

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DA VIBRAÇÃO EM MULTIPLICADORES DE VELOCIDADE DE
AEROGERADORES COM ROTOR DE EIXO HORIZONTAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MARCELO SILVEIRA DE ALMEIDA

Rio Grande, RS

2025

MARCELO SILVEIRA DE ALMEIDA

**ANÁLISE DA VIBRAÇÃO EM MULTIPLICADORES DE VELOCIDADE DE
AEROGERADORES COM ROTOR DE EIXO HORIZONTAL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica”.
Área de Concentração: Engenharia de fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Waldir Terra Pinto

RIO GRANDE, RS

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPGEMec



Ata nº **12/2025** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e oito dias do mês de agosto de dois mil e vinte e cinco, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas, online via webconferência, a que se submeteu o discente **MARCELO SILVEIRA DE ALMEIDA**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a linha de pesquisa de Engenharia de Fabricação, com o seguinte título: **ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MULTIPLICADORES DE VELOCIDADE DE AEROGERADORES COM ROTOR DE EIXO HORIZONTAL**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Waldir Terra Pinto, Fábio Augusto Dornelles do Amaral e o convidado Bruno Galler Kubelka sob a presidência do Professor Waldir Terra Pinto. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

- | | |
|---------------------------------------|----------|
| 1. Waldir Terra Pinto: | APROVADO |
| 2. Fábio Augusto Dornelles do Amaral: | APROVADO |
| 3. Bruno Galler Kubelka: | APROVADO |

Foi concedido um prazo de 60 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
gov.br WALDIR TERRA PINTO
Data: 02/09/2025 17:46:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

1. _____

CPF: 310.600.720-68

Documento assinado digitalmente
gov.br FABIO AUGUSTO DORNELLES DO AMARAL
Data: 29/08/2025 10:59:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2. _____

CPF: 905.700.220-53

Documento assinado digitalmente
gov.br BRUNO GALLER KUBELKA
Data: 02/09/2025 16:21:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3. _____

CPF: 122.322.457-05

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCELO SILVEIRA DE ALMEIDA
Data: 28/08/2025 17:11:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marcelo Silveira de Almeida: _____

A447a	<p>Almeida, Marcelo Silveira de</p> <p>Análise da vibração em multiplicadores de velocidade de aerogeradores com rotor de eixo horizontal / Marcelo Silveira de Almeida– 2025.</p> <p>90 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.</p> <p>Orientador: Dr. Waldir Terra Pinto.</p> <p>1. Engenharia Mecânica. 2. Energia eólica. 3. Sustentabilidade. 4. Clima. I. Pinto, Waldir Terra.</p> <p>CDU 621</p>
-------	---

Catálogo na fonte: Bibliotecária Brenda Sequeira CRB10/1979

Dedico este trabalho aos meus queridos pais Marta Beatriz Alves da Silveira e Nolvacir Marques de Almeida. Sem o apoio e incentivo deles, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de manifestar meus sinceros agradecimentos a:

Deus, por me conceder a oportunidade do aprendizado contínuo e me proporcionar saúde, foco, disciplina e resiliência para trilhar o caminho do conhecimento e chegar até aqui;

Minha querida mãe, Marta Beatriz Alves da Silveira (*in memorian*), por todo apoio, confiança, incentivo e amor que me foi dedicado, sempre iluminando o meu caminho e as minhas decisões;

Meu pai, meu ídolo e minha inspiração, Nolvacir Marques de Almeida, por todos os ensinamentos, experiências e aprendizados que a mim foram atribuídos ao longo da vida;

Minha esposa Juliana Nunes Behrend, pela parceria e apoio constante, pelo incentivo, por acreditar no meu potencial e compreender os momentos de ausência durante a realização desta pesquisa;

Ao meu orientador professor Dr. Waldir Terra Pinto, por todo o tempo dedicado nesta pesquisa e pelos inúmeros ensinamentos compartilhados ao longo do programa de pós graduação;

A Universidade Federal do Rio Grande, pela oportunidade de participar do programa de pós graduação em Engenharia mecânica;

Aos meus colegas de universidade que tive a honra de aprender e compartilhar o conhecimento ao longo da minha jornada acadêmica;

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste estudo.

Educação gera conhecimento, conhecimento gera sabedoria,
e só um povo sábio pode mudar seu destino.

Samuel Lima

RESUMO

A capacidade global de produção de energia eólica segue avançando ano após ano, enfatizando a importância e a responsabilidade da transição energética para fontes de energias renováveis. A exemplo disso, destacam-se as energias eólica, solar e hidrogênio verde, que reduzem as emissões atmosféricas, causando o mínimo de impacto à natureza e à sociedade e, conseqüentemente, minimizando as constantes mudanças climáticas. Essas fontes de energia, contribuem diretamente para a preservação do meio ambiente, a sustentabilidade, o fortalecimento e a diversificação da matriz energética, ainda muito dependente dos recursos hídricos e fontes não renováveis. Neste contexto, visando contribuir com a matriz de energias renováveis, este trabalho estuda o comportamento dinâmico da vibração em multiplicadores de velocidade de aerogeradores de rotor de eixo horizontal, analisando a vibração no espectro da frequência e investigando a causa desse fenômeno nos componentes internos de máquinas rotativas. Com o objetivo de buscar soluções para os problemas relacionados a vibração de componentes mecânicos de multiplicadores de velocidade de aerogeradores, realizou-se simulações e análises do comportamento dos componentes mecânicos quando sujeitos a vibração mecânica, visto que este fenômeno físico caracteriza-se por impactar diversas áreas da engenharia, refletindo diretamente na segurança operacional, na eficiência e na disponibilidade de componentes, estruturas e equipamentos. Além disso, esta pesquisa contribuirá com as questões relacionadas a manutenção, auxiliando na tomada de decisões, na análise de dados de confiabilidade ao longo da vida útil do equipamento, colaborando para o aumento da disponibilidade do ativo, reduzindo intervenções de manutenção corretiva e custos operacionais desnecessários. Para desenvolver esta pesquisa, foi necessário em um primeiro momento, realizar uma revisão bibliográfica dos principais materiais relacionados ao assunto, com o objetivo de agregar conhecimento e trazer um embasamento teórico relevante à pesquisa. Nesta pesquisa, o modelo experimental foi elaborado de maneira a simular as condições aerodinâmicas e o comportamento da vibração em componentes de um aerogerador. Para isso, foram realizadas simulações no *Simulink* onde foram inseridas perturbações nos eixos, nas formas de ruídos e pulsos, simulando falhas, anomalias e condições reais de operação. O modelo proposto permitiu investigar a resposta do trem de transmissão a excitações

e falhas típicas em turbinas eólicas com rotor de eixo horizontal. A combinação de análises no tempo e espectrais oferece uma base prática para o monitoramento de condição e diagnóstico. Os resultados aqui apresentados visam contribuir para o desenvolvimento de elementos estruturais, componentes mecânicos, novas tecnologias de fabricação e abordagens de manutenção no contexto de energias renováveis.

Palavras-chave: Energia eólica; Sustentabilidade; Mudanças climáticas; Multiplicadores de velocidade; Vibração mecânica.

ABSTRACT

The global capacity for wind energy production continues to grow year after year, underscoring the importance and responsibility of the energy transition toward renewable sources. Among these, wind, solar, and green hydrogen stand out as key alternatives that reduce atmospheric emissions, generate minimal impact on nature and society, and consequently help mitigate ongoing climate change. These energy sources directly contribute to environmental preservation, sustainability, and the strengthening and diversification of the energy matrix, which still remains heavily dependent on hydropower and non-renewable resources. In this context, and aiming to contribute to the renewable energy matrix, this study investigates the dynamic behavior of vibration in speed increasers of horizontal-axis wind turbines by analyzing vibration in the frequency spectrum and examining the causes of this phenomenon in the internal components of rotating machinery. To address issues related to the vibration of mechanical components in wind turbine gearboxes, simulations and analyses were conducted to evaluate the behavior of mechanical elements under mechanical vibration. This physical phenomenon significantly affects various areas of engineering, directly impacting operational safety, efficiency, and the availability of components, structures, and equipment. Moreover, this research is expected to contribute to maintenance strategies by supporting decision-making and the analysis of reliability data throughout the equipment's service life. Such contributions can enhance asset availability, reduce corrective maintenance interventions, and minimize unnecessary operational costs. To develop this study, an initial bibliographic review of key literature on the subject was conducted to consolidate knowledge and establish a strong theoretical foundation. An experimental model was then developed to simulate aerodynamic conditions and vibration behavior in wind turbine components. Simulations were performed in Simulink, where disturbances were introduced into the shafts in the form of noise and pulses, representing failures, anomalies, and real operating conditions. The proposed model made it possible to investigate the drivetrain's response to typical excitations and failures in horizontal-axis wind turbines. The combination of time-domain and spectral analyses provides a practical basis for condition monitoring and fault diagnosis. The results presented here aim to contribute to the development of structural elements, mechanical components, new manufacturing technologies, and maintenance strategies within the

renewable energy context.

Keywords: Wind energy; Sustainability; Climate change; Speed increasers;
Mechanical vibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Atual matriz energética Brasileira	25
Figura 2- Formação dos ventos devido aos deslocamento de massas de ar	27
Figura 3- Comportamento do vento sob a influência das características do terreno	28
Figura 4 - Aerogerador com rotor de eixo vertical	31
Figura 5 - Principais componentes de um aerogerador	31
Figura 6 - Componentes de uma caixa de velocidades comum	33
Figura 7 - Componentes que danificam em caixas de engrenagens	34
Figura 8 - Número de falhas por componente	35
Figura 9 - Paradas das turbinas em horas por componente	36
Figura 10 – Tipos de cargas em rolamentos	37
Figura 11 – Vista explodida da nacele	48
Figura 12 – Ambiente virtual de simulação <i>Simulink</i>	59
Figura 13 – Lista de parâmetros	60
Figura 14 – Diagrama de programação	60
Figura 15 – Torque extra no rotor	64
Figura 16 - Ruído de torque no gerador	64
Figura 17 – Pulso de torque no gerador	65
Figura 18 – Diagrama de blocos	65
Figura 19 – Chirp de torque no gerador	66
Figura 20 – Diagrama de blocos do Simulink para o torque total do rotor	67
Figura 21 – Diagrama de blocos do Simulink para o torque total do gerador	67
Figura 22 – Séries temporais para as variáveis de saída no scope	68
Figura 23 – Velocidade angular do rotor	68
Figura 24 – Velocidade angular do gerador	69
Figura 25 – Comparativo entre as velocidades angulares do rotor e gerador	69
Figura 26 – Espectro de potência para a velocidade angular do gerador	70
Figura 27- Espectro de potência para a velocidade angular do gerador (3-8s)	71
Figura 28 -Espectro de potência para a velocidade angular do gerador(8-13s)	71
Figura 29 – Diagrama de Bode para a turbina de 10MW	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução das turbinas eólicas	29
Tabela 2 - Blocos do <i>Simulink</i> usados no programa de simulação	61
Tabela 3 - Parâmetros utilizados	64
Tabela 4 - Valores médios	64

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CEMIG	Companhia Energética Minas Gerais
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
COP	Conferência das Partes
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
CV	Cavalo vapor
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
HSS	Eixo de Alta Velocidade
ICT's	Instituições Científica, Tecnológica e de Inovação
IMS	Eixos de velocidade intermediária
LIFE	Laboratório de Interação Fluido Estrutura
LSS	Eixos de baixa velocidade
MAI/DAI	Programa de Mestrado e Doutorado Acadêmico para Inovação
MATLAB	Ambiente de programação e computação numérica
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OAE	Obras de artes especiais
ODS	Objetivo do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
Petrobrás	Petróleo Brasileiro S.A
Proálcool	Programa Nacional do Álcool
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
SGE	Sistema Gerador Eólico
SI	Sistema internacional de unidades
Simulink	Plataforma de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos
Spars	Plataformas Spar

<i>TLPS</i>	Plataformas de Pernas Tensionadas
<i>WEC</i>	<i>Wind Energy Converter</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Romano

$^{\circ}$	Graus
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
F	Força
GW	Gigawatts
Hz	Hertz
k	Constante elástica da mola
Km	Kilometros
kW	Kilowatts
m	Metros
MW	Megawatts
x	Deslocamento
t	Tempo
T_v	Torque aerodinâmico transmitido pelo rotor
T_{pb}	Torque extra para o sistema de baixa velocidade
T_c	Torque de carga do gerador
T_{pa}	Torque extra para o sistema de alta velocidade
H_r	Quantidade de movimento angular do rotor
H_g	Quantidade de movimento angular do gerador
J_r	Momento de inércia de massa do rotor
J_g	Momento de inércia de massa do gerador
K	Rigidez torcional dos eixos
D	Amortecimento viscoso dos eixos
N	Relação entre as velocidades de entrada e saída da caixa de engrenagens
A_d	Amplitude
H	Função degrau unitário aplicada no tempo t_o
$\sin$	Seno
T_{pbd}	Torque adicional aplicado no rotor
T_{ch}	Torque simulado pela função Chirp

A_{ch}	Amplitude simulada pela função Chirp
f_0	Limite inferior da frequência
f_1	Limite superior da frequência
T	Período
d	Derivada

Alfabeto Grego

θ_r	Deslocamento angular do rotor
θ_g	Deslocamento angular do gerador

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 OBJETIVO GERAL.....	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1 A EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	23
2.2 MECANISMOS DE GERAÇÃO DOS VENTOS.....	27
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O REGIME DOS VENTOS	29
2.4 A EVOLUÇÃO DOS AEROGERADORES E SEUS COMPONENTES	30
2.4.1 Aero geradores com rotor de eixo vertical	31
2.4.2 Aero geradores com rotor de eixo horizontal.....	32
2.5 TIPOS DE ROLAMENTOS.....	38
2.5.1 Rolamentos radiais	38
2.5.2 Rolamentos axiais.....	38
2.6 PRINCIPAIS FALHAS EM ROLAMENTOS RELACIONADAS A VIBRAÇÃO .	39
2.6.1 Fadiga.....	39
2.6.2 Má lubrificação.....	40
2.6.3 Contaminação	40
2.6.4 Instalação incorreta e/ou dimensionamento incorreto.....	40
2.6.5 Deformação plástica	40
2.6.6 Corrosão.....	41
2.7 TIPOS DE ENGRENAGENS	41
2.8 TÉCNICAS PREDITIVAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM ENGRENAGENS.....	42
2.9 INTRODUÇÃO A VIBRAÇÃO MECÂNICA E SEU SIGNIFICADO NA ENGENHARIA.....	44
2.10 CONCEITOS E DEFINIÇÕES SOBRE A TEORIA DA VIBRAÇÃO	45
2.11 VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS: DIAGNÓSTICO E PREVENÇÃO DE FALHAS	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1 METODOLOGIA GERAL	48
3.2 MODELO MATEMÁTICO.....	51
3.3 EXITAÇÕES ADICIONAIS.....	53

3.4 RUÍDO GAUSSIANO	53
3.5 PULSO PERIÓDICO NO GERADOR.....	54
3.6 FUNÇÃO CHIRP NO GERADOR.....	54
3.7 REPRESENTAÇÃO EM ESPAÇO DE ESTADOS.....	55
3.8 AQUISIÇÃO DE DADOS ATRAVÉS DO <i>SIMULINK</i>	59
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	63
4.1 Parâmetros de entrada	63
4.1.1 Parâmetros do Modelo.....	63
4.1.2 Torques Base.....	64
4.1.3 Torques Extras no Rotor	64
4.1.4 Torques Extras no Gerador.....	65
4.1.5 Torques Extras não lineares	67
4.1.6 Torques Totais.....	67
4.2. Simulação.....	68
4.3 Resultados das Simulações	70
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5.1 Revisão dos objetivos específicos	74
5.2 Principais conclusões.....	74
5.3 Trabalhos futuros	75
REFERÊNCIAS	76
REFERÊNCIAS NOMINAIS	76
3.1 Referências por Estrato	79
3.2 Referências por Qualis.....	80
3.3 Referências por Data dos Artigos	80

1. INTRODUÇÃO

A demanda para obtenção de energia elétrica através do sistema eólico está cada vez mais crescente no Brasil e no mundo, devido principalmente a questões econômicas e ambientais relacionadas a poluição, aquecimento global, efeito estufa dentre outros fatores extremamente importantes para o meio ambiente, desenvolvimento sustentável, para a sociedade e para a economia global.

