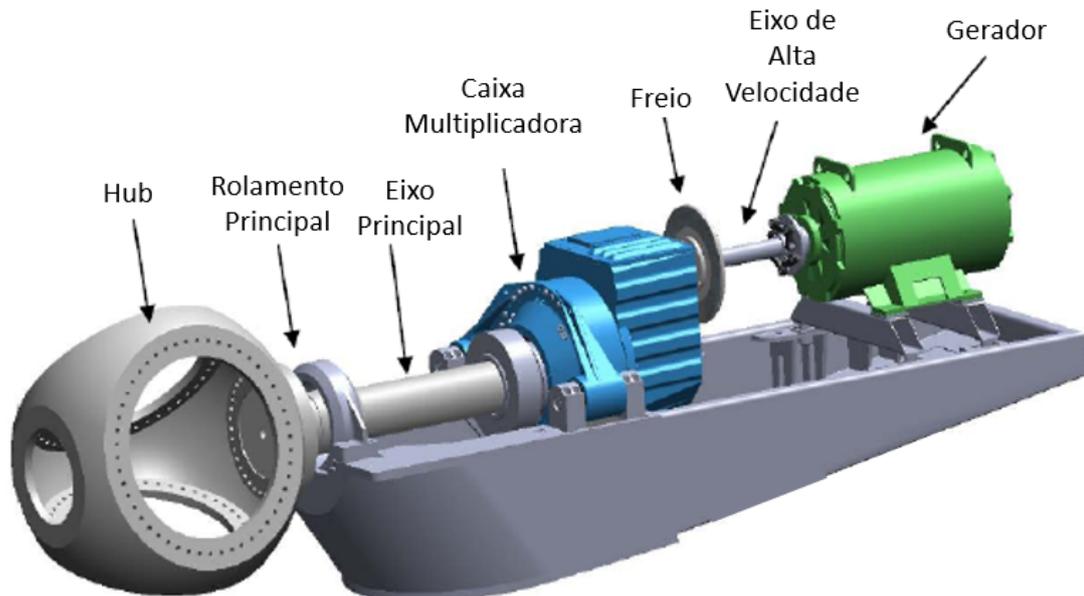
Também conhecido como eixo do rotor, eixo de baixa velocidade ou *Low Speed-Shaft (LSS)*, visto que apresenta velocidade angular de aproximadamente 10 rpm, ele é o responsável por captar a energia de torque gerada pelo conjunto do rotor e distribuí-la para o restante da turbina.

A captação de energia desse componente é feita da seguinte forma, primeiramente as pás fazem com que o hub gire a partir da captação do vento e, por conseguinte, o eixo de baixa velocidade, que está acoplado ao hub, gira com a mesma velocidade.

Dependendo do design do aerogerador, esse eixo pode estar acoplado à gearbox (Figura 6) ou diretamente ao gerador, caso seja uma turbina eólica síncrona de ímãs permanentes.

Cabe salientar que, além de ser responsável pela transmissão de energia, o componente também é encarregado de dar apoio ao rotor, e, em vista disso, eventos relacionados aos rolamentos do eixo principal, como defasada lubrificação ou desalinhamento do eixo, podem acarretar a avaria das peças girantes e consequente instabilidade de toda a turbina, sendo imprescindível a correta lubrificação das partes e o acompanhamento das equipes Operação e Manutenção dos parques eólicos.

Figura 6 – Esquema de uma turbina eólica convencional



Fonte: Adaptado de Saidiand *et al.* (2017)

3.2.3 Caixa Multiplicadora

A caixa multiplicadora, ou *gearbox*, está localizada entre o eixo principal e o gerador. A velocidade de rotação do eixo principal é muito mais baixa do que a requerida pelo gerador e, em vista disso, as turbinas eólicas síncronas possuem *gearbox*, uma vez que sua principal função é aumentar essa velocidade de rotação.

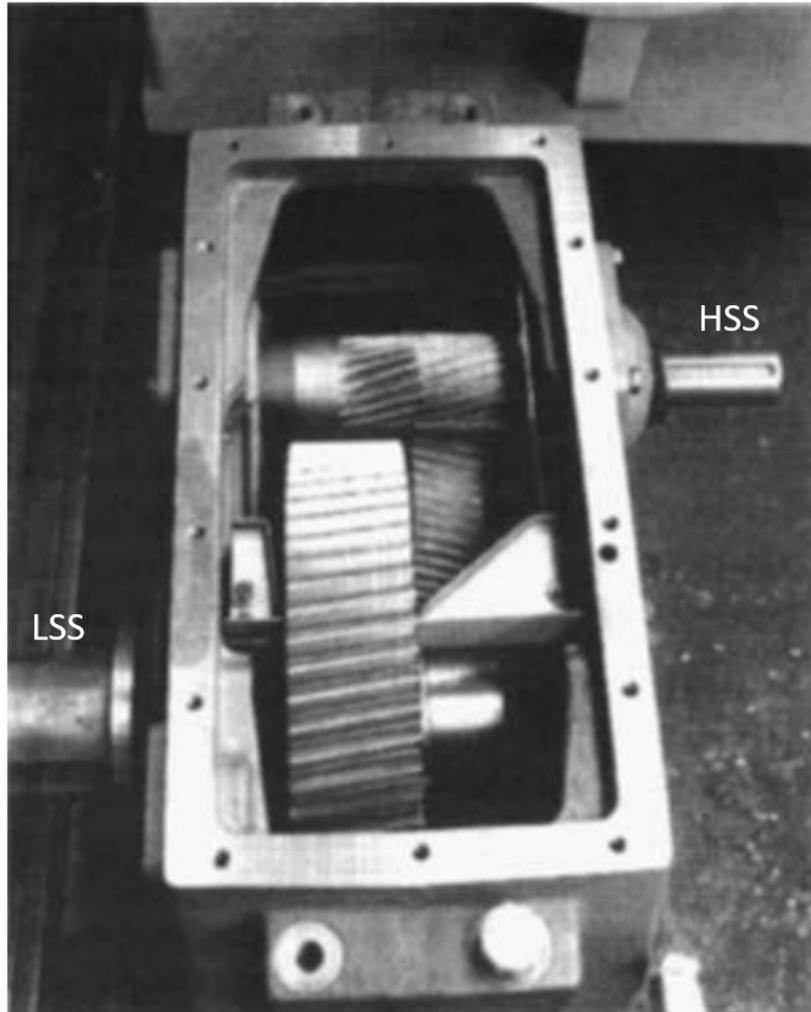
Para que isso aconteça, esse componente utiliza diferentes mecanismos de trens de engrenagens, os quais irão variar dependendo do tipo de *gearbox*.

O primeiro é a *gearbox* de eixos paralelos (Figura 7), nele o eixo principal, é acoplado na engrenagem de maior diâmetro, a qual está ligada com uma outra engrenagem de diâmetro menor. Em decorrência disso, utilizando a relação de transmissão entre esse trem de engrenagem simples, vê-se que a velocidade de rotação do eixo de saída ou *High Speed-Shaft (HSS)* é consideravelmente maior que do de entrada. Esse tipo de caixa multiplicadora é utilizada em turbinas em que a relação de transformação não é muito elevada, cerca de 1:5 e, em virtude disso, é classificada como *gearbox* de eixos paralelos de estágio único.

Ademais, quando o aerogerador requer uma elevada relação de transmissão, cerca de 1:7 de acordo com Peeters (2006), necessita-se de um eixo intermediário, *Intermediate Speed-Shaft (ISS)*, entre o de baixa e alta velocidade. Esse design permite que haja menores tensões nos eixos da engrenagem e suaviza a limitação de transmissão de torque que as *gearbox* de

estágio único apresentam, fazendo com que as de estágio múltiplos apresentem menos problemas estruturais e sejam mais eficientes.