Os impactos das mudanças climáticas causadas pelas atividades humanas, combinados com os da variabilidade climática natural (como o fenômeno El Niño), representam um dos maiores desafios a serem enfrentados tanto hoje quanto nos próximos anos, pois exigem preparação e respostas em todos os níveis de governança (Alonso *et al*, 2025).

O uso de eletricidade proveniente de fontes limpas e a melhoria da eficiência na geração, transmissão, distribuição e utilização de eletricidade podem reduzir o crescimento das emissões de carbono. Um maior uso de eletricidade, especialmente de fontes limpas, reduz significativamente o crescimento das emissões de carbono, enquanto que fatores como crescimento populacional, crescimento econômico, urbanização e industrialização tendem a aumentar as emissões. Por outro lado, recursos hídricos naturais e vantagens geográficas afetam fortemente a eficiência da energia hidrelétrica, o que pode contribuir para a redução das emissões de carbono (Widianingsih, 2024).

De acordo com o *Global Wind Energy Council* (GWEC) (2024), no Brasil o setor de energia eólica passou por um crescimento lento, porém nos últimos dez anos ocorreram avanços e investimentos significativos que posicionaram o país como o sexto maior produtor de energia eólica do mundo, reforçando o compromisso com a sustentabilidade. O avanço na produção de energia eólica é um passo importante para que a economia alcance um crescimento econômico de forma sustentável, refletindo em benefícios econômicos, melhorando as políticas sociais e ambientais. Entretanto, apesar do importante crescimento apresentado, o Brasil ainda enfrenta desafios e obstáculos, sendo as políticas públicas essenciais para alavancar este processo.

O ano de 2023 foi crucial para a indústria de energias renováveis no Brasil, caracterizado pela retomada das atividades pós-pandemia, um novo governo nacional e a aceleração do planejamento de energia eólica *offshore*. No entanto, também apresentou desafios significativos, incluindo um grande apagão em agosto e dificuldades para restaurar o fornecimento de energia elétrica em São Paulo. Esses eventos destacaram a necessidade urgente do Brasil aprimorar aspectos de seu sistema elétrico, como confiabilidade e flexibilidade. O país atraiu atenção significativa da comunidade internacional ao colocar a transição energética no centro de sua estratégia de crescimento e diplomacia, de acordo com GWEC (2024).

Em 2023, pelo terceiro ano consecutivo, o Brasil alcançou novos recordes de geração de energia eólica, atingindo 4,8 GW de nova capacidade instalada, mais de 1.000 parques eólicos em operação, ultrapassando 30 GW de instalações totais. A matriz elétrica atingiu a marca de quase 84% de fontes renováveis, consolidando o país como referência internacional em transições para energia limpa, segundo dados do GWEC (2024).

O Brasil, por sua vasta extensão territorial, rica biodiversidade, tem empreendido esforços consideráveis para promover o desenvolvimento sustentável. Entre essas iniciativas, destacam-se programas de monitoramento ambiental, ações de combate ao desmatamento ilegal, expansão de áreas protegidas e estímulos para práticas sustentáveis. Tais medidas visam à preservação e conservação do meio ambiente no país (Melo, Picanço e Espíndola, 2024). Estas ações irão promover a redução dos gases de efeito estufa (GEE) responsáveis pelo desequilíbrio ambiental no planeta. A geração de energia eólica não emite GEE, o que contribui para a sustentabilidade, sendo uma alternativa importante para reduzir os eventos climáticos extremos, a perda de biodiversidade e a escassez de recursos naturais que o mundo vem enfrentando (Melo, Picanço e Espíndola, 2024).

Durante a 28ª Conferência das Partes¹ (COP 28), 132 países assinaram um termo de compromisso assumindo a responsabilidade de triplicar a matriz energética renovável até 2030, incluindo o Brasil. Quando, oficialmente, firmaram-se acordos e decisões na COP 28, no final de 2023, um marco histórico foi alcançado: quase 200 governos concordaram com a necessidade de triplicar a capacidade de energia renovável globalmente e dobrar as melhorias na eficiência energética até 2030, para

¹ Conferência das Partes é uma reunião internacional anual que reafirma o compromisso dos países com uma agenda ambiental.

trilhar o caminho que limita o aquecimento global a 1,5°C. A energia eólica também foi reconhecida no texto da decisão final como uma tecnologia fundamental para a mitigação das mudanças climáticas, que se tornou cada vez mais econômica e disponível. O ano de 2023 apresentou motivos para se ter esperança de que a energia eólica possa contribuir significativamente para atingir o objetivo histórico assumido na conferência, (GWEC, 2024).

Com o aumento da altura das torres, os efeitos de vibração a que os componentes dos aerogeradores ficaram submetidos foram amplamente aumentados, de forma que, nas últimas décadas, pesquisadores e fabricantes de componentes para aerogeradores têm buscado soluções para avaliar vibrações oriundas do funcionamento dos componentes mecânicos e dos efeitos eólicos e sísmicos as quais essas estruturas são submetidas. Tais ações podem provocar tensões excessivas, causando danos e comprometendo a integridade estrutural dos componentes do aerogerador. Mesmo em situações em que estas estruturas possam suportar a ação das cargas dinâmicas, sem obrigatoriamente sofrer danos estruturais, não se pode desprezar os efeitos de fadiga dos materiais constituintes (Lima, Yáñez, 2020).

Considerando que os aerogeradores serão cada vez mais utilizados na geração de energia renovável, este estudo investigou a causa raiz da vibração, analisou o comportamento dinâmico através de cálculos matemáticos e gráficos e buscou soluções para mitigar as principais causas de vibração em componentes mecânicos de aerogeradores. Esta pesquisa visa contribuir com o programa MAI/DAI, que busca fortalecer a pesquisa, o empreendedorismo e a inovação nas Instituições Científica, Tecnológica e de Inovação (ICT's), por meio do envolvimento de estudantes de graduação e pós-graduação em projetos de interesse do setor empresarial, mediante parceria com empresas, chamadas Empresas Parceiras.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as vibrações e respostas dinâmicas em turbinas eólicas, através de cálculos matemáticos e gráficos, contribuindo para o entendimento e análise do sistema e visando garantir a segurança, integridade estrutural, eficiência operacional, fabricação, a disponibilidade, redução de custos e facilidade de manutenção.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a função dos rolamentos e engrenagens em sistemas mecânicos e os efeitos da vibração nestes elementos;
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os principais problemas mecânicos no contexto dos componentes do *drivetrain* de turbinas eólicas;
- Desenvolver um modelo matemático para simular a vibração do *drivetrain*;
- Utilizar o Simulink para resolver e realizar simulações do modelo matemático proposto;
- Utilizar técnicas de processamento de sinais para analisar os resultados nos domínios do tempo e da frequência.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1. No primeiro capítulo discorre-se sobre o tema, a introdução ao problema de engenharia, a motivação e a importância da pesquisa, o objetivo geral, os objetivos específicos e a estrutura da organização da dissertação.

Capítulo 2. Apresenta-se a fundamentação teórica necessária para a realização desta pesquisa. Os subcapítulos abordam uma ampla revisão bibliográfica sobre a vibração mecânica, desde a evolução da matriz energética brasileira, o mecanismo de geração dos ventos, fatores que influenciam no regime dos ventos, evolução dos aerogeradores e seus componentes, tipos de rolamentos, as principais falhas funcionais em rolamentos, tipos de engrenagens, técnicas preditivas para identificação de falhas, introdução a vibração mecânica e seu significado na

engenharia, conceitos e definições sobre a teoria da vibração até o fenômeno de vibração em máquinas.

Capítulo 3. São apresentados os materiais e métodos necessários para a realização do estudo experimental em questão. Os subcapítulos contemplam a metodologia geral para aquisição de dados através do software de simulações e modelagens no espectro da frequência.

Capítulo 4. No quarto capítulo tem-se a análise e discussão dos resultados obtidos através do processamento de sinais experimentais e das simulações computacionais.

Capítulo 5. No quinto e último capítulo são apresentadas as considerações finais, contemplando a revisão dos objetivos específicos estabelecidos, as principais conclusões, sugestões para trabalhos futuros e as referências utilizadas na pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A EVOLUÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

De acordo com a Agência nacional de energia elétrica (ANEEL), (2024), antes da colonização do Brasil, e até mesmo durante boa parte do período colonial, as fontes de energia mais empregadas no país eram fontes renováveis, como as de tração animal para locomoção, a dos ventos para navegação oceânica, o azeite e o sebo para o pouco que havia de iluminação pública. Contudo, a lenha foi o recurso energético dominante nesse período – abundante por conta do desbravamento de florestas para a agricultura e para a pecuária. A partir de meados dos anos 1800, o Brasil iniciou seu processo de industrialização. Com um parque em expansão, mesmo que ainda pouco evoluído e com a iluminação pública avançando, novos recursos energéticos passaram a fazer parte da matriz nacional, como o carvão vegetal, o carvão mineral e o gás. Ainda no século XIX, o país viu crescer o uso de outras formas de se usar energia, como a elétrica, na época de pequeno porte, bem como o querosene e uso do gás para cocção. Mas foi no final do século XIX que as primeiras investigações sobre jazidas de petróleo iniciaram.

No Brasil, o século XX foi marcado pela industrialização, urbanização, expansão das redes de transporte, duas guerras mundiais e desenvolvimento de novas tecnologias que mudaram o panorama energético do país de diferentes maneiras e momentos. O uso intenso da lenha começa a dar espaço para outros recursos, como o carvão mineral, derivados de petróleo, e a hidroeletricidade. Na década de 40, o Estado brasileiro passa a fazer parte do setor de energia elétrica como agente econômico, com a criação de empresas como a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), a Companhia Energética Minas Gerais (CEMIG) e a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE). Na mesma década, a energia elétrica passou a fazer parte das estratégias de desenvolvimento do país e o Brasil começou a discutir, no âmbito da política nacional, como se daria a exploração do petróleo no território brasileiro. O consumo de derivados de petróleo disparou e a de energia proveniente da hidroeletricidade teve aumento considerável. Grandes usinas hidrelétricas foram construídas ao longo das próximas cinco décadas, com destaque para a usina de Itaipu.

Um dos principais motivos para a adoção da expansão da hidroeletricidade no país residiu no fato de que havia crises regionais de suprimento de energia elétrica frequentes na década de 50 e as pesquisas sobre exploração de petróleo feitas pela Petrobras não eram promissoras, levando os governos da época a adotarem essa solução (ANEEL, 2024).

Por volta de 1970, a Petrobras passou a produzir resultados promissores, oriundos das investigações feitas na plataforma continental. Contudo, os dois choques do petróleo em 1974 e 1979, levaram o governo da época a repensar o uso de derivados de petróleo como insumo energético. Foi nesse contexto que surgiu o Programa Nacional do Álcool (Proálcool). O Programa, lançado em 1974, visava aumentar a participação do álcool anidro como aditivo à gasolina. Com a crise de 1979, uma nova fase do Proálcool foi lançada, com objetivos mais ambiciosos, como a produção de álcool hidratado como substituto à gasolina. Com isso, o etanol se torna um importante insumo energético no Brasil. Embora o Programa tenha sido desativado em 1989, algumas normas que tiveram início com ele ainda permanecem em vigor, como a adição de álcool anidro à gasolina. Além disso, a expansão da indústria sucroalcooleira no Brasil permitiu que outro importante insumo energético passasse a fazer parte das possibilidades de geração de energia do país: a biomassa. Já a partir da segunda metade da década de 1970, as descobertas em alto mar impulsionaram a produção de petróleo. Naquele mesmo período, o país vivenciou forte crescimento industrial e o consumo de energia refletia os grandes insumos dominados pelo país: hidroeletricidade e petróleo (ANEEL, 2024).

Com a evolução na produção de petróleo em alto mar, outro importante combustível surge na matriz brasileira: o gás natural. Seu uso intensivo começou no início da década de 1990. Os principais setores usuários do gás eram o de transportes e o de geração de energia elétrica, por meio das termelétricas, que foram pensadas para auxiliar no combate à crise de abastecimento de 2001. As atividades de exploração e de produção do petróleo e do gás natural se mostraram bem sucedidas e, em 2006, o Brasil passou a ser autossuficiente na produção de petróleo. É importante destacar que, ao longo do período que se inicia na década de 1970, o mundo passou a dar mais importância às questões ambientais. Portanto, toda a discussão em torno das políticas e diretrizes relacionadas ao setor de energia foram, pouco a pouco, incorporando o fato de que cada escolha teria seus benefícios e, em contrapartida, seus custos e impactos sociais e ambientais (ANEEL, 2024).

Passado esse breve e resumido histórico da evolução da matriz energética brasileira, conseguimos entender melhor o cenário atual do país e seus desafios e oportunidades. Agora, vamos detalhar o nosso setor, o elétrico.