Figura 7 – Esquema de uma caixa multiplicadora de eixos paralelos



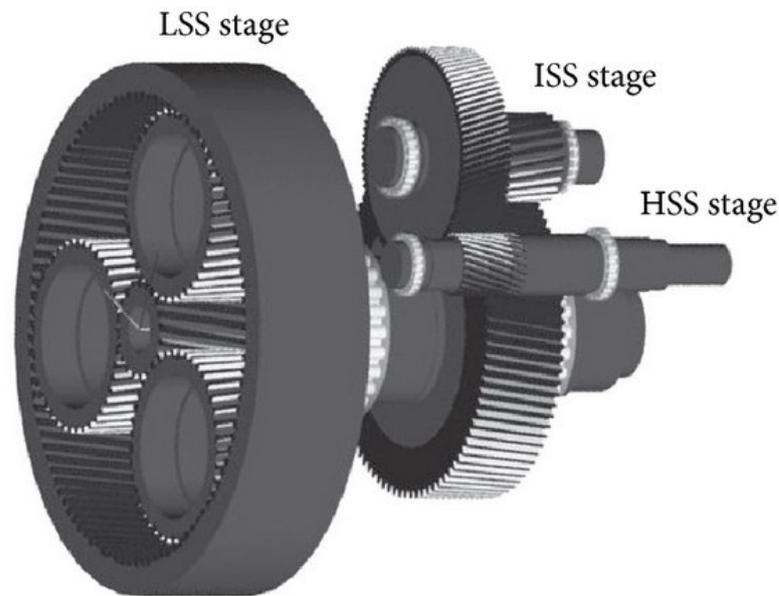
Fonte: Adaptado de Harrison *et al.* (2000)

O segundo tipo de caixa multiplicadora é a que utiliza trem de engrenagens planetário (Figura 8). Este tipo de *gearbox* é bem diferente da de eixos paralelos, uma vez que os eixos de entrada e saída são coaxiais, além de existem vários pares de dentes de engrenagem engrenando a todo momento, de maneira que a carga em cada engrenagem é reduzida, fazendo com que esse modelo de *gearbox* seja relativamente mais leve e compacta.

Ademais, nas caixas de modelo planetário, há também um eixo de baixa velocidade que é rigidamente conectado ao braço da engrenagem planetária. O braço segura três pequenas engrenagens idênticas, mais conhecidas como planetas. Quando o eixo de baixa velocidade e o braço rotacionam, o engrenamento dos planetas no anel de engrenagem força a rotação dos planetas, para que isso ocorra, a velocidade dos planetas deve ser maior que a do braço. Após

isso, a engrenagem solar aciona o eixo de alta velocidade, no qual está rigidamente acoplada. (MANWELL *et al.*, 2012)

Figura 8 – Esquema de uma caixa multiplicadora planetária



Fonte: Bajric *et al.* (2015)

3.2.4 Gerador

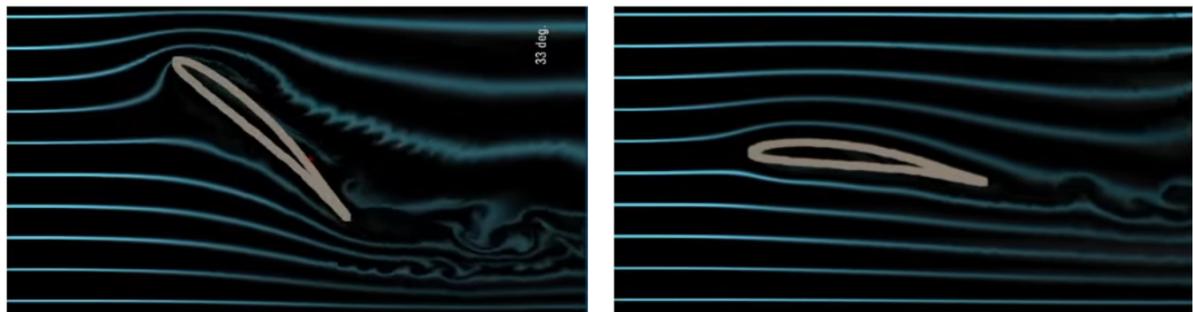
O gerador é o componente responsável por realizar a transformação de energia cinética em energia elétrica. Para que isso ocorra, o componente utiliza o fenômeno da indução magnética. Caso a turbina apresente gearbox, o eixo de alta velocidade é acoplado no gerador, de forma que gira o rotor do gerador, criando um fluxo magnético de rotação nas bobinas da armadura do estator. Na hipótese do gerador ser do tipo síncrono de ímãs permanentes, a rotação do rotor do gerador fará com que os ímãs também sigam o movimento do rotor, acarretando a criação de um fluxo magnético. A variação do fluxo magnético cria uma força eletromagnética alternada na bobina, fazendo com que os elétrons dentro do material sejam perturbados pelo campo magnético, forçando-os a se mover em uma direção alternada, criando assim uma corrente alternada. Esse tipo de gerador é o mais utilizado atualmente na indústria eólica, uma vez que é aplicável em turbinas de pequeno e grande porte.

3.2.5 Sistema de pitch

Esse sistema é responsável por regular a potência das turbinas eólicas, o que o torna um importante componente, visto que o gerador de um aerogerador apresenta um limite de operação e, caso a velocidade do vento medida pelo anemômetro de nacela seja maior que àquela suportada pelo gerador, o pitch faz com que a potência captada seja proporcional a esse limite de operação.

Para que isso aconteça, o sistema de pitch permite que as pás façam um movimento de torção com o intuito de diminuir o ângulo de ataque à altas velocidades de vento, acarretando também na diminuição da força de sustentação (Figura 9). Esse tipo de tecnologia evita *stall*, diminuindo vibrações e garantindo a integridade dos componentes do aerogerador.

Figura 9 – Simulação de fluxo de fluido sobre aerofólio



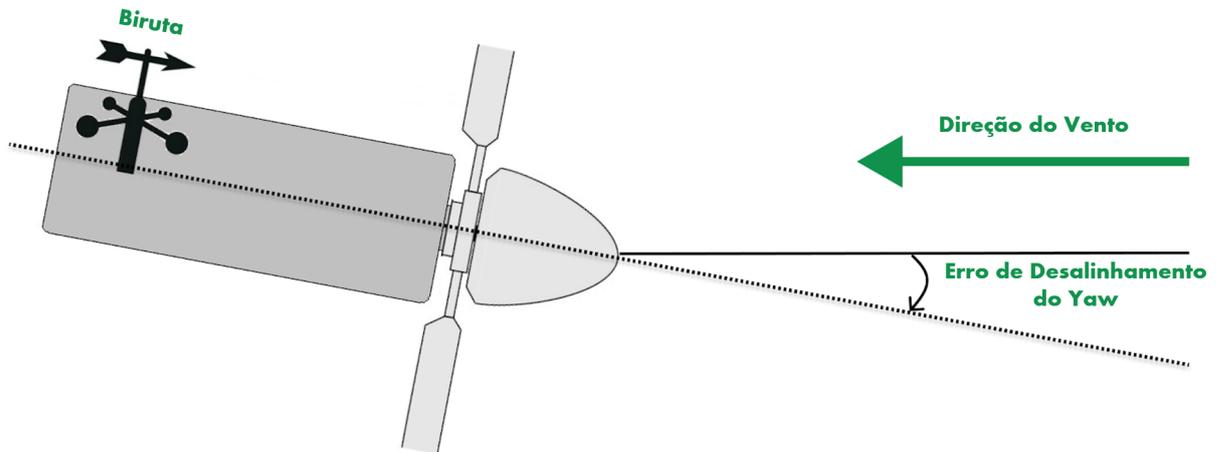
Fonte: Barnes (2020)

3.2.6 Sistema de yaw

É sabido que a propriedade de direção do vento muda constantemente, evidenciando a necessidade da turbina eólica de se adequar a essa direção com o intuito de extrair a máxima potência da energia cinética do vento e, com o fito de que isso ocorra, o sistema de yaw tem como principal atribuição interpretar os dados de direção do vento que são lidos por sensores presentes na nacela e, dessa forma, rotacioná-la para a direção em que o vento se encontra (Figura 10).

É importante salientar que o aerogerador só realizará yaw quando o limite de desalinhamento for ultrapassado, uma vez que, caso ele apresente baixa tolerância de desalinhamento, irá executar yaw com alta frequência, provocando queda na geração de energia dessa máquina, visto que durante o alinhamento não é gerado energia.

Figura 10 – Leitura de direção do vento



Fonte: Adaptado de Yadavari (2022)

3.2.7 Sistema de controle

Esse sistema é constituído por dois sensores principais. O primeiro deles é o anemômetro localizado no topo da nacela, o qual é responsável por medir as velocidades de vento no local em que a turbina está localizada. Esse sensor é essencial para o funcionamento da máquina, uma vez que o sistema de pitch necessita dessas medições para ajustar o ângulo de ataque ótimo para a geração. Além disso, caso as velocidades de vento sejam maiores do que as suportadas pelo aerogerador, ele irá iniciar uma parada a fim de que seus componentes não se danifiquem. Por fim, para realizar a análise de performance de uma turbina é imprescindível que o anemômetro de nacela esteja calibrado, uma vez que um sensor descalibrado irá acarretar errôneas análises.

Outro importante sensor é a biruta, localizada também na nacela da turbina. Esse sensor tem objetivo de localizar a direção do vento e, a partir disso, o sistema de yaw irá identificar o desalinhamento da turbina com o vento no local e, dessa forma, irá alinhá-la para que não haja perda de geração.

3.2.8 Torre

É o principal elemento de sustentação de uma turbina eólica, visto que é responsável por suportar a nacela e o rotor da turbina eólica. Além disso, quando se precisa realizar alguma intervenção nos componentes presentes na nacela, o transporte ocorre por dentro da torre.

Por fim, esse componente também é transmissor de vibração, ou seja, quando há

algum dano no rolamento principal, por exemplo, é possível captar os sinais de vibração que apontam para essa falha na torre do aerogerador.

3.3 Principais métricas de avaliação de parques eólicos

Atualmente, uma das grandes atribuições das empresas responsáveis por gerar energia a partir da fonte eólica é mensurar o desempenho dos parques eólicos, uma vez que elas devem garantir que a quantidade de energia gerada que foi assegurada por intermédio de contratos ou acordos comerciais seja entregue.

Com o fito de que isso ocorra, uma importante medida é calculada, a disponibilidade. De acordo com DNV (2017):

O termo "disponibilidade", conforme utilizado na indústria eólica, é a medida do potencial de geração de energia elétrica por um aerogerador. Caso a turbina esteja "disponível" e conectada à rede, e as outras condições estejam dentro das especificações da turbina, será gerada energia elétrica.

No âmbito atual, a disponibilidade presente no meio eólico é a temporal, a qual se dá baseado no tempo em que uma turbina eólica está apta a gerar energia.

Apesar disso, esse índice não permite a avaliação da real geração de cada turbina perante o garantido pelos fabricantes e, em vista disso, a avaliação do desempenho energético dessas máquinas também se mostra um importante elemento.

3.3.1 Disponibilidade temporal

É o indicador mais simplista utilizado para mensurar desempenho de parques eólicos, isso se deve ao fato de considerar apenas momentos de paradas de máquina que possam ser considerados como indisponibilidade. Essas paradas são eventos de intervenções ou falhas que fazem com que a potência da turbina seja zerada, mesmo que haja velocidades de vento favoráveis à geração. Em decorrência disso, essa métrica está presente na maioria de contratos com empresas responsáveis pela operação e manutenção desses parques.

Dito isso, é importante salientar que o cálculo dessa métrica é regida de acordo com a norma IEC 61400-26-1, Commission (2019), a qual é responsável por determinar as diretrizes dos cálculos de disponibilidade para sistemas de geração de turbinas eólicas. Além disso, a norma também é encarregada de orientar importantes fatores que permeiam os eventos de indisponibilidade, como a parte que é responsável pelo evento ou, até mesmo, a escala de

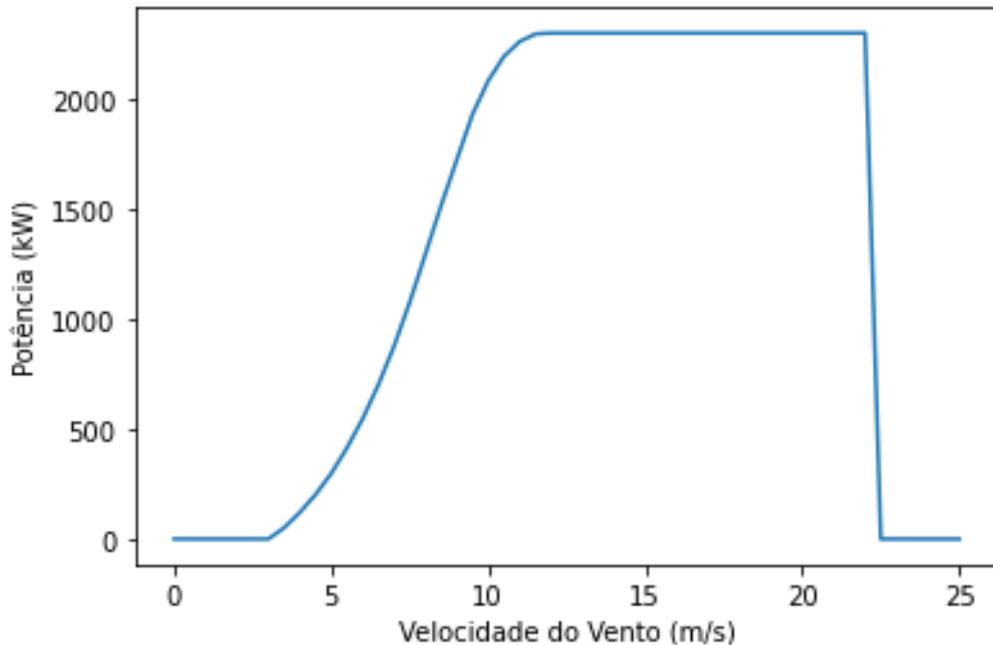
prioridade entre eventos de *downtimes*, uma vez que, quando uma turbina eólica fica inoperante, vários alarmes ficam ativos nela, sendo apenas um deles o responsável pela parada.

Segundo Conroy e Gallachóir (2011), a disponibilidade temporal geralmente garantida é de 97%. Apesar disso, este valor pode afetar seriamente o rendimento energético do parque eólico, visto que, caso ocorra eventos de indisponibilidade, comumente conhecidos como *downtimes*, em um período em que as velocidades de vento são mais elevadas, haverá significativa perda de geração.

3.3.2 Desempenho energético

O indicador de desempenho energético, ou *performance*, das turbinas eólicas é muito valioso, uma vez que tem o intuito de avaliar a real geração das turbinas. Para que essa análise seja realizada, é necessário a obtenção da curva de potência teórica do aerogerador em estudo (Figura 11), o qual geralmente é fornecido pelo fabricante, e os dados de velocidade do vento e potência.

Figura 11 – Curva de potência teórica



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Além disso, a partir da implantação das orientações da norma IEC 61400-12-1, Commission (2017), a qual realiza orientação de fatores que se referem à desempenho energético de turbinas eólicas, pode-se realizar a avaliação dessas máquinas através da comparação entre a curva de potência teórica e real. Isso torna possível estudar as curvas de potência e ponderar

se a geração está maior que o esperado, em casos de *super performance*, ou menor, em casos de *subperformance*. Ademais, a partir de uma adaptação dessa norma é possível mensurar o desempenho energético de um aerogerador e a energia perdida por baixo desempenho.

4 METODOLOGIA

Com a finalidade de analisar os diferentes impactos na produção de energia eólica das métricas de disponibilidade temporal e desempenho energético dos aerogeradores, foram coletados os dados de potência, velocidade de vento e alarmes geradores de *downtimes* a partir do sistema de aquisição de dados, *Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)*.

Esses dados foram cedidos por uma empresa do ramo de energia eólica na região nordeste, demais informações sobre as unidades geradoras não serão fornecidas, com o intuito de preservar a identidade das empresas proprietárias.

No presente capítulo, serão apresentados os critérios de cálculo e filtros utilizados na base de dados adquirida.

4.1 Cálculo da disponibilidade temporal

Para a avaliação deste indicador serão considerados os alarmes que geraram paradas de máquina, ou seja, todos os alarmes que fizeram com que a potência ficasse zerada. Para o cálculo deste indicador, foram considerados apenas os alarmes ativos por um período igual ou maior que 10 minutos, uma vez que os dados fornecidos são medidos a cada 10 minutos. Além disso, vale ressaltar que a meta empregada de indisponibilidade temporal é de, no máximo, 3%.