Nossa matriz elétrica é uma das mais renováveis e diversificadas do mundo. Até 2001, o Brasil possuía um parque gerador predominantemente hidráulico, com 85% da potência instalada proveniente dessa fonte de geração. Naquele ano, o país passou por uma grave crise de abastecimento que teve origem em diversos fatores, dentre eles destaca-se a diminuição da capacidade de armazenamento de água em reservatórios, associada à escassez do recurso hídrico para a geração de energia elétrica. Essa crise levou o país a adotar uma série de medidas, que foram desde a revisão dos modelos de planejamento e operação do sistema, passando por ações de eficiência energética, além da implementação de políticas públicas voltadas à diversificação da matriz elétrica e à expansão das redes de transmissão e de distribuição. Um exemplo dessas políticas é o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). Por meio dele, o Brasil passou a diversificar suas fontes de geração de energia, principalmente por meio da concessão de incentivos para pequenas centrais hidrelétricas, termelétricas a biomassa e usinas eólicas. Ainda surgiram, ao longo dos anos, outras políticas públicas e ações regulatórias que incentivaram a expansão de outras fontes como a solar fotovoltaica, em usinas centralizadas e também de forma distribuída, conhecidas como geração distribuída (GD) (ANEEL, 2024).

Por fim, chegamos a 2024 e a matriz de geração de energia elétrica do Brasil é consideravelmente diferente da produzida em 2001. Atualmente tem-se uma matriz de energia diversificada sem perder sua principal característica – a renovabilidade. O Brasil é atualmente o 6º maior produtor de energia eólica *onshore* e o 6º maior produtor de energia solar fotovoltaica (centralizada e distribuída) do mundo. Além disso, temos um parque térmico no qual cerca de metade das usinas utilizam combustíveis renováveis, como a biomassa. Ainda, contamos com a fonte termonuclear que, embora em um percentual pequeno, contribui para prover flexibilidade operativa ao sistema, especialmente pelo fato das usinas estarem localizadas próximas ao maior centro de carga do país. Mesmo com todo esse movimento de expansão e de diversificação, ainda contamos com cerca de 50% da capacidade de geração de energia elétrica por meio das usinas hidrelétricas (Figura 1) – uma fonte de energia importante para o provimento de flexibilidade e para a

prestação de serviços ancilares essenciais, por conta da entrada expressiva de fontes renováveis que possuem grande variabilidade. No contexto da transmissão, também notamos expansão significativa da rede. Em 2001, sua extensão era de 70 mil km. No final de 2022, a rede de transmissão brasileira atingiu 179 mil km de extensão. E com os recentes leilões de transmissão realizados em 2023 e 2024, além dos previstos para 2025, espera-se que essa extensão chegue a 216 mil km. Como diz um ditado setorial, “não há transição sem transmissão” (ANEEL, 2024).

Figura 1 - Atual matriz energética Brasileira



Fonte: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>

Ao olharmos para o segmento de distribuição, o Brasil se orgulha de fazer parte de um seleto grupo de federações que possui mais de 99% de sua população com acesso à rede elétrica. Em um país de dimensões continentais como o nosso, e com o grau de desenvolvimento econômico e social historicamente desafiador, essa marca deve ser celebrada. A universalização do acesso à energia foi alcançada por meio de importantes políticas públicas, como o Luz para Todos, e ações regulatórias que implementaram adequadamente essas políticas, como a regulamentação da Tarifa Social de Energia Elétrica, de responsabilidade da ANEEL (ANEEL, 2024). Essas são algumas das principais características que fazem com que o setor elétrico brasileiro seja bem diferente do que observamos na maior parte dos demais países.

É possível notar que nosso desafio não é a descarbonização de nossa matriz elétrica – ao contrário do que vários países enfrentam. Também é possível verificar como o país se encontra alinhado às metas do Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), em especial no que se refere ao setor elétrico (ANEEL,2024).

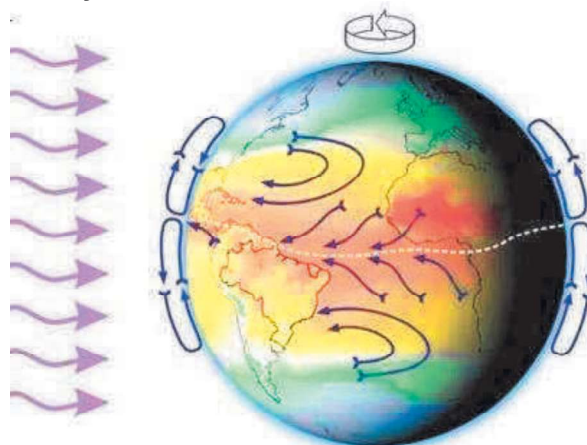
2.2 MECANISMOS DE GERAÇÃO DOS VENTOS

Segundo Dutra (2008), a energia eólica provém da radiação solar uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela terra é convertida em energia cinética dos ventos. Esse percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo.

Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos, entre os quais destacam-se a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo. A seguir serão descritos os mecanismos de geração dos ventos e os principais fatores de influência no regime dos ventos de uma região.

A energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do sol, isto porque os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra. As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Conseqüentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. Observa-se, de acordo com a figura 2, que o deslocamento das massas de ar é que determina a formação dos ventos.

Figura 2- Formação dos ventos devido aos deslocamento de massas de ar



Fonte: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), 2001.

Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de “soprar”, pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no equador e resfriamento nos pólos) estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes e podem ser classificados em:

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.
- Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes.
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos.
- Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas (Dutra, 2008).

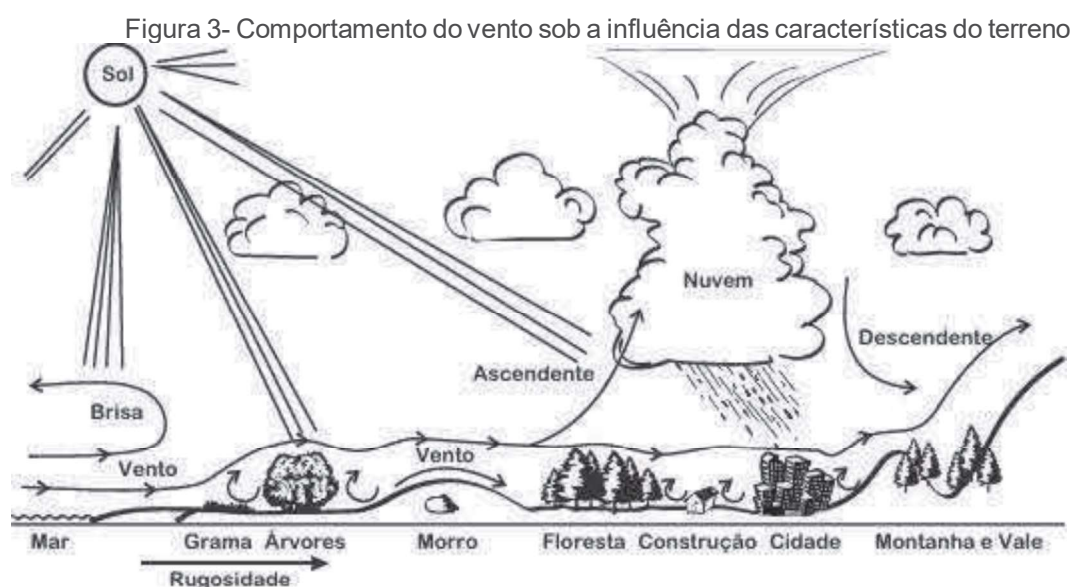
Tendo em vista que o eixo da Terra está inclinado de $23,5^\circ$ em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre. Como resultado surgem os ventos continentais ou periódicos e compreendem as monções e as brisas, (Dutra, 2008).

As monções são ventos periódicos que mudam de direção a cada seis meses aproximadamente. Em geral, as monções sopram em determinada direção em uma estação do ano e no sentido contrário em outra. Em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol, inerentes a cada tipo de superfície (tais como mares e continentes), surgem as brisas que caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e

vice-versa. No período diurno, devido a maior capacidade da terra de refletir os raios solares, a temperatura do ar aumenta e, como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima). À noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar (Dutra, 2008).

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM O REGIME DOS VENTOS

O comportamento estatístico do vento ao longo do dia é um fator que é influenciado pela variação de velocidade do vento ao longo do tempo. As características topográficas de uma região também influenciam o comportamento dos ventos uma vez que, em uma determinada área, podem ocorrer diferenças de velocidade, ocasionando a redução ou aceleração na velocidade do vento. Além das variações topográficas e de rugosidade do solo, a velocidade também varia seu comportamento com a altura (Dutra, 2008). A figura 3 mostra, de uma forma genérica, como os ventos se comportam quando estão sob a influência das características da superfície do solo.



Fonte: CRESESB.

Tendo em vista que a velocidade do vento pode variar significativamente em curtas distâncias (algumas centenas de metros), os procedimentos para avaliar o local, no qual se deseja instalar turbinas eólicas, devem levar em consideração todos os parâmetros regionais que influenciam nas condições do vento. Entre os principais fatores de influência no regime dos ventos destacam-se:

- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar (Dutra, 2008).

2.4 A EVOLUÇÃO DOS AEROGERADORES E SEUS COMPONENTES

Os aerogeradores, também conhecidos como conversores de energia eólica ou WEC (*Wind Energy Converter*), são as máquinas responsáveis por captar a energia cinética do vento e transformá-la em energia elétrica. Representam cerca de 60% do investimento feito em uma usina eólica e trata-se de uma máquina complexa, de médio ou grande porte, com capacidade de geração que varia de 1 a 4MW (Souto, 2019).

Segundo Soares (2017), no início dos anos 80, a potência típica de uma turbina eólica era de 100kW. Em 1993 a potência tinha crescido para 500kW. Em 1995 as turbinas eram tipicamente de 750kW a 1.000kW, dobrando a sua capacidade em poucos anos. Em 2001, potências entre 2.000kW a 2.500kW eram comuns, conforme ilustrado na (Tabela 1):

Tabela 1 - Evolução das turbinas eólicas

Ano	Potência Média	Diâmetro do Rotor
1989	300kW	25m
1993	500kW	45m
1995	1.300kW	60m
1997	1.600kW	80m
1999	2.000kW	100m
2003	3.500kW	112m
2005	5.000kW	126m
2010	7.500kW	160mm
2016	10.000kW	190m
Futuro	12.000kW	250m

Fonte: Soares, 2017.

De acordo com a velocidade de rotação e o tipo de trem de acionamento (*Drivetrain*), os aerogeradores podem ser classificados nas seguintes topologias (Soares, 2017):

- De velocidade fixa e caixa de engrenagem de múltiplo estágio;
- De velocidade variável limitada e caixa de engrenagem de múltiplo estágio;
- De velocidade variável e caixa de engrenagem de múltiplo estágio;
- De acionamento direto e velocidade variável;
- De velocidade variável e caixa de engrenagem de único estágio.

Com o rápido desenvolvimento das tecnologias de energia eólica e o crescimento significativo da capacidade instalada de energia eólica em todo o mundo, diversos conceitos de turbinas eólicas foram desenvolvidos. O sistema de conversão de energia eólica precisa ser mais competitivo em termos de custo, o que tornam necessárias as comparações entre diferentes sistemas de geradores eólicos (Chen; Li, 2008).

2.4.1 Aerogeradores com rotor de eixo vertical

Na indústria, a última turbina de grande porte do tipo vertical deixou de ser utilizada em 1998, por problemas de manutenção, dando espaço para o uso em larga escala de outro tipo. Contudo, para aplicações de pequeno/médio porte, ela ainda é aplicada. A principal vantagem do aerogerador com rotor de eixo vertical (Figura 4) é o fato de não precisar de mecanismos de controle para alterações de direção dos ventos, diminuindo assim a complexidade do projeto da turbina. No entanto, ele

apresenta alguns pontos que desfavorecem a aplicação para projetos que necessitam de uma geração mais acentuada. Entre eles está o fato de que, caso seja necessário a substituição do rolamento principal do rotor (por desgaste, por exemplo), todo o equipamento precisa ser desmontado. Além disso, o arranque inicial é forçado, ou seja, precisa ser empurrado para que inicie o funcionamento. Mas apesar disso tudo, ele ainda é uma alternativa a turbinas com rotores horizontais de pequeno porte, de acordo com (*Windbox*, 2020).

Figura 4 - Aerogerador com rotor de eixo vertical

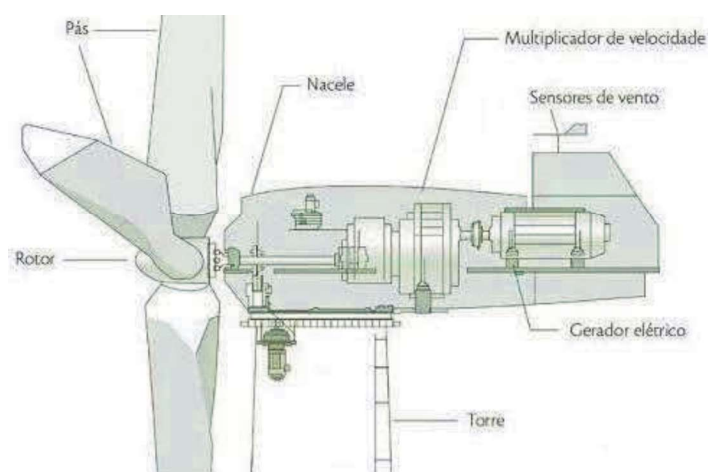


Fonte: <https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>

2.4.2 Aerogeradores com rotor de eixo horizontal

Embasado em *Windbox*, (2020), abaixo apresenta-se a Figura 5 e a descrição dos componentes dos aerogeradores de eixo horizontal mais utilizados, principalmente a nível de produção em larga escala.

Figura 5 - Principais componentes de um aerogerador



Fonte: <https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>

A torre é a maior parte da turbina eólica e serve para dar sustentação ao restante do equipamento. Ela também serve de posicionamento para a nacelle que fica sobreposta à estrutura. Geralmente essas partes são feitas em formato cônico, de aço ou concreto, ou na forma de treliças de aço galvanizado (Windbox, 2020).

As torres que sustentam o aerogerador são flexíveis, esbeltas e expostas a vibrações excessivas, provenientes da interação entre o vento e a estrutura. Essas forças podem induzir vibrações que, ao se aproximarem da frequência natural da estrutura, aumentam sua amplitude de oscilação, acarretando em danos na mesma, diminuindo seu tempo de vida útil, colocando-a em risco (Faria, 2018).

Atualmente no Brasil tem-se presenciado nas mídias, estruturas de concreto que entraram em colapso, devido na maioria das vezes, pela falta de manutenção. Dessa forma, verifica-se a crescente demanda pela manutenção de obras de artes especiais (OAE) em sua maioria pontes e viadutos. Grande parte dessas obras estão sujeitas a vibrações provenientes de forças de vento e do tráfego de pessoas e automóveis. Além disso, quando se trata de estruturas, qualquer tipo de estrutura pode estar sujeita a carregamentos dinâmicos durante a sua vida útil. Mas não somente essas obras de artes especiais estão sujeitas a carregamentos dinâmicos. Com a modernidade das propriedades dos materiais, tem-se a possibilidade de elaborar estruturas cada vez mais esbeltas, resultando em uma menor rigidez e menor peso da edificação, o que pode aumentar o risco de excitação. Além disso,

essa esbeltez resultante diminui a inércia, fazendo com que menores quantidades de energia sejam necessárias para iniciar uma vibração perceptível. Exemplos dessas estruturas são os edifícios altos, torres, chaminés, construções de antenas e pontes (Faria; Poggiali, 2022).