Sabido disso, o cálculo de disponibilidade temporal das turbinas eólicas avaliadas no presente trabalho será realizado de acordo com o indicado pela norma IEC 61400-26-1, a qual sugere a equação 4.1:

$$Disp_{temp} = 1 - \frac{Tempo_{disp}}{Tempo_{tot}} \quad (4.1)$$

No qual:

$Disp_{temp}$ é a disponibilidade temporal

$Tempo_{disp}$ é o tempo em que a máquina estava apta a gerar energia

$Tempo_{tot}$ é o tempo total do período analisado

4.2 Energia perdida por indisponibilidade temporal

Com o intuito de mensurar a quantidade de energia perdida por eventos de indisponibilidade (Equação 4.2), foi realizada uma adaptação da IEC 61400-12-1, de forma que as velocidades de vento aferidas durante os eventos foram avaliadas e, a partir da função da curva de potência teórica, os respectivos valores de potência foram retornados.

$$E_{pit} = \sum_{t=1}^N CP(v_{vento}(t)) \cdot \Delta t \cdot ind_{temp} \quad (4.2)$$

No qual:

E_{pit} é a energia perdida por indisponibilidade temporal

CP é a curva de potência

$v_{vento}(t)$ é a velocidade do vento no instante de tempo t

Δt é o período de amostragem dos dados

ind_{temp} é a indisponibilidade temporal

4.3 Cálculo do desempenho energético

Primeiramente, com o intuito de considerar dados em que as turbinas analisadas estivessem operando normalmente, os seguintes dados foram excluídos a partir de filtros aplicados na base de dados de funcionamento dos aerogeradores, os quais foram sugeridos na norma IEC 61400-12-1:

- Momentos com disponibilidade diferentes de 100%;
- Velocidades de vento menores que a mínima para operação;
- Velocidades de vento maiores que a máxima para operação.

É importante salientar que os demais filtros sugeridos pela norma, como o de setores ótimos de vento, não foram utilizados por falta de dados, sendo possível que na avaliação de desempenho haja influências do efeito esteira .

Além disso, para que as curvas de potência e cálculos de energia perdida por falta de desempenho fossem executados, os dados de velocidade de vento foram separados em

intervalos de velocidade, ou bins, considerando variação a cada 0,1 m/s. Com o intuito de calcular a respectiva potência medida, foram realizadas médias de potência para cada intervalo de velocidade de vento. A partir disso foi possível, primeiramente, plotar as curvas de potência de cada caso abordado no presente estudo. Ademais, com o intuito de mensurar a aderência da curva de potência real à teórica, foi calculado primeiramente, a partir de uma adaptação da IEC 61400-12-1, a energia esperada (Equação 4.3), que corresponde àquela caso a turbina opere de acordo com a curva de potência do fabricante.

$$E_{esp} = \sum_{t=t_i}^{t_f} CP(v_{vento}(t)) \cdot \Delta t \cdot disp_{temp} \quad (4.3)$$

No qual:

E_{esp} é a energia esperada

CP é a curva de potência

$v_{vento}(t)$ é a velocidade do vento no instante de tempo t

Δt é o período de amostragem dos dados

$disp_{temp}$ é a disponibilidade temporal

Baseado nisso, é possível mensurar o desempenho energético da turbina, o que irá indicar o quanto que a curva real segue o comportamento da curva teórica fornecida pelo fabricante.

$$Desemp_{energ} = \frac{E_{med}}{E_{esp}} \quad (4.4)$$

No qual:

$Desemp_{energ}$ é o desempenho energético

E_{med} é a energia medida

E_{esp} é a energia esperada

4.4 Energia perdida por baixo desempenho energética

Outrossim, com o intuito de quantificar o montante de energia não gerada em decorrência de eventos de baixo desempenho energético (Equação 4.5), é necessário apenas subtrair o valor de energia medida da energia esperada.

$$E_{pde} = E_{esp} - E_{med} \quad (4.5)$$

No qual:

E_{pde} é a energia perdida por desempenho energético

E_{esp} é a energia esperada

E_{med} é a energia medida

4.5 Apresentação das turbinas

Para que o presente estudo pudesse ser realizado, foram extraídos dados de operação de quatro turbinas reais de diferentes modelos, fabricantes e locais de operação. Além disso, com o intuito de garantir a proteção de dados das empresas envolvidas, serão utilizados nomenclaturas fictícias para identificar os aerogeradores. Dito isso, as turbinas eólicas serão apresentadas a seguir.

4.5.1 Turbina A

A primeira turbina, nomeada Turbina A, apresenta potência nominal de 2300 kW, com velocidade para potência nominal de 12m/s. Além disso, apresenta velocidade de vento mínima para operação de 3 m/s e a máxima de 22,5 m/s. Todas essas informações estão disponíveis na Tabela 1.

No que se refere à localização do complexo eólico em que está inserida, ele está instalado no estado do Piauí. Outrossim, o período em que os dados foram extraídos se deu durante todo o mês de dezembro de 2021, fora da safra de vento da região, visto que os efeitos de perda de geração pelo fenômeno de indisponibilidade temporal pode ser visto mais claramente, uma vez que não há presença de outros fenômenos que impactaram a geração durante o período.

Tabela 1 – Informações técnicas da Turbina A

Nome	Fabricante	Velocidade de vento mínima	Velocidade de vento máxima	Potência Nominal
Turbina A	Fabricante 1	3 m/s	22,5 m/s	2300 kW

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.5.2 Turbina B

A segunda turbina, nomeada Turbina B, apresenta potência nominal de 2900 kW, com velocidade para potência nominal também de 12m/s. Além disso, apresenta velocidade de vento mínima para operação de 3 m/s e a máxima de 25 m/s. Todas essas informações estão disponíveis na Tabela 2.

Tabela 2 – Informações técnicas da Turbina B

Nome	Fabricante	Velocidade de vento mínima	Velocidade de vento máxima	Potência Nominal
Turbina B	Fabricante 2	3 m/s	25 m/s	2900 kW

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

No que concerne à localização do complexo eólico, ele se encontra no litoral do estado do Rio Grande do Sul. Outrossim, o período em que os dados foram extraídos se deu também durante todo o mês de novembro de 2021, visto que foi notado valores de indisponibilidade maiores do que o restante do ano e não ocorreu presença de outros fenômenos que impactassem a geração de energia.

4.5.3 Turbina C

A terceira turbina, nomeada Turbina C, está localizada no mesmo parque eólico da Turbina B, de forma que apresenta as mesmas especificações técnicas (Tabela 3) por ser também do mesmo modelo que a anterior.

Tabela 3 – Informações técnicas da Turbina C

Nome	Fabricante	Velocidade de vento mínima	Velocidade de vento máxima	Potência Nominal
Turbina C	Fabricante 2	3 m/s	25 m/s	2900 kW

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Outrossim, o período em que os dados foram extraídos se deu também durante todo o

mês de junho de 2021, visto que foi identificada anormalidade na curva de potência da máquina e elevada disponibilidade temporal, fazendo com que fosse possível avaliar o impacto do fenômeno na perda de geração de energia.

4.5.4 Turbina D

A última turbina, nomeada Turbina D, apresenta potência nominal de 2000 kW, com velocidade para potência nominal também de 15m/s. Além disso, apresenta velocidade de vento mínima para operação de 3 m/s e a máxima de 27 m/s. Todas essas informações estão disponíveis na Tabela 4.

Tabela 4 – Informações técnicas da Turbina D

Nome	Fabricante	Velocidade de vento mínima	Velocidade de vento máxima	Potência Nominal
Turbina D	Fabricante 3	3 m/s	27 m/s	2000 kW

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

No que concerne à localização do complexo eólico, ele está instalado no litoral do estado do Ceará. Outrossim, o período em que os dados foram extraídos se deu também durante todo o mês de dezembro de 2021, visto que foi constatado anormalidade na curva de potência da máquina e elevada disponibilidade temporal, possibilitando a avaliação do efeito isoladamente na geração de energia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados extraídos através do sistema de monitoramento implementado nos complexos eólicos, os quais adquirem os dados através do sistema SCADA.

No que concerne à turbina A, foi possível observar que, durante o período analisado, o qual se deu durante todo o mês de dezembro de 2021 como mencionado anteriormente, a turbina permaneceu fora de operação durante 115,77 horas, o que corresponde, aproximadamente, a 15,56% do período analisado, fazendo com que a meta de disponibilidade temporal do mês não fosse alcançada.

Além disso, ao verificar os dados do Sistema de Medição e Faturamento (SMF), viu-se que a energia não gerada por indisponibilidade temporal é equivalente à, aproximadamente, 19% da energia gerada no mês de dezembro no ano estudado. Todos esses resultados podem ser vistos na Tabela 5

Tabela 5 – Resultados relacionados à indisponibilidade temporal da Turbina A

Tempo fora de operação (horas)	Indisponibilidade temporal (%)	Velocidade de vento média mensal (m/s)	Energia medida (MWh)	Energia perdida por indisponibilidade temporal (MWh)
115,77	15,56	6,07	425,66	81,15

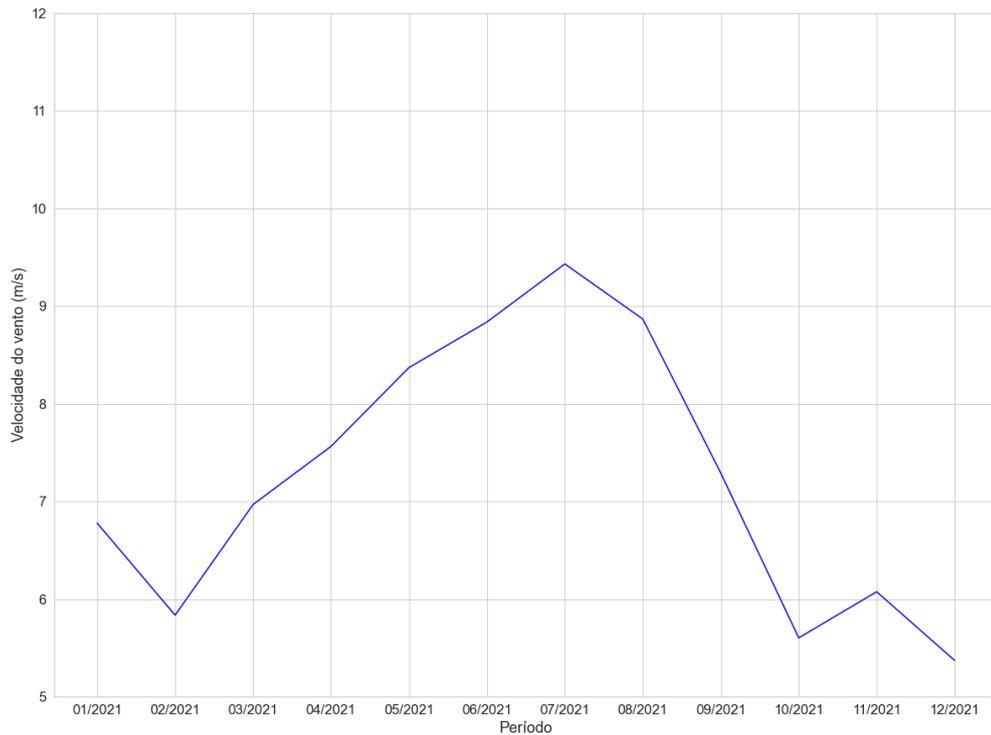
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Ademais, cabe salientar que o período de estudo do aerogerador em questão se deu após a safra de vento (Figura 12), acarretando uma menor perda de geração, o que não aconteceria caso houvesse um cenário similar durante o período de elevadas velocidades de vento.

Outrossim, relativo ao desempenho energético da turbina, pode-se ver na Figura 13 que o comportamento do gráfico da curva de potência real é similar ao da curva de potência teórica, de forma que é possível supor que não ocorreu significativa perda de geração em virtude de baixo desempenho energético, uma vez que a curva real expõe mínima *subperformance* na base da curva, ao passo que no joelho dela a turbina é mais energética .

Essa possibilidade foi confirmada a partir dos resultados calculados de energia perdida por baixa aderência à curva de potência, o qual representa aproximadamente 4% da energia medida no período, e desempenho energético, os quais estão expostos na Tabela 6.

Figura 12 – Distribuição de vento da Turbina A durante o período analisado



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 6 – Resultados relacionados ao desempenho energético da Turbina A

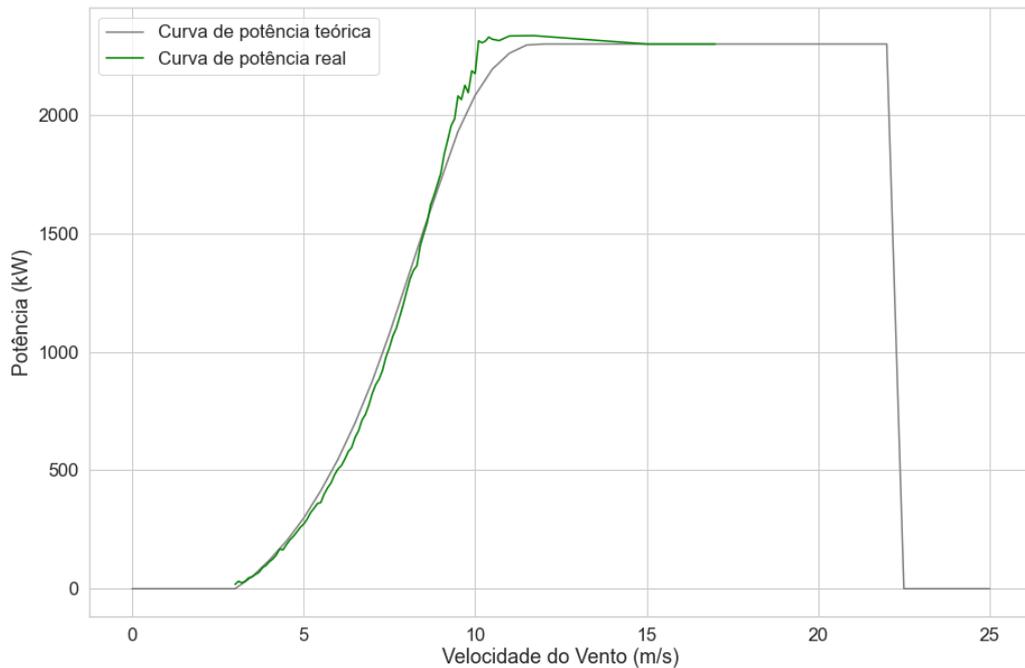
Velocidade de vento média mensal (m/s)	Desempenho energético (%)	Energia medida (MWh)	Energia perdida por baixo desempenho energético (MWh)
6,07	96,66	425,66	14,69

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

No que se refere à turbina B, foi visto que, durante o período de investigação, a turbina permaneceu inoperante durante 235,64 horas, valor que corresponde ao montante de 32,73% de todo o período (Tabela 7), fazendo com que a meta de disponibilidade temporal de 97% não fosse atingida. Somado à isso, ocorreu uma grande perda de geração da turbina eólica, correspondente à 46,38% da energia gerada, visto que as velocidades de vento durante esse intervalo de vento eram maiores daquelas vistas na turbina A (Figura 14).

Apesar disso, como é possível ver na Figura 15, a curva plotada com os dados extraídos tem comportamento análogo à teórica, sinalizando que a máquina apresentou desempenho

Figura 13 – Curva de potência teórica e real da Turbina A



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 7 – Resultados relacionados à indisponibilidade temporal da Turbina B

Tempo fora de operação (horas)	Indisponibilidade temporal (%)	Velocidade de vento média mensal (m/s)	Energia medida (MWh)	Energia perdida por indisponibilidade temporal (MWh)
235,64	32,73	7,60	736,03	353,9

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

energético satisfatório.