As pás são perfis aerodinâmicos projetados de forma a garantir a melhor obtenção da energia do vento e distribuir essa energia para os demais componentes do sistema. Para isso elas são produzidas com materiais leves e resistentes, como a fibra de vidro ou de carbono e podem medir aproximadamente 100m de comprimento, variando conforme o projeto (*Windbox*, 2020).

O rotor é a parte composta pelas pás (geralmente três) do equipamento e o cubo (peça que une as pás), para que seja possível obter a energia mecânica dos ventos, através da rotação, e assim, transmitir através do eixo central que por sua vez mantém contato com a caixa de transmissão. Na maioria dos casos, o rotor tem de 60m a 150m de diâmetro e conta com um sistema hidráulico que possibilita captar ventos com as pás estando em várias posições, ou até mesmo parar o movimento (*Windbox*, 2020).

Componente essencial do sistema de geração de energia da turbina, a caixa de engrenagens transfere com eficiência a energia rotacional das pás para o gerador. A caixa de engrenagens foi projetada para suportar cargas elevadas e padrões de vento flutuantes, garantindo a máxima eficiência e durabilidade da turbina. Ela transforma a rotação de baixa velocidade e alto torque das pás em rotação de alta velocidade, apropriada para a produção de energia, por meio de um elaborado mecanismo de engrenagens (Raju *et al*, 2025).

Segundo Soares (2017), a caixa de velocidades (Figura 6) por concentrar várias engrenagens, rolamentos, entre outras peças girantes, é considerado o ponto crítico de uma turbina eólica. Uma das razões das falhas nas caixas multiplicadoras está no fato de que este componente recebe alto torque oriundo do rotor das pás, podendo alcançar a 2.000CV, dependendo da turbulência geradas pelo vento na turbina. Outro fator agravante, está no fato de que este tipo de indústria é consideravelmente menos desenvolvida em relação aos outros componentes do Sistema Gerador Eólico (SGE). Isto é explicado pela dificuldade que esta indústria possui em acompanhar o ritmo crescente de aerogeradores desenvolvidos para maiores potências. A deficiência na estimativa precisa das cargas e vibrações exercidas em relação ao local instalado, também contribui consideravelmente para

ampliar este problema.

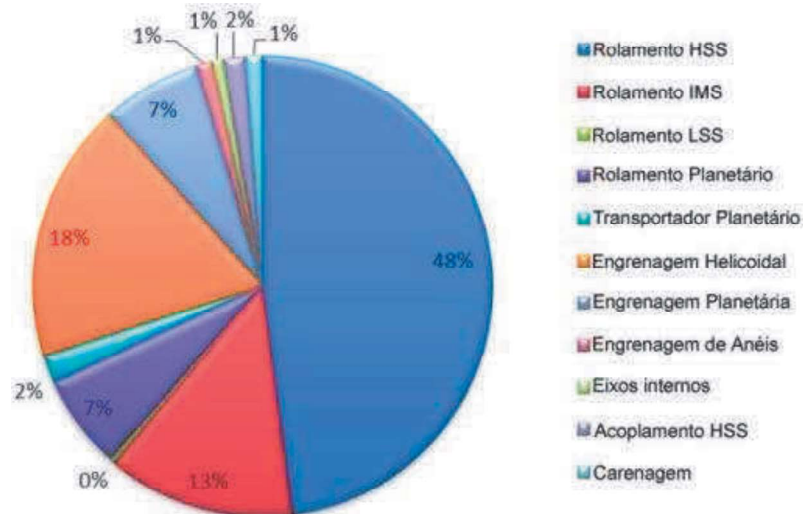
Figura 6 - Componentes de uma caixa de velocidades comum



Fonte: Soares, 2017.

As falhas nas caixas de velocidades das turbinas eólicas podem ser atribuídas a natureza aleatória do vento. Mesmo a menor rajada irá criar uma carga desigual sobre as pás eólicas conectadas ao rotor que, conseqüentemente, irá gerar um torque desforme sobre o eixo e que, por sua vez, irá carregar de forma desigual os rolamentos. Este fenômeno provoca um desgaste prematuro nas engrenagens e rolamentos, causando vibrações e potenciais falhas, principalmente, na parte traseira do componente onde são localizadas as engrenagens de alta velocidade da caixa de câmbio (Figura 7) (Soares, 2017).

Figura 7 - Componentes que danificam em caixas de engrenagens



Fonte: Soares, 2017.

HSS (Eixo de alta velocidade)

IMS (Eixos de velocidade intermediária)

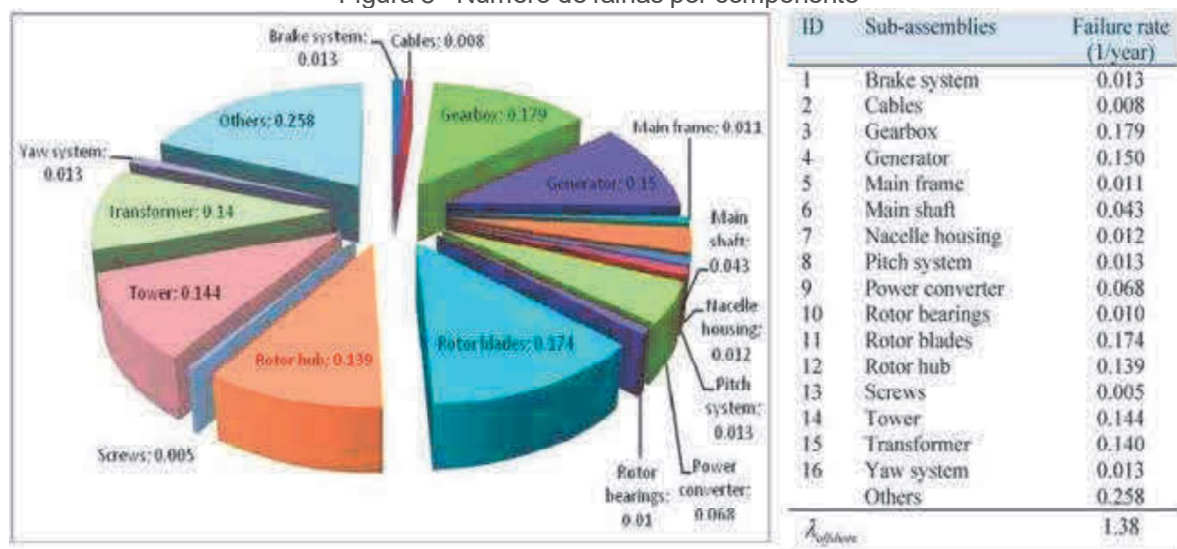
LSS (Eixos de baixa velocidade)

De acordo com Soares (2017), observa-se que a maioria das falhas nas caixas de velocidades são relacionadas a rolamentos e engrenagens de alta rotação. Isso reforça a importância da manutenção preditiva, como por exemplo, as inspeções periódicas, a coleta e análise de óleo lubrificante e a análise constante de vibrações por meio de instrumentos e novas tecnologias.

Contudo, avanços vem sendo observados graças a esforços de organizações e fabricantes, como a *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), que possui programas de estudo compartilhado (*Gearbox Reliability Collaborative*), responsável por identificar as fraquezas e ineficiências do design, concentrando seus esforços nas melhorias dos projetos iniciais. O projeto identifica falhas de equipamentos que são comuns em toda a indústria e aborda deficiências no processo de produção e materiais, contribuindo para as melhorias neste componente (Soares, 2017).

A subestimativa das cargas operacionais e as deficiências inerentes ao projeto da caixa de engrenagens resultaram em caixas de transmissão de turbinas eólicas pouco confiáveis. A falta de contabilidade completa das cargas críticas de projeto, a não-linearidade ou imprevisibilidade da transferência de cargas entre o trem de acionamento e seu dispositivo de montagem são fatores identificados pelo NREL como principais causadores para a redução da vida útil das caixas de velocidades (Soares, 2017).

Figura 8 - Número de falhas por componente



Fonte: Soares, 2017.

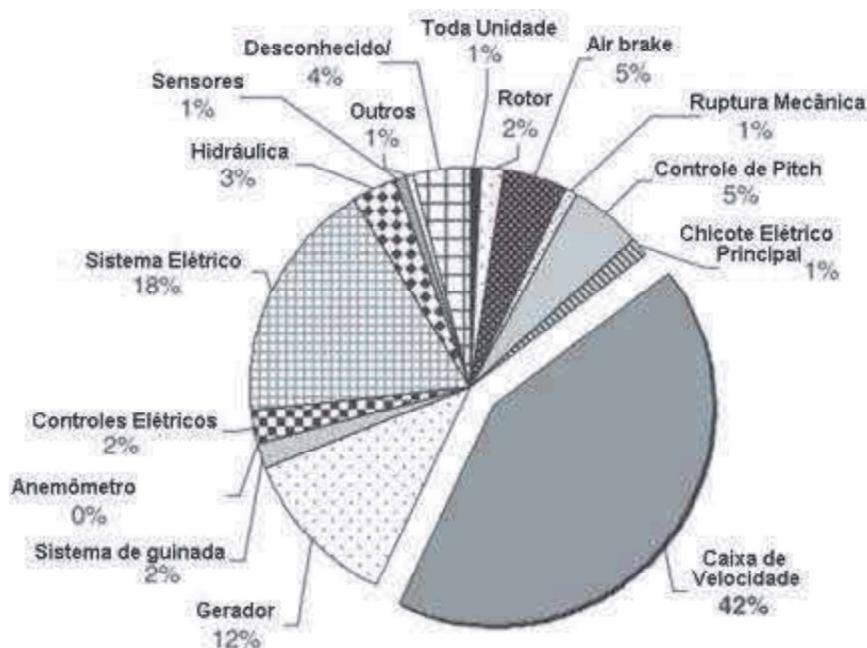
Podemos observar na figura (8) que o componente mais afetado por desgaste corresponde a caixa de velocidades de um sistema aerogerador. Conforme representado na equação (1), tem-se o seguinte resultado:

$$\text{Gearbox} = 0,179 \times 5,6 = 1,00 \quad (1)$$

Isso significa que a cada 5, 6 anos deve-se substituir o *gearbox*. A vida útil de uma turbina eólica operando de 20 a 22 horas/dia é de, aproximadamente, 20 anos. A vida útil de uma caixa de velocidades é de pouco mais de 5 anos.

As manutenções periódicas realizadas nas caixas de velocidades são semestrais e revelam que em torno de 42% do tempo de uma turbina parada por manutenção, conforme a Figura 9, teve como causa problemas na caixa de velocidades (Soares, 2017).

Figura 9 - Paradas das turbinas em horas por componente



Fonte: Soares, 2017.

Durante a vida útil de uma turbina eólica são reparadas, ou até mesmo substituídas, 04 caixas de velocidades. Os problemas observados no óleo das caixas de velocidade são, sobretudo, contaminações por impurezas provocadas por desgaste das engrenagens submetidas às vibrações turbulentas do vento (Soares, 2017).

O gerador é o dispositivo responsável pela conversão da energia mecânica de rotação do eixo, em energia elétrica. Fica instalado no interior da nacelle e pode ser basicamente de dois tipos. O primeiro é o síncrono, que é o caso em que a velocidade de rotação é proporcional à frequência da tensão na qual ele está conectado. Já o assíncrono é quando a velocidade de rotação não é proporcional a essa frequência (*Windbox, 2020*).

Nacelle é a parte mais pesada da estrutura, chegando a mais de 100 toneladas em alguns casos. Por isso a questão de logística torna-se fundamental para ser capaz não só de chegar a locais remotos onde os parques são estabelecidos, como também elevá-la até o topo da torre. Nessa cabine, estão compostas várias partes do aerogerador, como caixa de transmissão, transformador, etc. Ela funciona como uma estação de operação e manutenção onde os funcionários entram e realizam algumas correções no funcionamento (*Windbox, 2020*).

2.5 TIPOS DE ROLAMENTOS

2.5.1 Rolamentos radiais

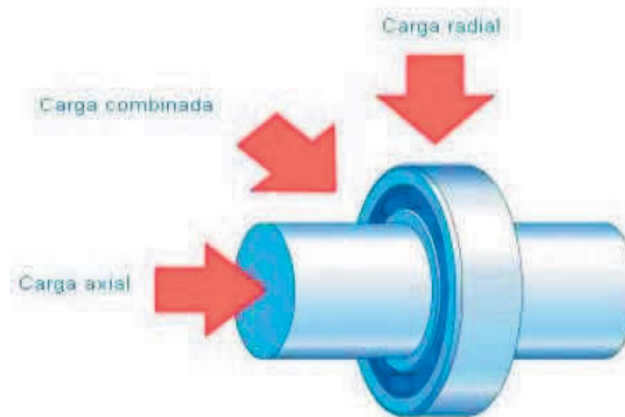
Acomodam cargas que são predominantemente perpendiculares em relação ao eixo. Alguns rolamentos radiais podem suportar apenas cargas puramente radiais, enquanto a maioria pode acomodar algumas cargas axiais em uma direção e, em alguns casos, em ambas as direções (Generoso, 2009).

2.5.2 Rolamentos axiais

Suportam cargas que atuam predominantemente ao longo do eixo. Dependendo do projeto, os rolamentos axiais podem suportar cargas puramente axiais em uma ou em ambas as direções, e alguns podem também acomodar cargas radiais (cargas combinadas). O ângulo de contato determina a qual grupo o rolamento pertence; caso tenha um ângulo de contato maior ou igual a 45° , é determinado como radial, caso contrário, será axial. Existe uma diversidade de rolamentos, variando em modelos, formas e tamanhos. A aplicação abordada neste estudo utiliza como base motores de indução radiais, cuja aplicação utiliza como

sustentação os rolamentos axiais. Esses rolamentos são constituídos de dois anéis também chamados de pistas (pista externa e interna), fabricados em aço especial, separados por fileiras de esferas que são espaçadas por um porta esferas ou porta rolos (gaiola) (Generoso, 2009). A Figura 10 demonstra as aplicações de cargas nos eixos.

Figura 10 - Tipos de cargas em rolamentos



Fonte: <https://www.abecom.com.br/falhas-de-um-rolamento/>

2.6 PRINCIPAIS FALHAS EM ROLAMENTOS RELACIONADAS A VIBRAÇÃO

A maioria dos sistemas mecânicos utiliza rolamentos como sustentação dos eixos de transmissão. Em motores elétricos por exemplo, os rolamentos, geralmente dois, sendo um posicionado na tampa frontal e outro na tampa traseira, desenvolvem a função de suportar o eixo (radial), permitindo realizar movimentos rotacionais com facilidade, minimizando assim a fricção entre as peças móveis. Neste caso, a função dos rolamentos é garantir que o rotor fique suspenso de tal forma que possa girar livremente, evitando contatos físicos entre o rotor e o estator (Menna, 2007).

Ainda segundo Menna, 2007, alguns autores descrevem que a vida útil de um rolamento que está em operação e sob carga é determinada pela fadiga do material e pelo desgaste nas superfícies. Já as falhas prematuras podem ser causadas por diversos motivos, e entre os mais frequentes destacam-se:

2.6.1 Fadiga

É a causa “natural”, que está relacionada à fadiga do material devido às altas

tensões que ocorrem entre as pistas e as esferas durante a operação. Depois de certo tempo, essa fadiga gera rachaduras no material e rompimentos nas pistas. Defeitos que, durante a operação do motor elétrico ou redutor de velocidade, vão aumentando substancialmente podendo chegar à quebra do rolamento que podem até queimar o motor e/ou causar grandes danos as engrenagens do sistema mecânico.

2.6.2 Má lubrificação

A tensão nos corpos rolantes e nas superfícies de rolamento é significativamente aumentada pela lubrificação incorreta ou falta dela, uma vez que o lubrificante distribui parte da tensão, reduzindo o atrito entre as partes rolantes e também impede que o rolamento superaqueça.

2.6.3 Contaminação

A contaminação, por exemplo, por aparas de metal, pode ocorrer devido a vedações defeituosas. A penetração da água também pode levar à falha da lubrificação, pois mesmo pequenas quantidades de água podem gerar algum tipo de oxidação e/ou tornar os lubrificantes inutilizáveis, bem como o surgimento de oxidações.

2.6.4 Instalação incorreta e/ou dimensionamento incorreto

Ocorre em casos que no ato da instalação do rolamento, pode ocorrer imprecisões no alinhamento, ou tensões prejudiciais (pista interna instalada de forma a ficar sob força não linear em sua extensão).

2.6.5 Deformação plástica

Tensões excessivas aplicadas ao rolamento, levam a deformações plásticas da pista. Ressalta-se a importância do dimensionamento correto do tipo de rolamento para cada aplicação, com o objetivo de evitar graves problemas e paradas indesejadas de máquinas e equipamento.

2.6.6 Corrosão

Pode ser uma das causas de dano inicial nas pistas, considerando que, para o perfeito funcionamento dos rolamentos, o sistema de esferas e pistas devem estar apenas com desgastes naturais, já previstos pelo fabricante. Caso ocorra a corrosão, o atrito entre as esferas e as pistas pode crescer gradativamente, podendo levar à quebra do rolamento e possivelmente a queima do motor.

Existe ainda a possibilidade de uma falha ocorrer por mais de um motivo, bem como uma falha pode levar a outra. Os rolamentos, mais especificamente os utilizados em motores elétricos e sistema de redução, dependendo das suas condições na operação, podem apresentar falhas diversas as quais vão reduzir sua eficiência. Diante disso, falhas produzem influência na vibração resultante, podendo até levar o rolamento à quebra, parando a máquina e possivelmente a linha de produção. O fato é que a formação de oxidação e a corrosão, diminuem significativamente a vida útil dos rolamentos, causando na maioria das vezes o travamento e conseqüentemente a quebra dos mesmos (Diarrassouba, 2017).

2.7 TIPOS DE ENGRENAGENS

Denomina-se engrenagem a peça de formato cilíndrico, cônico ou reto, dotada de dentadura externa ou interna, cuja finalidade é transmitir movimento sem deslizamento e potência, multiplicando os esforços com a finalidade de gerar trabalho (Melconian, 2009).

Existem muitas maneira de fabricar dentes de engrenagens, tais como fundição em areia, molgadem em casca, fundição de investimento, fundição em molde permanente, fundição em matriz e fundição em centrífuga. Os dentes também podem ser fabricados mediante o processo de metalurgia do pó: de outra forma, por meio de extrusão, onde uma única barra de alumínio pode ser fabricada e então fatiada em engrenagens. De fato, as engrenagens que suportam altas cargas, em comparação com seus tamanhos, são geralmente feitas de aço e cortadas com cortadores de forma ou de geração (Shigley, Mischke, Budynas, 2005).

2.8 TÉCNICAS PREDITIVAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM ENGRENAGENS

A tecnologia de turbinas eólicas está experimentando um rápido crescimento em termos de tamanho, participação de mercado e design tecnológico. Os custos operacionais e de manutenção determinam diretamente a eficiência do sistema em termos de produção de energia em comparação com outros tipos de usinas. O monitoramento da condição de turbinas eólicas tem sido o principal campo de estudo nos últimos anos, com o objetivo de aumentar a expectativa de vida útil dos componentes e, ao mesmo tempo, reduzir os custos de operação e manutenção. Operadores e pesquisadores estão se concentrando no aprimoramento de técnicas de detecção de falhas para tornar as turbinas eólicas mais confiáveis. A caixa de engrenagens em turbinas eólicas apresenta a maior parcela de tempo de inatividade entre todos os outros componentes, afetando diretamente o custo de operação e manutenção (Salameh *et al*, 2018).

Como um fenômeno inevitável durante a vida útil das engrenagens, o desgaste afeta a durabilidade dos dentes e reduz a vida útil restante do sistema de transmissão. A propagação do desgaste das engrenagens pode levar a falhas graves, como trincas na raiz, lascamento e quebra dos dentes, o que pode causar paradas inesperadas do equipamento ou incidentes perigosos. Portanto, é necessário monitorar a progressão da propagação do desgaste das engrenagens para realizar a manutenção preditiva. A análise de vibração é uma técnica amplamente utilizada e eficaz para monitorar as condições operacionais de máquinas rotativas, especialmente para o diagnóstico de falhas localizadas, como trincas na raiz e lascamento da superfície dos dentes (Feng, Ji, Ni, Beer, 2023).

De acordo com Netto (2018), a manutenção preditiva também é conhecida como manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento. É baseada na tentativa de definir o estado futuro de um equipamento ou sistema, por meio dos dados coletados ao longo do tempo por uma instrumentação específica, verificando e analisando a tendência de variáveis do equipamento. Esses dados coletados, por meio de medições em campo como temperatura, vibração, análise físico-química de óleos, ultrassom e termografia, permitem um diagnóstico preciso. Esse tipo de manutenção caracteriza-se pela previsibilidade da deterioração do equipamento, prevenindo falhas por meio do monitoramento dos parâmetros

principais, com o equipamento em funcionamento. Os conceitos e aplicações da manutenção preditiva já estão inseridos no ambiente de manutenção há muito tempo e efetivou-se como importante ferramenta de produtividade a partir dos anos 70, sendo que sua evolução vem se destacando desde meados dos anos 90 conforme estudiosos das áreas de manutenção.

Manutenção preditiva é um método aplicado na área de manutenção com a finalidade de indicar as condições reais de funcionamento das máquinas com base em dados que informam o seu desgaste ou processo de degradação. Visto então que a proposta da manutenção preditiva é fazer o monitoramento regular das condições mecânicas, eletrônicas, pneumáticas, hidráulicas e elétricas dos equipamentos e instalações e, ainda, monitorar o rendimento operacional de máquinas, equipamentos e instalações quanto a seus processos (Netto, 2018).

Como resultado desse monitoramento, observa-se um aumento dos intervalos dos reparos por quebras (manutenção corretiva) e das manutenções planejadas com base no tempo (manutenção preventiva), bem como um aumento de rendimento no processo produtivo, uma vez que equipamentos e instalações estarão disponíveis por um tempo maior para a operação (Netto, 2018). Portanto trata-se de uma modalidade de manutenção que prediz o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições para que esse tempo de vida seja bem aproveitado. Principais objetivos da manutenção preditiva:

- Determinar antecipadamente a necessidade de serviços de manutenção numa peça ou componente específico de uma máquina ou equipamento;
- Eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção;
- Aumentar o tempo de disponibilidade das máquinas e equipamentos;
- Reduzir as intervenções corretivas;
- Impedir o aumento dos danos;
- Aproveitar a vida útil total dos componentes e de um equipamento;
- Aumentar o grau de confiabilidade das máquinas e equipamentos.

Com base nos objetivos descritos acima, podemos deduzir que eles estão direcionados a trazer como resultado uma redução de custos de manutenção e aumento da produtividade. Para ser realizada a manutenção preditiva é necessário a utilização de aparelhos adequados, capazes de registrar vários fenômenos, tais como:

- Alteração no nível de vibração de equipamentos rotativos.

- Alteração nos níveis de temperatura de equipamentos elétricos e mecânicos.

- Contaminação de óleos lubrificante e hidráulicos.
- Alteração no estado de superfícies.
- Alteração nos níveis de pressão.

A manutenção preditiva tem como objetivo principal prever e encontrar defeitos em estágio inicial, quando ainda são falhas potenciais, com a finalidade de saná-los antes que esse defeito se agrave e se transforme em falha funcional (Netto, 2018).

Com base no conhecimento e análise dos fenômenos, torna-se possível indicar, com antecedência, eventuais defeitos ou falhas nas máquinas e equipamentos, após isso, a manutenção preditiva adota dois procedimentos para atacar os problemas detectados:

- Diagnóstico: Detectada a irregularidade, será necessário efetuar um diagnóstico referente à origem e à gravidade do defeito constatado.
- Análise da tendência da falha: A análise consiste em prever com antecedência a avaria ou a quebra e programar o reparo (Netto, 2018).

Ainda segundo o mesmo autor, existem várias técnicas e métodos de manutenção preditiva disponíveis no mercado, dentre eles:

1. Análise de vibrações;
2. Termografia;
3. Coleta e análise de óleo;
4. Ultrassom;
5. Inspeções.

2.9 INTRODUÇÃO A VIBRAÇÃO MECÂNICA E SEU SIGNIFICADO NA ENGENHARIA

As vibrações mecânicas representam um fenômeno físico importante que permeia diversas áreas da engenharia, desempenhando um papel crucial no desempenho e na segurança de sistemas mecânicos, estruturas e máquinas. O estudo das vibrações é fundamental para entender como as forças dinâmicas interagem com os materiais e componentes, resultando em oscilações que podem ter implicações significativas em projeto e manutenção. No contexto da engenharia, a

compreensão das vibrações mecânicas é essencial em diversas disciplinas, como engenharia estrutural, mecânica, aeroespacial e civil. As vibrações podem surgir devido a diversos fatores, incluindo desequilíbrios em máquinas rotativas, excitações externas, como ventos ou sismos, e a dinâmica dos próprios sistemas sob condições operacionais normais. Portanto, é imperativo que os engenheiros sejam capacitados a identificar, analisar e controlar essas vibrações a fim de otimizar o desempenho funcional de equipamentos e estruturas. Além disso, as vibrações mecânicas podem contribuir para o desgaste prematuro dos materiais e para falhas catastróficas de sistemas, o que torna a análise vibracional parte integrante do ciclo de vida dos produtos (Rao, 2015).

A detecção precoce de anomalias por meio de técnicas de monitoramento de vibrações pode levar não apenas à economia de custos, evitando reparos dispendiosos, mas também aprimorar os níveis de segurança para usuários e operadores. Outro aspecto central sobre as vibrações mecânicas é a chamada ressonância, onde um sistema mecânico pode amplificar oscilações se for estimulado em sua frequência natural. Esse fenômeno pode ser devastador se não for corretamente gerenciado, resultando em danos estruturais e falhas funcionais. Portanto, a identificação das frequências naturais dos sistemas e o desenvolvimento de estratégias para mitigar vibrações indesejadas emergem como imprescindíveis na prática da engenharia. O crescente desafio da automação e do uso de novas tecnologias em projetos modernos também traz à tona a necessidade de um aprofundado entendimento das vibrações mecânicas. Com a complexidade crescente dos sistemas, novos métodos computacionais e analíticos têm sido desenvolvidos para modelar e prever comportamentos dinâmicos, reforçando a importância da vibro-acústica no ciclo de design. Em suma, as vibrações mecânicas não são apenas fenômenos a serem medidos, mas sim, um componente crítico que influencia diretamente a eficácia, durabilidade e segurança de aplicações de engenharia. A necessidade de estudar e compreender profundamente as vibrações mecânicas se tornou um percurso de aprendizado indispensável para os engenheiros contemporâneos (Rao, 2015).

2.10 CONCEITOS E DEFINIÇÕES SOBRE A TEORIA DA VIBRAÇÃO

Ainda segundo Rao (2015), vale ressaltar que a vibração é um movimento

oscilatório em torno de uma posição de equilíbrio. Esse movimento pode se dar de forma periódica ou não periódica, sendo que as vibrações periódicas são aquelas que se repetem em intervalos regulares de tempo, enquanto as não periódicas não seguem um padrão específico. O estudo das vibrações mecânicas geralmente trata de vibrações periódicas, por serem mais comuns em aplicações práticas.

O sistema mais simples que se estuda nas vibrações mecânicas é o sistema massa-mola. Este modelo idealizado consiste em uma massa que está conectada a uma mola, capaz de se deformar. A relação entre a força aplicada, a massa e o deslocamento da mola é geralmente descrita pela Lei de Hooke, que afirma que a força (F) será igual ao produto da constante elástica da mola (k) e o deslocamento (x) da massa relativo à posição de equilíbrio (equação 2) , ou seja:

$$F = -kx. \quad (2)$$

Essa equação é fundamental para criar um entendimento inicial sobre como as vibrações são geradas e mantidas em um sistema dinâmico. Outro conceito-chave é a frequência de vibração, que descreve quantas oscilações um sistema realiza por unidade de tempo, tipicamente expressa em hertz (Hz). A identificação da frequência natural é crucial, pois ela revela a tendência de um sistema vibratório ao oscilar livremente. Os modos de vibração, que representam os padrões de movimento que o sistema pode assumir durante a vibração, também são conceitos imprescindíveis. Cada modo está associado a uma frequência específica e o sistema pode vibrar em diferentes modos simultaneamente, dependendo da natureza das forças atuantes e das condições iniciais (Rao, 2015).

2.11 VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS: DIAGNÓSTICO E PREVENÇÃO DE FALHAS

A vibração em máquinas rotativas por exemplo, é um sinal que indica o estado e a condição dos ativos e é fundamental para o diagnóstico e prevenção de falhas. Através das técnicas de análise de vibrações é possível detectar problemas como por exemplo, desbalanceamento, desalinhamento e folgas excessivas nos componentes. O monitoramento constante, a análise e a tratativa dos dados, são ações essenciais e que garantem a segurança, a confiabilidade e a prolongam a vida útil dos equipamentos. O diagnóstico de falhas por meio da análise de vibrações

envolve a coleta de dados e a aplicação de técnicas de processamento de sinais. Métodos como a Transformada de Fourier, análise de ondas e espectroscopia de vibrações são utilizados para identificar as frequências predominantes das vibrações, permitindo a correlação com diferentes tipos de falhas mecânicas (Rao, 2015).