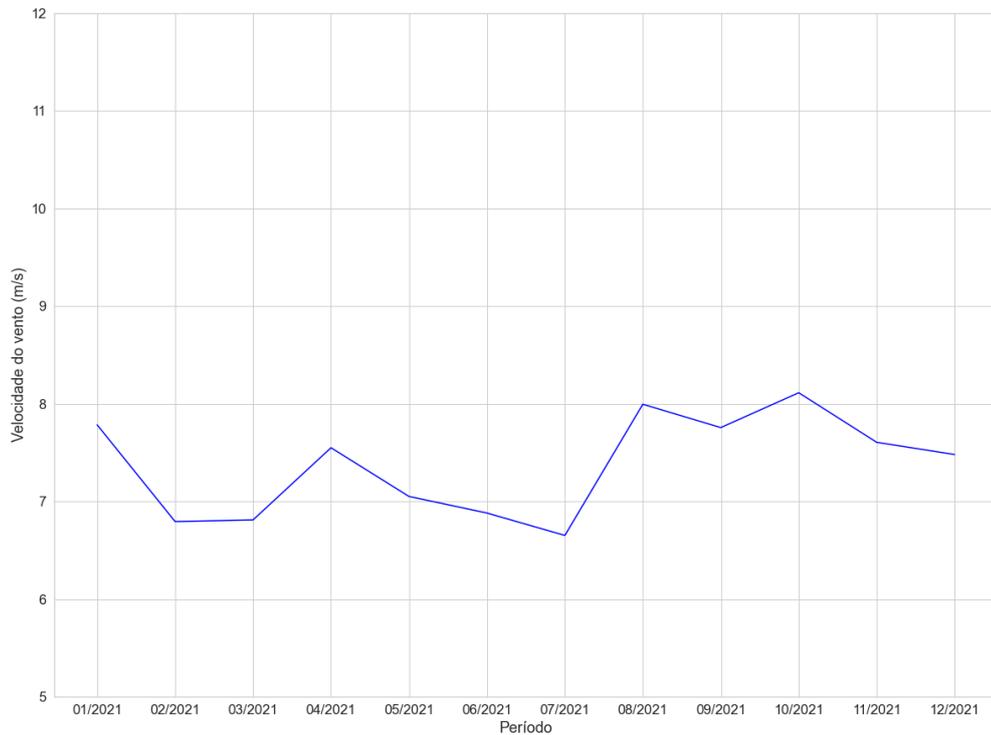
Aliado à isso, os resultados dos cálculos de energia perdida por baixo desempenho energético e o grau de aderência à curva de potência teórica mostraram-se excelentes (Tabela 8), sinalizando que, apesar do aerogerador ter ficado um terço do mês fora de operação, quando ele estava operatório a geração ocorria melhor que o previsto, uma vez que a turbina gerou mais do que o esperado.

Tabela 8 – Resultados relacionados ao desempenho energético da Turbina B

Velocidade de vento média mensal (m/s)	Desempenho energético (%)	Energia medida (MWh)	Energia perdida por baixo desempenho energético (MWh)
7,60	101,19	736,03	- 8,67

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 14 – Distribuição de vento da Turbina B durante o período analisado



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Com relação à turbina C, foi visto que ela apresentou poucos eventos que acarretaram paradas, fazendo com que a indisponibilidade temporal e a energia não produzida por esses eventos fossem mínimas (Tabela 9). Outrossim, em decorrência disso, a máquina conseguiu atingir a meta de disponibilidade temporal de 97%.

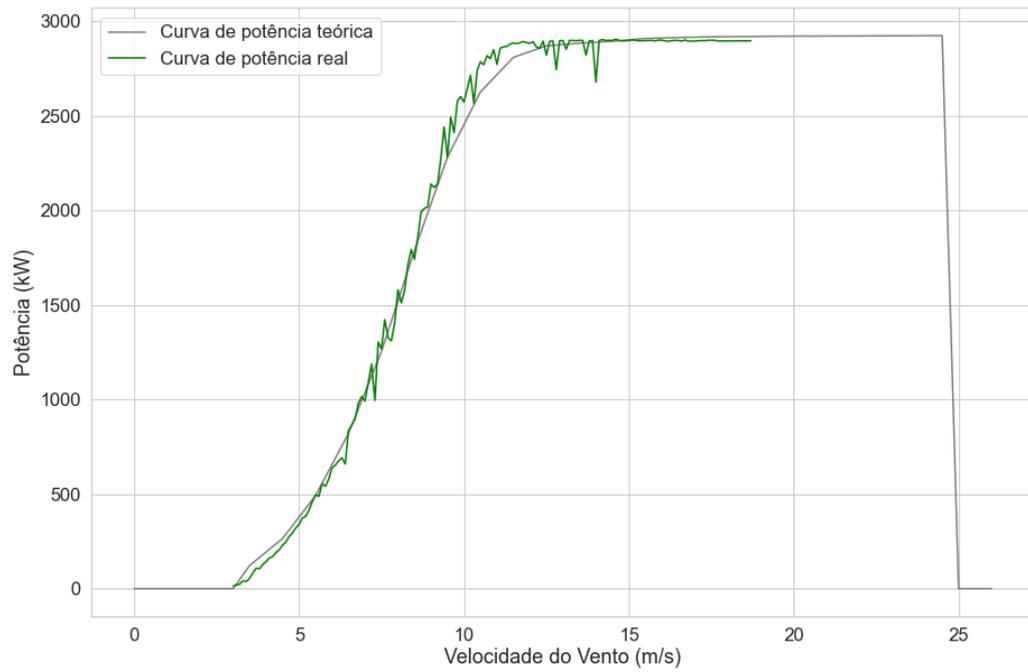
Tabela 9 – Resultados relacionados à indisponibilidade temporal da Turbina C

Tempo fora de operação (horas)	Indisponibilidade temporal (%)	Velocidade de vento média mensal (m/s)	Energia medida (MWh)	Energia perdida por indisponibilidade temporal (MWh)
6,4	0,89	7,89	985,75	9,51

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

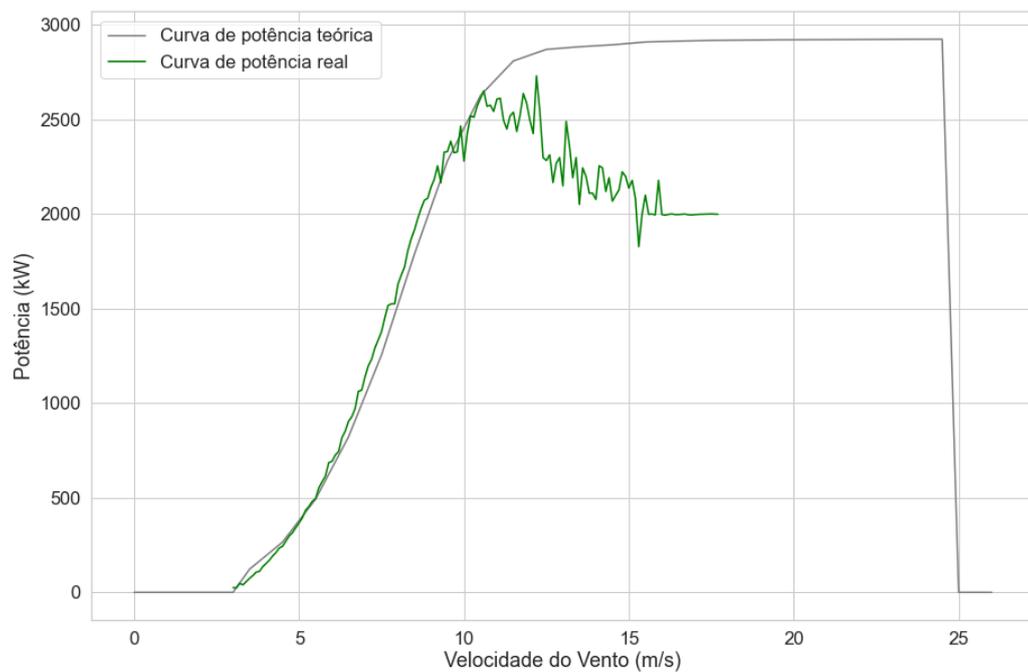
No entanto, ao analisar a curva de potência real do aerogerador (Figura 16), vê-se que ela não segue bem o comportamento da curva teórica, isso ocorreu em virtude de uma limitação de potência temporária imposta na turbina durante os dias 22/06 à 30/06, apesar disso, a causa da limitação de potência é desconhecida pela equipe de operação e manutenção do complexo eólico.