Uma assinatura de vibração típica para uma máquina rotativa pode revelar múltiplas frequências, onde picos em determinadas faixas de frequência podem indicar problemas específicos, como padrões de batimento que sugerem desalinhamento. Além do diagnóstico, a prevenção de falhas é uma etapa crítica que está intimamente ligada às práticas de manutenção preditiva. A implementação de programas de monitoramento contínuo de vibrações ajuda na detecção precoce de anomalias, possibilitando intervenções antes que as falhas se tornem críticas. Técnicas como a análise de tendências e a filtragem de ruídos permitem que os engenheiros maximizem a eficácia das manutenções programadas, reduzindo custos e aumentando a disponibilidade operacional das máquinas. Outro aspecto importante é a escolha de materiais e projeto das máquinas para minimizar as vibrações iniciais. Compreender a origem das vibrações e utilizar técnicas de amortecimento e isolamento, bem como melhorar o balanceamento dos rotores, são medidas que podem ser adotadas desde o design até a operação das máquinas, garantindo um desempenho mais estável e confiável. Portanto, o entendimento das vibrações em máquinas rotativas não é apenas uma questão de diagnóstico, mas sim uma abordagem holística que abrange a prevenção de falhas, a manutenção contínua e o design eficaz. Em um ambiente industrial cada vez mais competitivo e em busca de eficiência, as práticas de gestão de vibração tornam-se essenciais para a sustentabilidade e o desempenho das operações (Rao, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA GERAL

Este capítulo apresenta a descrição dos procedimentos e materiais empregados para conduzir a análise da vibração induzidas pelo movimento das partes móveis de um sistema mecânico para conversão de energia eólica, instalado em terra. Esses sistemas mecânicos são compostos por diversas partes que podem ser agrupadas em quatro subsistemas:

- Rotor;
- Nacele;
- Torre;
- Fundações.

O rotor é o subsistema que converte a energia cinética do vento em movimento rotativo do sistema. É composto pela turbina, pelo *hub* e pelo *spinner*. A turbina axial é a configuração dominante nas fazendas eólicas. O eixo da turbina axial é paralelo à direção do vento e, portanto, as suas pás são perpendiculares a eixo.

As pás podem ser consideradas superfícies de sustentação que transformam a energia cinética do vento em movimento rotativo do rotor. As pás da turbina são conectadas a uma peça central chamada de *hub* que, por sua vez, é conectado ao eixo de baixa velocidade. A eficiência da conversão depende da velocidade relativa entre o vento e a pá. A velocidade relativa ótima pode ser obtida mediante a mudança da orientação da pá da turbina. Essa mudança é feita pelo mecanismo de *pitch*, ou seja, um mecanismo que gira a pá da turbina para aumentar a eficiência de extração de energia cinética do vento.

A nacele é um subsistema que abriga o sistema de conversão da energia cinética do rotor em energia elétrica. O conceito básico consiste na conexão do rotor com o gerador através de um eixo. O torque do rotor é transmitido para o eixo e aciona o gerador. Entretanto, a velocidade angular do rotor é baixa, não sendo suficiente para gerar energia.

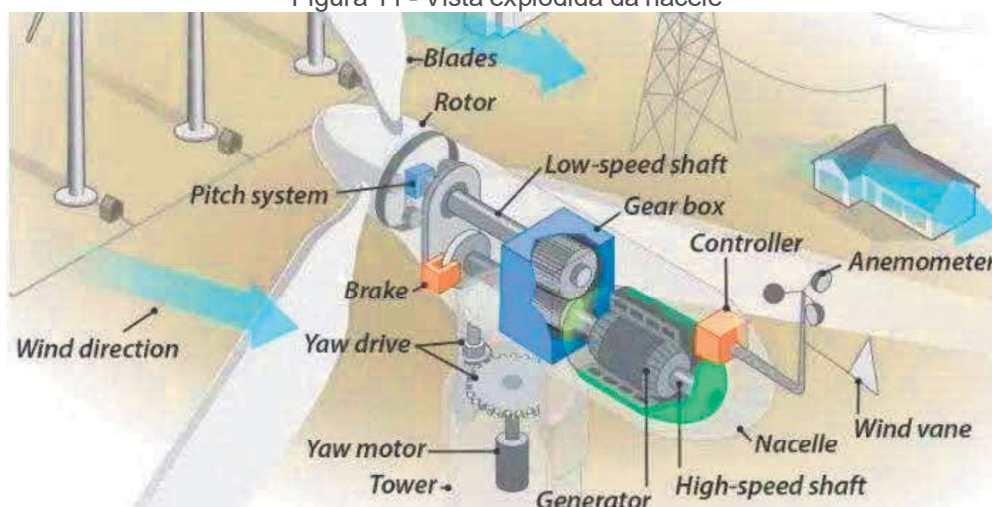
Esse problema é superado mediante a instalação de uma caixa de engrenagens que transforma a baixa velocidade do rotor em alta velocidade, consequentemente transmitindo a rotação correta para o funcionamento eficiente do gerador de energia.

A Figura 11 mostra o esquema constituído por algumas das principais partes do sistema:

- eixo de baixa velocidade;
- caixa de engrenagens;
- eixo de alta velocidade;
- gerador.

O eixo de baixa velocidade transmite o torque do rotor para a caixa de engrenagens, cuja função é transformar a baixa velocidade de entrada para alta velocidade de saída, que é a velocidade de acionamento do eixo de alta velocidade. O eixo de alta velocidade transmite o torque de saída da caixa de engrenagens para o acionamento do gerador, cuja função é converter a energia cinética do vento em energia elétrica. Esse subsistema é chamado de *drivetrain* e é abrigado na nacele. A nacele também abriga o mecanismo que gira o seu eixo de acordo com a velocidade do vento. É comum a instalação de um freio mecânico cuja função é limitar a rotação do eixo e consequentemente a transmissão de energia em caso de eventos extremos, funcionando como um dispositivo de segurança e mantendo a integridade estrutural do equipamento. O sistema mecânico da nacele é completado pela placa de suporte dos sistemas mecânicos da nacele.

Figura 11 - Vista explodida da nacele



Fonte: <https://www.portal-energia.com/funcionamento-de-um-aerogerador/>

O terceiro subsistema é a torre que, basicamente, é a estrutura que tem a função de suportar a nacela e transmitir esses esforços para fundação. Além desses esforços, a torre está sujeita a esforços ambientais e/ou acidentais bem como ao seu peso próprio. Os esforços ambientais são mais significativos nas fazendas eólicas offshore onde as estruturas estão sujeitas às ações de ondas, correntes e ventos fortes.

O quarto subsistema é o responsável pela manutenção da posição da torre eólica. Nas instalações em terra (*Onshore*), esse sistema é, basicamente uma fundação semelhante às usadas em edificações. Podem ser superficiais ou profundas. Nas instalações no mar (*Offshore*), o conceito muda, pois, as ações hidrodinâmicas sobre a torre são dominantes. Nessa situação é comum tratar o conjunto torre e fundação de forma acoplada. Soluções típicas são fundações fixas, que se assemelham às de terra, e sistemas flutuantes, como semissubmersíveis, por exemplo, Plataformas de Pernas Tensionadas (TLPS) e Plataformas Spar (Spars) que são dois tipos de plataformas flutuantes utilizadas em águas profundas, tanto para exploração de petróleo e gás quanto para energia eólica *offshore*. Ambas são fixadas ao fundo do mar através de sistemas de ancoragem, mas diferem em suas características estruturais e de movimento. Essas são soluções similares herdadas do desenvolvimento de plataformas *offshore* utilizadas na exploração de hidrocarbonetos.

O estudo da dinâmica desses sistemas é fundamental sob diversas perspectivas, como:

- integridade estrutural;
- estabilidade;
- mitigação de fadiga, entre outros.

O sistema possui diferentes conjuntos com possibilidade de acoplamento dinâmico em bandas de frequência excitadas por ondas, turbulência, instabilidades hidrodinâmicas e instabilidades aerodinâmicas.

O escopo deste trabalho está limitado ao estudo de vibrações dos sistemas mecânicos embarcados na nacela, isto é, o eixo de baixa velocidade, a caixa de engrenagens, o eixo de alta velocidade e o gerador. Esses sistemas rotativos são excitados pelo rotor da turbina. Do ponto de vista mecânico o problema é categorizado como vibrações de sistemas rotativos.

3.2 MODELO MATEMÁTICO

O trem de transmissão da turbina eólica é modelado de forma simplificada com dois graus de liberdade. As equações (3) e (4) diferenciais de movimento são escritas a partir da aplicação da conservação da quantidade de movimento angular para a rotação das massas do rotor e do gerador.

$$\frac{dH_r}{dt} = T_v - K \left(\theta_r - \frac{\theta_g}{N} \right) - D \left(\frac{d\theta_r}{dt} - \frac{1}{N} \frac{d\theta_g}{dt} \right) + T_{pb} \quad (3)$$

$$\frac{dH_g}{dt} = K \left(\theta_r - \frac{\theta_g}{N} \right) + D \left(\frac{d\theta_r}{dt} - \frac{1}{N} \frac{d\theta_g}{dt} \right) - T_c + T_{pa} \quad (4)$$

Onde:

- H_r é a quantidade de movimento angular do rotor;
- $\frac{d}{dt}$ é a derivada;
- t é o tempo;
- T_v é o torque aerodinâmico transmitido pelo rotor;
- K é a rigidez torcional dos eixos;
- θ_r é o deslocamento angular do rotor;
- θ_g é o deslocamento angular do gerador;
- N é a relação entre as velocidades de entrada e saída da caixa de engrenagens;
- D é o amortecimento viscoso dos eixos;
- T_{pb} é o torque extra para o sistema de baixa velocidade;
- H_g é a quantidade de movimento angular do gerador;
- T_c é o torque de carga do gerador;
- T_{pa} é o torque extra para o sistema de alta velocidade.

A quantidade de movimento angular do rotor é representada pela equação (5):

$$H_r = J_r \frac{d\theta_r}{dt} \quad (5)$$

Onde:

- H_r é a quantidade de movimento angular do rotor;
- J_r é o momento de inércia de massa do rotor;
- $\frac{d}{dt}$ é a derivada;
- θ_r é o deslocamento angular do rotor;
- t é o tempo.

A quantidade de movimento angular do gerador é representada pela equação (6):

$$H_g = J_g \frac{d\theta_g}{dt} \quad (6)$$

O modelo simplificado do trem de transmissão da turbina eólica possui dois graus de liberdade, que correspondem aos deslocamentos angulares θ_r e θ_g . As propriedades físicas do modelo são os momentos de inércia de massa, J_r e J_g , a rigidez torcional do eixo, K , e o amortecimento do eixo, D . O sistema mecânico é excitado pelo torque aerodinâmico médio, T_v , aplicado no rotor, e o torque de carga médio aplicado no gerador, T_c . Os torques adicionais têm origem em perturbações induzidas pelo rotor, por desalinhamento dos eixos e zonas mortas na caixa de engrenagens.

3.3 EXITAÇÕES ADICIONAIS

As excitações adicionais são consideradas com o objetivo de introduzir perturbações nos torques aplicados no rotor e no gerador. Os torques adicionais no rotor são:

Um dos torques adicionais no rotor é aplicado via uma função degrau, cuja expressão é descrita na equação (7):

$$T_{pbd} = A_d H(t - t_o) \quad (7)$$

A_d, t_o

Onde A_d é a amplitude e H é a função degrau unitário aplicada no tempo t_o , definida pela fórmula dada na equação (8) a seguir:

$$H(t - t_o) = \begin{cases} 0 & t < t_o \\ 1 & t \geq t_o \end{cases} \quad (8)$$

3.4 RUÍDO GAUSSIANO

O segundo torque aplicado no rotor corresponde a um ruído Gaussiano, limitado em banda que passa num filtro de primeira ordem. A geração do ruído é dada pela equação (9):

$$y[k] = (1 - a)x[k] + ay[k - 1] \quad (9)$$

Onde, equação (10):

$$a = e^{-2\pi f_c T_s} \quad (10)$$

3.5 PULSO PERIÓDICO NO GERADOR

Pulso é definido por sua amplitude, pelo período T , pela percentagem do período em que pulso é aplicado, τ , e pelo tempo em que a função começa a atuar, t_i . Sendo que, um pulso periódico aplicado a partir de $t_i = 10s$ com período $T = 2s$ e $\tau = 15\%$.

3.6 FUNÇÃO CHIRP NO GERADOR

Um sinal chirp é um sinal sinusoidal de amplitude constante cuja frequência aumenta de baixa para alta frequência (*up-chirp*) ou diminui de alta para baixa frequência (*down-chirp*) durante um curto período de tempo (Iman Firmansyah, Yoshiki Yamaguchi, 2020).

A função Chirp pode ser definida na equação (11):

$$T_{ch} = A_{ch} \sin \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{f_1 - f_0}{2T} t^2 \right) \right] \quad (11)$$

$A_{ch}, f_0, f_1, T_{ch}, T$

Onde:

- T_{ch} é o torque simulado pela função Chirp;
- A_{ch} é a amplitude simulada pela função Chirp;
- $\sin$ é o seno;
- f_1 é o limite superior da frequência;
- f_0 é o limite inferior da frequência;
- T é o período.

Outros torques adicionais são:

- Backlash: zona morta de torque para pequenas deflexões;
- Desalinhamento: excitação periódica acoplada a deformação relativa.

3.7 REPRESENTAÇÃO EM ESPAÇO DE ESTADOS

O modelo matemático é representado por um sistema de duas equações diferenciais (12) e (13) de segunda ordem no qual as variáveis dependentes são os deslocamentos angulares do rotor e do gerador. A aceleração angular do rotor pode ser escrita como:

$$\frac{d^2\theta_r}{dt^2} = -\frac{K_r}{J_r}\theta_r + \frac{K_g}{J_g N^2}\theta_g - \frac{D_r}{J_r}\frac{d\theta_r}{dt} + \frac{D_g}{J_g N}\frac{d\theta_g}{dt} + \frac{T_{pb}}{J_r} \quad (12)$$

E a aceleração angular do gerador pode ser escrita como:

$$\frac{d^2\theta_g}{dt^2} = \frac{K_r}{J_g N^2}\theta_r - \frac{K_g}{J_g N^2}\theta_g + \frac{D_r}{J_g N}\frac{d\theta_r}{dt} - \frac{D_g}{J_g N^2}\frac{d\theta_g}{dt} + \frac{T_{pa} - T_c}{J_g} \quad (13)$$

Onde:

- J_g é o momento de inércia de massa do gerador;
- N é a relação de velocidades de entrada e saída da caixa
- D é o amortecimento viscoso dos eixos
- K é a rigidez torcional dos eixos
- T_{pa} é o torque extra para o sistema de alta velocidade
- T_c é o torque de carga do gerador

Portanto, as acelerações são escritas em função dos deslocamentos e das velocidades angulares, além dos torques externos. A técnica de solução baseada na representação de espaço de estados consiste na transformação do problema envolvendo n equações de segunda ordem em $2n$ equações de primeira ordem. Isso pode ser feito a partir da definição do vetor de estado (14):

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \theta^r & \frac{d\theta}{dt} & \theta^g & \frac{d\theta_g}{dt} \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

De acordo com essa definição é possível substituir as variáveis de estado nas equações diferenciais de movimento, que resulta num sistema de quatro equações (15) e (16) diferenciais de primeira ordem:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\frac{K_r}{J_r} x_1 + \frac{K_r}{J_r N^3} x_3 - \frac{D_r}{J_r N^2} x_2 + \frac{D_r}{J_r N^2} x_4 + \frac{T_v + T_{pb}}{J_r} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_3}{dt} &= x_4 \\ \frac{dx_4}{dt} &= \frac{K_g}{J_g N^2} x_1 - \frac{K_g}{J_g N^2} x_3 - \frac{D_g}{J_g N^2} x_2 + \frac{D_g}{J_g N^2} x_4 + \frac{T_{pa} - T_c}{J_g} \end{aligned} \quad (16)$$

O sistema pode ser escrito na seguinte forma matricial (17):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_r}{J_r} & -\frac{D_r}{J_r N^2} & \frac{K_r}{J_r N^3} & \frac{D_r}{J_r N^2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_g}{J_g N^2} & -\frac{D_g}{J_g N^2} & -\frac{K_g}{J_g N^2} & \frac{D_g}{J_g N^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_v + T_{pb}}{J_r} \\ 0 \\ \frac{T_{pa} - T_c}{J_g} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

Ou, em notação vetorial (variáveis em negrito representam vetores ou matrizes) (18):

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (18)$$

Onde (19):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{0}{K} & -\frac{1}{D} & \frac{0}{K} & \frac{0}{D} \\ \frac{J_r}{0} & \frac{J_r}{0} & \frac{J_r N}{0} & \frac{J_r N}{1} \\ \frac{J K_N}{g} & \frac{J D_N}{g} & -\frac{J K_N^2}{g} & -\frac{J D_N^2}{g} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J} & 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 & T + T & 0 & T & -T \\ \text{ } & \text{ } & \text{ } & \text{ } & \text{ } \\ \text{ } & \text{ } & \text{ } & \text{ } & \text{ } \end{bmatrix}^T \quad (\text{note que o } [\]^T \text{ significa transposição})$$

A saída do sistema pode ser representada pelo vetor $\mathbf{y}$, definido como (20):

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (20)$$

A matriz $\mathbf{C}$ é escolhida de acordo com as variáveis de estado de interesse para a análise e a matriz $\mathbf{D}$ é a matriz de acoplamento entre o vetor de entrada e o vetor de saída. No estudo de vibrações esse acoplamento é, em geral, insignificante. Então a matriz $\mathbf{D}$ é nula. A matriz $\mathbf{C}$ para o caso em que a saída seja as velocidades angulares, que corresponde as posições 2 e 4 do vetor de estado, pode ser escrita como (21) e (22):

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

A matriz de acoplamento:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

A representação em espaço de estados gera um sistema de equações diferenciais (23) no domínio do tempo do tipo:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{aligned} \quad (23)$$

O ponto sobre a variável indica derivada em relação ao tempo. A função de transferência é definida como a razão entre a transformada de Laplace do vetor de saída, $\mathbf{Y}$ e a transformada de Laplace do vetor de entrada, $\mathbf{U}$. Em geral, na análise de vibrações a matriz é representada pela equação (24):

$$\dot{\mathbf{X}}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}\mathbf{U}(s) \quad (24)$$

Usando a propriedade de derivação da transformada de Laplace (25):

$$\mathbf{X}(s) = s\mathbf{X}(s) \quad (25)$$

E substituindo na expressão (26):

$$(s\mathbf{I} - \mathbf{A})\mathbf{X}(s) = \mathbf{B}\mathbf{U}(s) \quad (26)$$

Onde $\mathbf{I}$ é a matriz identidade. A transformada de Laplace do vetor de estado é escrita como (27):

$$\mathbf{X}(s) = \left[(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \right] \mathbf{U}(s) \quad (27)$$

A transformada de Laplace do vetor de saída é (28):

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{C}\mathbf{X}(s) + \mathbf{D}\mathbf{U}(s) \quad (28)$$

Substituindo a transformada de Laplace do vetor de estado chega-se a (29):

$$\mathbf{Y}(s) = [\mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}]\mathbf{U}(s) \quad (29)$$

Portanto, a expressão para a função de transferência fica (30):

$$\mathbf{G}(s) = \frac{\mathbf{Y}(s)}{\mathbf{U}(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (30)$$

O vetor de saída no domínio do tempo pode ser obtido pela inversa da transformada de Laplace, ILT (31):

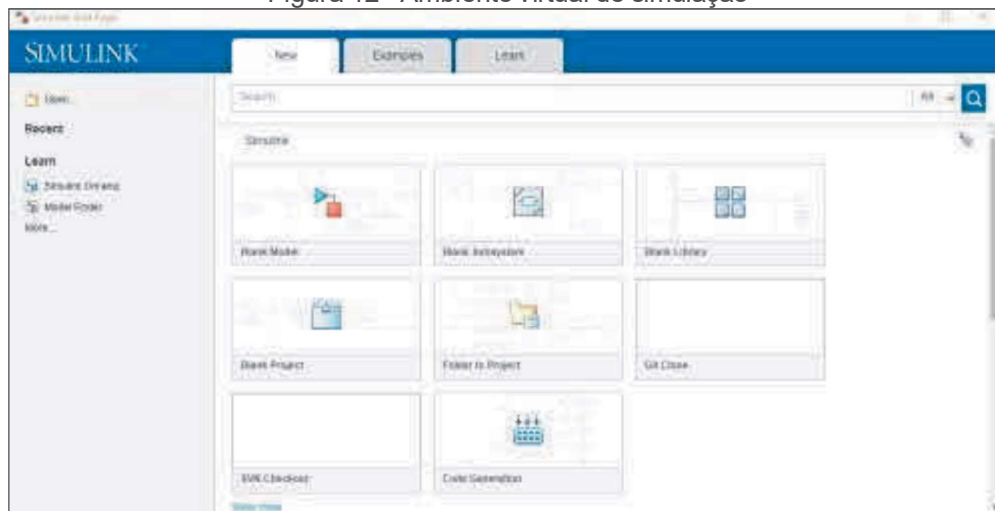
$$\mathbf{y}(t) = \text{ILT}[\mathbf{G}(s)\mathbf{U}(s)] \quad (31)$$

3.8 AQUISIÇÃO DE DADOS ATRAVÉS DO *SIMULINK*

Neste estudo foi utilizado o *software* de simulação *Simulink*, disponível no Laboratório de interação fluido estrutura (LIFE) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). O *Simulink* é um software gráfico de simulação desenvolvido pela *MathWorks* que funciona a partir do *MATLAB* e suas *Toolboxes*. A licença disponível consiste no *MATLAB/SIMULINK* e na *Signal Toolbox*. A ausência da *Toolbox* de controle e *SIMSCAPE* torna a modelagem um pouco mais complexa. Por exemplo, a *Toolbox* de controle possui funções capazes de modelar o problema a partir da representação do espaço de estados diretamente das matrizes de estado.

Além disso, o *Simulink* é uma ferramenta de modelagem, simulação virtual e análise de sistemas dinâmicos, utilizado em aplicações matemáticas, projetos de engenharia e análises científicas no âmbito acadêmico e profissional, capaz de criar modelos e protótipos muito semelhantes aos reais, conforme exemplo na (Figura 12).

Figura 12 - Ambiente virtual de simulação



Fonte: Print de tela simulink

A seguir, a Figura 13 mostra a lista de parâmetros utilizados para realizar as simulações no Simulink.

Foram considerados como dados do sistema:

- Inércia do rotor;
- Inércia do gerador;
- Relação da caixa de engrenagens;
- Rigidez torcional do eixo;
- Amortecimento torcional.

Foram considerados como torques de entrada:

- Torque aerodinâmico nominal;
- Torque efetivo do gerador.

Foram considerados como não linearidades ou falhas:

- Folga angular equivalente;
- Desalinhamento dos eixos;
- Variação da frequência.

Foram considerados como excitações extras:

- Função degrau;
- Função pulso;

- Ruído no rotor;
- Função chirp.

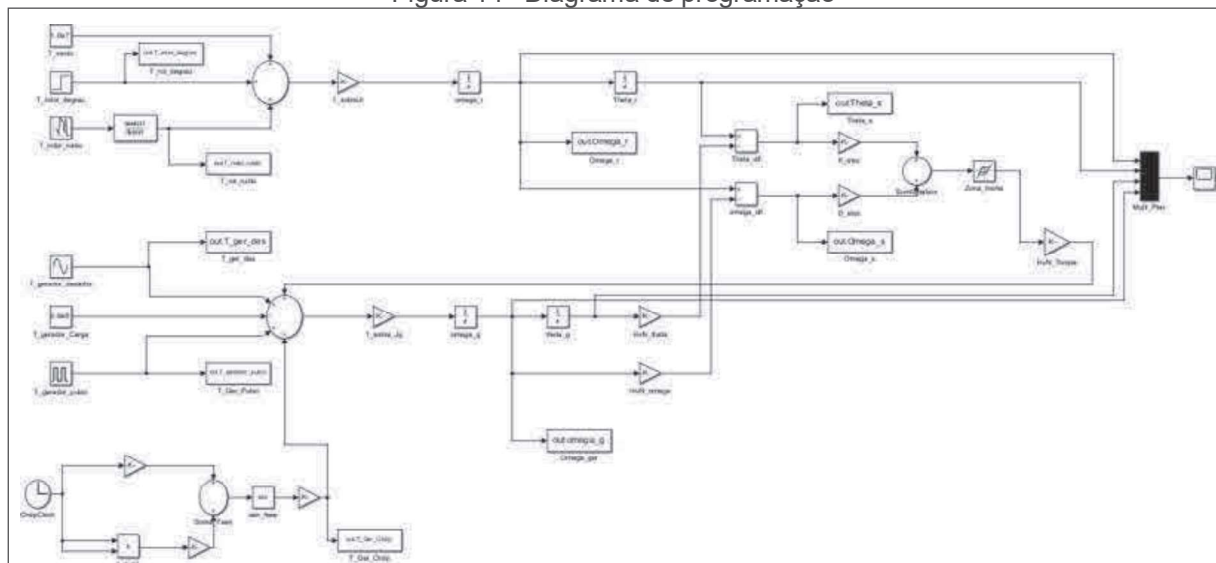
Figura 13 - Lista de parâmetros

Parâmetro	Símbolo	Unidade
Momento de inércia do rotor	J_r	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Momento de inércia do Gerador	J_g	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Rigidez torcional do eixo	K	$\text{N} \cdot \text{m} / \text{rad}$
Amortecimento torcional do eixo	D	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$
Relação da caixa de engrenagens	N	1
Torque rotor (vento)	T_r	$\text{N} \cdot \text{m}$
Torque extra no Rotor: Degrau	T_{degrau}	$\text{N} \cdot \text{m}$
Torque extra no rotor: Ruído	T_{ruido}	$\text{N} \cdot \text{m}$
Torque gerador (carga)	T_{carga}	$\text{N} \cdot \text{m}$
Torque extra no gerador: Pulso	T_{pulso}	$\text{N} \cdot \text{m}$
Torque extra no gerador: Chirp	T_{chirp}	$\text{N} \cdot \text{m}$
Torque extra: Folga engrenagem	T_{folga}	$\text{N} \cdot \text{m}$
Torque extra: Desalinhamento	T_{des}	$\text{N} \cdot \text{m}$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

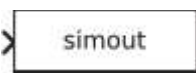
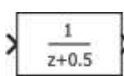
A Figura 14 mostra o diagrama de programação para a simulação do problema do trem de transmissão de uma turbina eólica, considerado nessa pesquisa e a Tabela 2 apresenta um resumo dos blocos utilizados e suas funções.

Figura 14 - Diagrama de programação



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 2 - Blocos do *Simulink* usados no programa de simulação

Bloco	Ícone	Descrição
Add		Soma
Backlash		Gerador de zona morta
Clock		Clock da função chirp
Constant		Constante
Gain		Ganho
Integrator		Integrador
Mux		Multiplex
Noise		Ruído gaussiano
Product		Produto
Pulse		Pulso retangular
Scope		Janela de saída
Sine		Função seno
Step		Função degrau
Sum		Soma
To Workspace		Saída para o ambiente MATLAB
Transfer function		Função de transferência
Trigonometric		Função trigonométrica: seno

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta o procedimento para aplicação do simulador desenvolvido no *MATLAB/Simulink* a partir de parâmetros compatíveis aos de uma turbina eólica com potência de 10 MW. O capítulo está dividido em três seções adicionais. A primeira seção apresenta o detalhamento dos procedimentos e definições dos dados de entrada. Esses procedimentos podem ser interpretados como o pré-processador do modelo. A segunda seção aborda as questões relativas à execução do programa e os resultados fornecidos para as variáveis de saída. A terceira seção apresenta a análise dos resultados, sobretudo no que se refere à determinação dos espectros de potência e dos diagramas de Bode das séries temporais de saída do modelo.

4.1 Parâmetros de entrada

Os parâmetros de entrada são separados em diferentes grupos como parâmetros do modelo, torques médios de vento e carga no gerador, perturbações nos torques e perturbações introduzidas por aspectos não lineares como as decorrentes de folga na caixa de engrenagens e desalinhamento entre os eixos. Os parâmetros do modelo e os torques médios são considerados constantes durante a simulação.

4.1.1 Parâmetros do Modelo

Os parâmetros do modelo são as inércias do rotor e do gerador, a rigidez e o amortecimento à torção dos eixos e a relação de velocidades de entrada e saída da caixa de engrenagens. A (Tabela 3) mostra os valores utilizados para uma turbina de 10 MW de potência.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados

Parâmetro	Símbolo	Valor
Momento de inércia do rotor	J_r	$8,0E7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Momento de inércia do Gerador	J_g	$1,5E3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Rigidez torcional do eixo	K	$1,5E9 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$
Amortecimento torcional do eixo	D	$2,0E6 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$
Torque extra: Folga engrenagem	T_{folga}	$\text{N} \cdot \text{m}$
Torque extra: Desalinhamento	T_{des}	$\text{N} \cdot \text{m}$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.2 Torques Base

Os torques bases nos eixos do trem de transmissão são:

- 1) O torque aerodinâmico transmitido pelo rotor ao eixo de baixa velocidade, e
- 2) O torque de acionamento do gerador ao qual o eixo de baixa velocidade é submetido.