Figura 15 – Curva de potência teórica e real da Turbina B



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

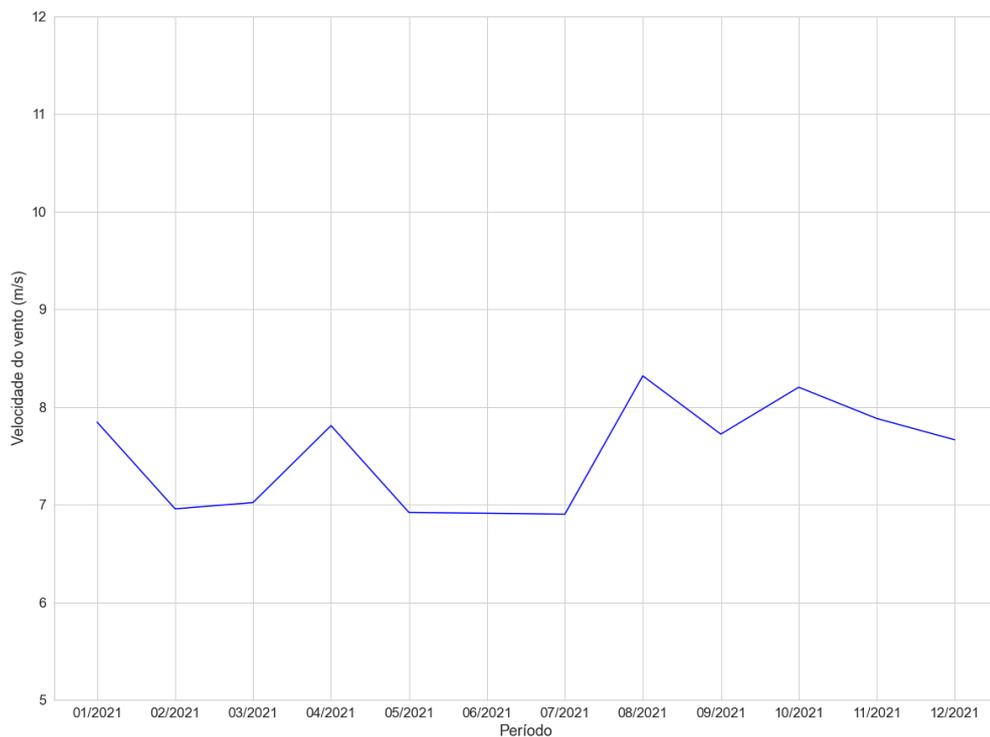
Figura 16 – Curva de potência teórica e real da Turbina C



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Em consequência disso, houve uma queda do desempenho energético da máquina, contudo, em razão da limitação ter acontecido durante um intervalo de tempo em que havia baixa oferta de vento (Figura 17), não houve perda expressiva de geração (Tabela 10).

Figura 17 – Distribuição de vento da Turbina C durante o período analisado



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 10 – Resultados relacionados ao desempenho energético da Turbina C

Velocidade de vento média mensal (m/s)	Desempenho energético (%)	Energia medida (MWh)	Energia perdida por baixo desempenho energético (MWh)
7,89	93,11	985,75	72,97

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

No tocante da Turbina D, observou-se que ela apresentou ótima disponibilidade temporal durante o intervalo de análise, visto que teve apenas um evento que ocasionou em uma parada de máquina de apenas 5 minutos. Dessa forma, o aerogerador atingiu a meta de

disponibilidade temporal e obteve ínfima perda energética por eventos de indisponibilidade temporal (Tabela 11).

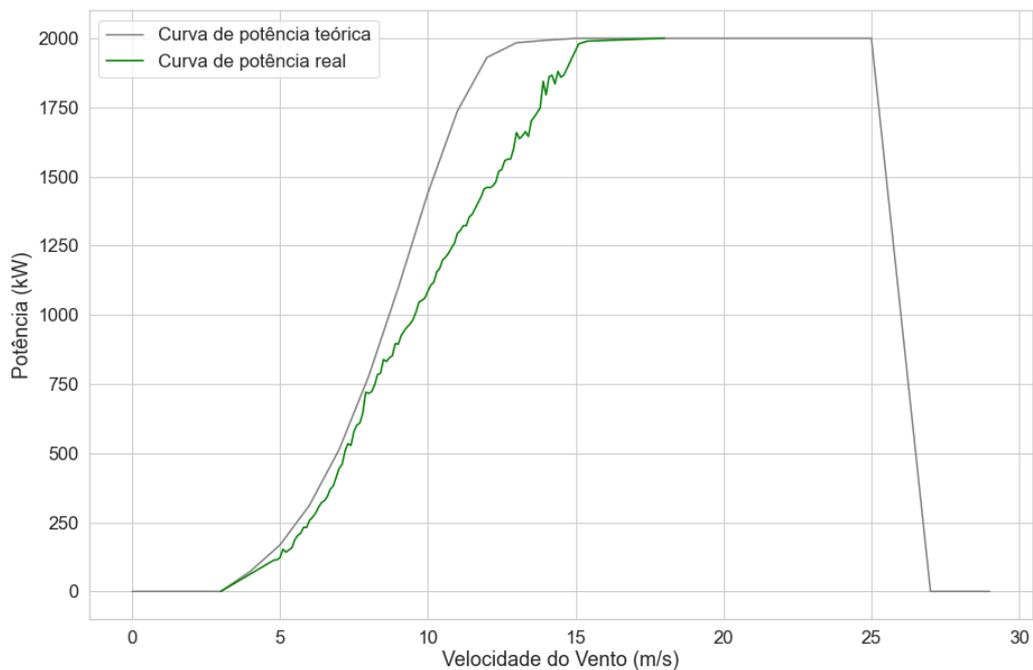
Tabela 11 – Resultados relacionados à indisponibilidade temporal da Turbina D

Tempo fora de operação (horas)	Indisponibilidade temporal (%)	Velocidade de vento média mensal (m/s)	Energia medida (MWh)	Energia perdida por indisponibilidade temporal (MWh)
0,08	0,01	6,84	696,07	0,09

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Por outra ótica, fundamentado na curva de potência real da turbina, é possível inferir que ela não apresentou bom desempenho energético durante o período, uma vez que apresentou comportamento distinto da curva contratual (Figura 18), afastando-se da curva contratual em velocidades superiores à 8m/s, com inclinação. Posteriormente, de acordo com o avaliado pela equipe de operação e manutenção do parque eólico, foi identificado que a causa raiz do problema da curva foi um problema no sistema de pitch, sendo sanado após intervenções e atualizações de software da turbina.

Figura 18 – Curva de potência teórica e real da Turbina D



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Ademais, alicerçado nos cálculos realizados, conseguiu-se quantificar o impacto

do agravamento do sistema de pitch na geração, o qual acarretou em uma perda de geração de, aproximadamente, 28,9% da energia produzida durante o período (Tabela 12). Agregado à isso, viu-se também que a aderência à curva de potência contratual estava insatisfatória, apresentando valor de 77,88%.

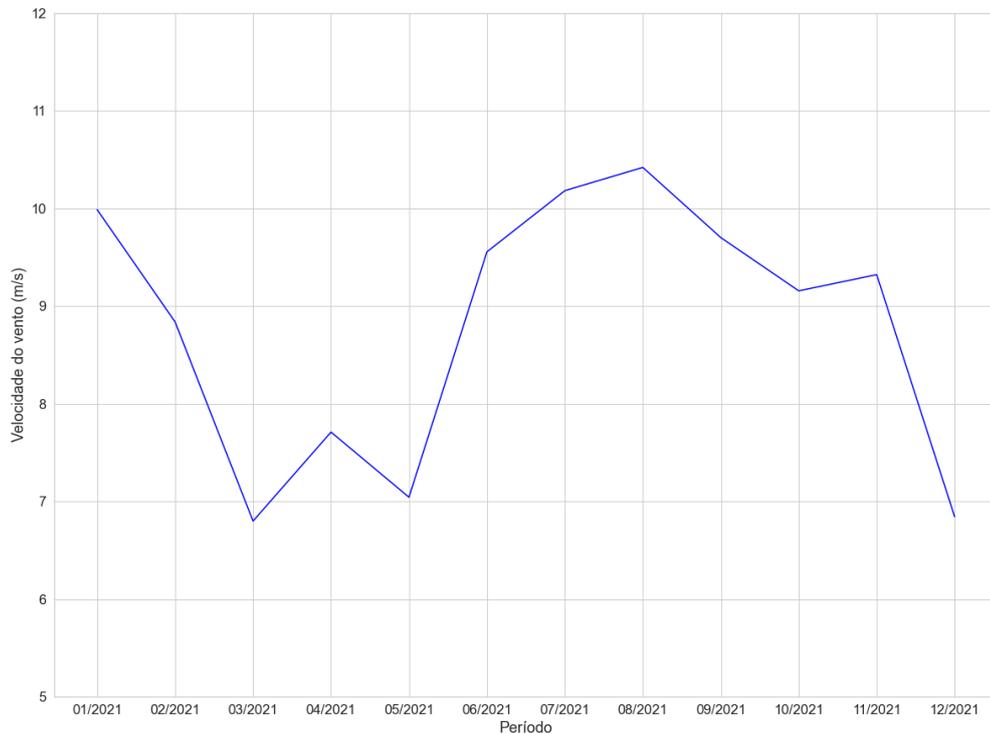
Tabela 12 – Resultados relacionados ao desempenho energético da Turbina D

Velocidade de vento média mensal (m/s)	Desempenho energético (%)	Energia medida (MWh)	Energia perdida por baixo desempenho energético (MWh)
6,84	77,88	696,07	197,67

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Vale ressaltar que o problema ocorreu após o período de safra de vento (Figura 19), dessa forma, é possível que, caso o comportamento fosse visto durante o intervalo de elevado recurso eólico, a perda energética por baixa aderência seria ainda maior.

Figura 19 – Distribuição de vento da Turbina C durante o período analisado



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve o intuito de mensurar e comparar o impacto na geração de turbinas eólicas brasileiras que apresentam déficit nas métricas de indisponibilidade temporal ou desempenho energético, para que isso fosse possível, os cálculos foram embasados em metodologias recomendadas pelas normas internacionais IEC 61400-12-1 E IEC 61400-26-1.

A partir dos resultados obtidos, observou-se considerável efeito nas gerações das turbinas que apresentavam elevado desempenho energético e disponibilidade temporal abaixo de 97%, as quais alcançaram perdas que representavam até 46,38% de toda a geração do período analisado, como visto na Turbina B.

Além disso, no que tange o indicador de desempenho energético, é possível inferir que ele também é imprescindível, visto que é independente da disponibilidade temporal, ou seja, como visto na Turbina D, é possível que se tenha um excelente valor de disponibilidade temporal, fazendo com que a máquina fique apta à geração pela maior parte do tempo, contudo, não consegue atingir a geração esperada devido à agravos que impactam o desempenho energético dela.

Ademais, é importante destacar que o período de dados extraídos da maioria das turbinas avaliadas se deu fora do período de safra de vento, atenuando a consequente perda energética, a qual seria mais significativa caso os cenários fossem iguais e se dessem durante o intervalo de elevadas velocidades de vento.

Destarte, conclui-se que ambas as métricas são indispensáveis para a indústria de energia eólica, principalmente no que se refere ao setor de operação e manutenção dos complexos eólicos, dado que com elas é possível garantir o pleno funcionamento das turbinas e realizar avaliação da causa raiz. Com isso, é importante ressaltar a relevância da implantação de softwares que realizam o acompanhamento desses indicadores, visto que facilitam a identificação desses agravos, auxiliando às empresas proprietárias de parques eólicos a realizar intervenções nas turbinas de maneira objetiva, atenuando a perda de geração.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros é sugerido que se extraia dados de aerogeradores que obtiveram impacto na produção em decorrência de algum dos fenômenos analisados nesta pesquisa durante a época de safras de vento, posto que seria possível visualizar os efeitos com mais clareza. Além disso, podem ser inseridos também outros filtros de dados que são recomendados pela IEC 61400-12-1, principalmente o que se considera setores ótimos de vento, mitigando a influência de efeito esteira na análise de desempenho energético.

REFERÊNCIAS

- BAJRIC, R.; ZUBER, N.; SKRIMPAS, G. A.; MIJATOVIC, N. Feature extraction using discrete wavelet transform for gear fault diagnosis of wind turbine gearbox. **Shock and Vibration**, Hindawi Publishing Corporation, v. 2016, n. 1, p. 1–10, 2015.
- BARNES, R. **Wind Turbine Aerodynamics: Stall vs Pitch Regulation**. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Y5T5ZhJQr2o>. Acesso em: 20 set. 2022.
- COMMISSION, I. E. **IEC 61400-12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines**. 2. ed. Suíça, 2017.
- COMMISSION, I. E. **IEC 61400-26-1: Availability for wind energy generation systems**. 1. ed. Suíça, 2019.
- CONROY, N.; GALLACHÓIR, J. D. and Brian P. Wind turbine availability: Should it be time or energy based? - a case study in ireland. **Renewable Energy**, v. 36, p. 2967–2971, 2011.
- DNV. **Definitions of Availability Terms for the Wind Industry**. 2017. Disponível em: <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2017/08/Definitions-of-availability-terms-for-the-wind-industry-white-paper-09-08-2017.pdf>. Acesso em: 27 set. 2022.
- DOE, D. de energia dos E. U. **The Inside of a Wind Turbine**. 2016. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/inside-wind-turbine>. Acesso em: 25 set. 2022.
- EPE, E. de P. E. **Empreendimentos eólicos ao fim da vida útil**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-en/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-238/NT-EPE-DEE-012-2021.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.
- FEY, A. **Combustíveis fósseis: por que eles prejudicam o meio ambiente?** 2017. Disponível em: <https://www.bioblog.com.br/combustiveis-fosseis-por-que-eles-prejudicam-o-meio-ambiente/>. Acesso em: 31 jul. 2022.
- GARCIA-SANZ, M. **Control Co-Design: An engineering game changer**. [S. l.]: John Wiley Sons, 2019.
- HARRISON, R.; HAU, E.; SNEL, H. **Large Wind Turbines: Design and Economics**. [S. l.]: John Wiley Sons, 2000.
- LIMA, D. D. R. S. **Turbinas Eólicas ou Aerogeradores**. 2020. Disponível em: <https://oakenergia.com.br/turbinas-eolicas/>. Acesso em: 12 set. 2022.
- MANWELL, J.; MCGOWAN, J.; ROGERS, A. **Wind Energy Explained: Theory, design and application**. [S. l.]: John Wiley Sons, 2012.
- MOURA, A. P. de; MOURA, A. A. F. de; ROCHA, E. P. da. **Engenharia de sistemas de potência: geração hidroelétrica e eolioelétrica**. [S. l.]: Edições UFC, 2019.
- PEETERS, J. **Simulation of a dynamic drive train loads in a wind turbine**. Tese (Doutorado) – Universidade Católica de Lovaina, Lovaina, 2006.

SAIDIAND, L.; ALI, J. B.; BECHHOEFER, E.; BENBOUZID, M. Wind turbine high-speed shaft bearings health prognosis through a spectral kurtosis-derived indices and svr. **Applied Acoustics**, v. 120, p. 1–8, 2017.

SANTOS, M. R. dos; LEITE, M. C.; FELIX, B. G.; PIRES, G. B.; ZAMPERIN, J. L. B. Elaboração de um fogão solar e análise da sua eficiência com uma lente. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 3, p. 29–39, 2018.

VESTAS. **Manufacturing in North America**. 2017. Disponível em: <https://us.vestas.com/en-us/manufacturing>. Acesso em: 15 set. 2022.

YADAVARI, H. **Yaw misalignment effect on turbine performance**. 2022. Disponível em: <https://www.kavaken.com/blog/yaw-misalignment-effect-on-turbine-performance>. Acesso em: 04 out. 2022.