Os valores utilizados na Tabela 4 correspondem aos valores médios para uma turbina de 10 MW.

Tabela 4 - Valores médios

Parâmetro	Símbolo	Valor
Torque rotor (vento)	T_v	$1,0E7 \text{ N} \cdot \text{m}$
Torque gerador (carga)	T_{carga}	$9,0E6 \text{ N} \cdot \text{m}$

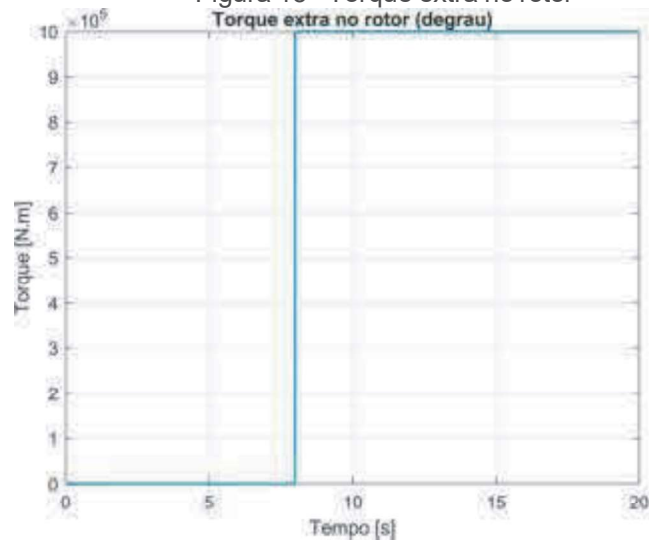
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.3 Torques Extras no Rotor

Torques extras são aqueles que emulam eventos físicos e podem levar ao fortalecimento da vibração no trem de transmissão. Nesta simulação, o torque transmitido pelo rotor é perturbado por dois torques adicionais:

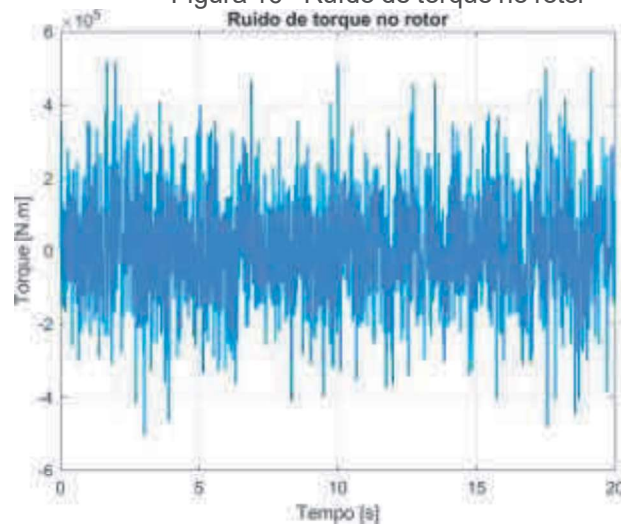
- 1) O torque aplicado abruptamente (função degrau) após 8 segundos do início da simulação, conforme mostra a Figura 15;
- 2) Um torque aleatório presente no rotor, devido às vibrações aleatórias da turbina. Este torque é gerado por um número aleatório, gerando um ruído gaussiano com filtro de primeira ordem, conforme a Figura 16.

Figura 15 - Torque extra no rotor



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 16 - Ruído de torque no rotor

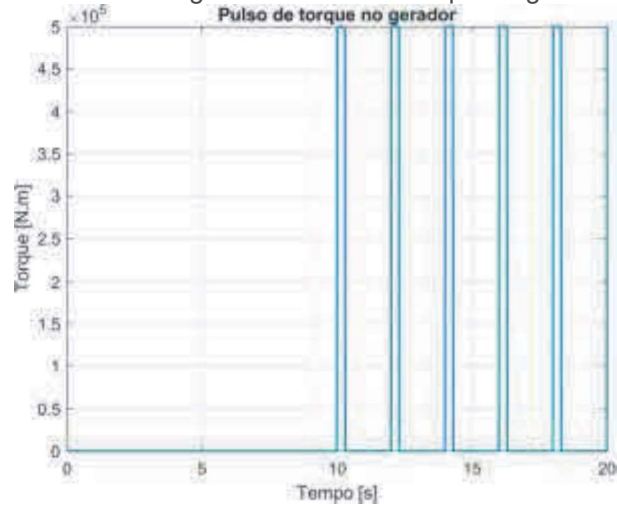


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.4 Torques Extras no Gerador

Os torques extras no gerador são representados por uma função pulso e pela função chirp. A (Figura 17) mostra o pulso gerado nesta simulação:

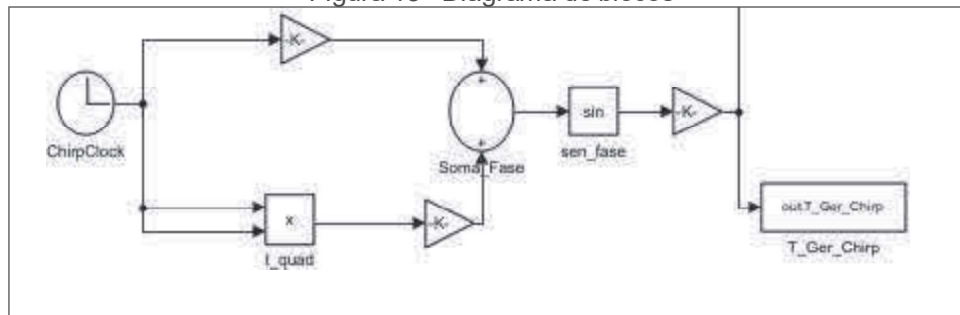
Figura 17 - Pulso de torque no gerador



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O torque extra corresponde a uma função Chirp, conforme definição apresentada no capítulo 3. A Figura 18 mostra o diagrama de blocos do *Simulink* para gerar o torque.

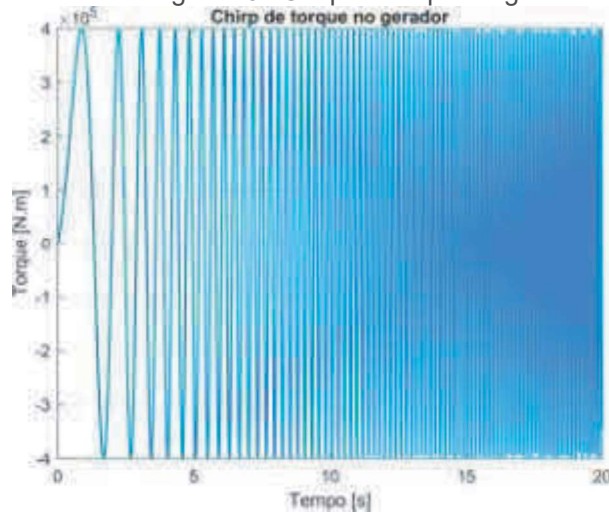
Figura 18 - Diagrama de blocos



Fonte: Acervo LIFE

O bloco *ChirpClock* gera o vetor tempo. Esse vetor é multiplicado pelo ganho representado no diagrama de blocos triangulares (o ganho é igual à frequência inicial). O ramo inferior usa o bloco *Product* para elevar o tempo ao quadrado que posteriormente é multiplicado pelo ganho (metade da diferença entre frequências). A soma dos dois ramos produz a fase da função seno, que é calculado pelo bloco *sin* e multiplicado pela amplitude. O resultado final é o torque mostrado na Figura 19 a seguir:

Figura 19 - Chirp de torque no gerador



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

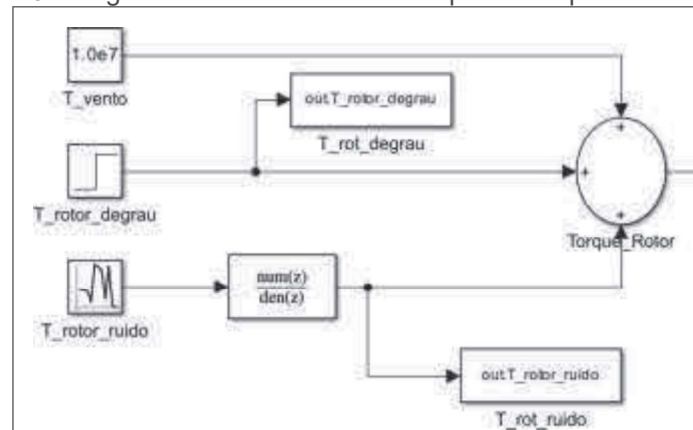
4.1.5 Torques Extras não lineares

A consideração de excitações não lineares é também introduzida no modelo na forma de torques aplicados. Dois torques são considerados, um induzido pelo desalinhamento dos eixos e o outro induzido pela folga no sistema de engrenagens. O primeiro é aplicado na massa do rotor e o segundo na massa do gerador.

4.1.6 Torques Totais

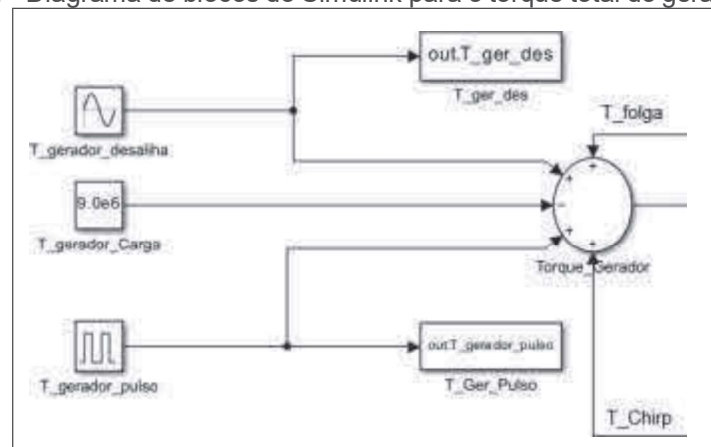
Os torques de excitação totais nas massas do rotor e do gerador resultam da soma dos torques de base, dos torques extras e dos torques induzidos por defeitos do sistema. A Figura 20 mostra o diagrama de blocos do *Simulink* para o torque total no rotor, enquanto a Figura 21 mostra o diagrama de blocos para o torque total no gerador.

Figura 20 - Diagrama de blocos do Simulink para o torque total do rotor



Fonte: Acervo LIFE

Figura 21 - Diagrama de blocos do Simulink para o torque total do gerador

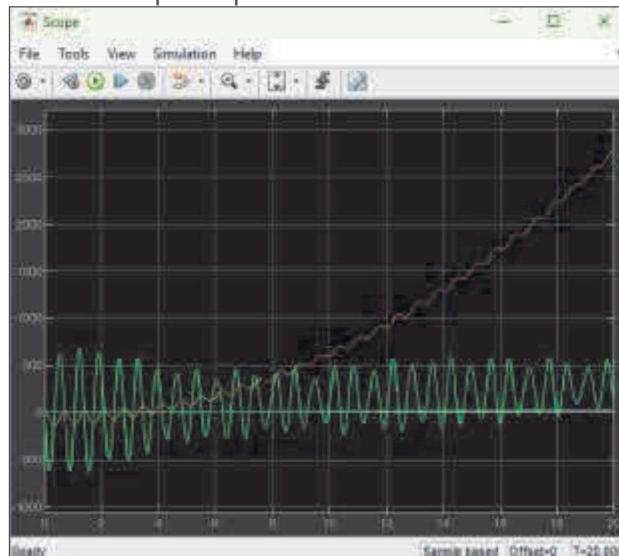


Fonte: Acervo LIFE

4.2. Simulação

Após as especificações dos parâmetros de entradas e dos diversos torques de excitação o modelo está apto para realizar a simulação e fornecer as variáveis de saída. Neste modelo, as variáveis de saída são os deslocamentos e velocidades angulares do rotor e do gerador. Uma prévia das séries temporais das variáveis de saída pode ser visualizada no bloco *scope* do *Simulink*, conforme a Figura 22 a seguir:

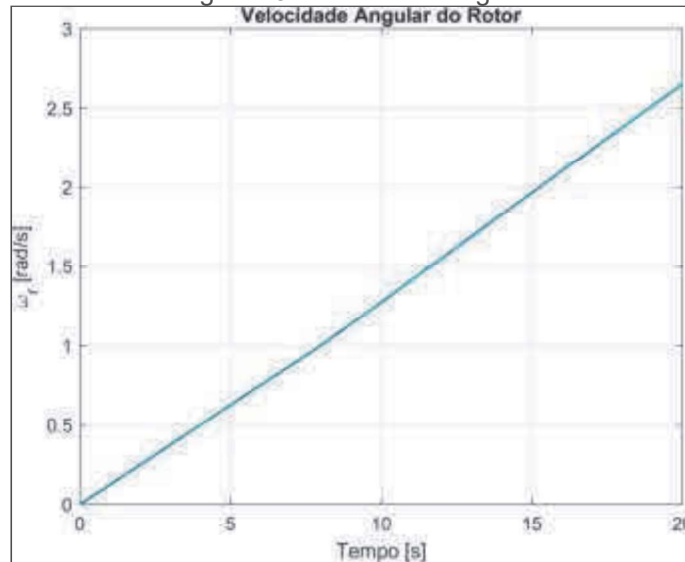
Figura 22 - Séries temporais para as variáveis de saída no scope



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

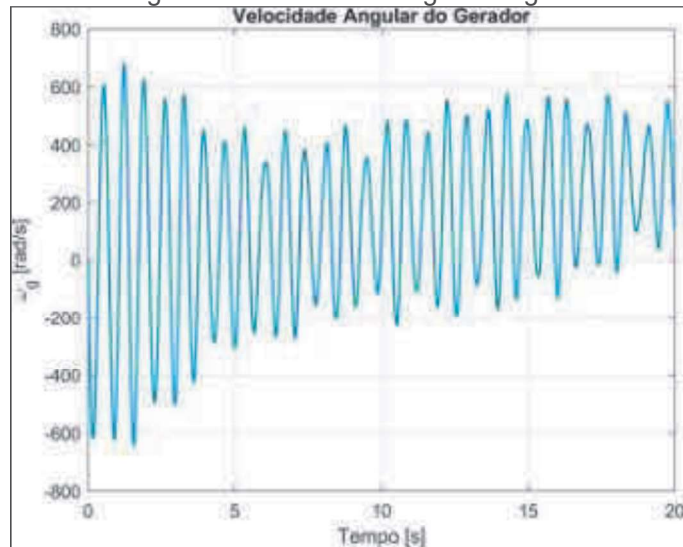
O *Simulink* permite que as séries temporais das variáveis sejam enviadas para a área de trabalho do *MATLAB*. Neste ambiente é realizado o processamento e análise dos resultados. As Figuras 23 e 24 mostram as séries temporais das velocidades angulares do rotor e do gerador.

Figura 23 - Velocidade angular do rotor



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 24 - Velocidade angular do gerador

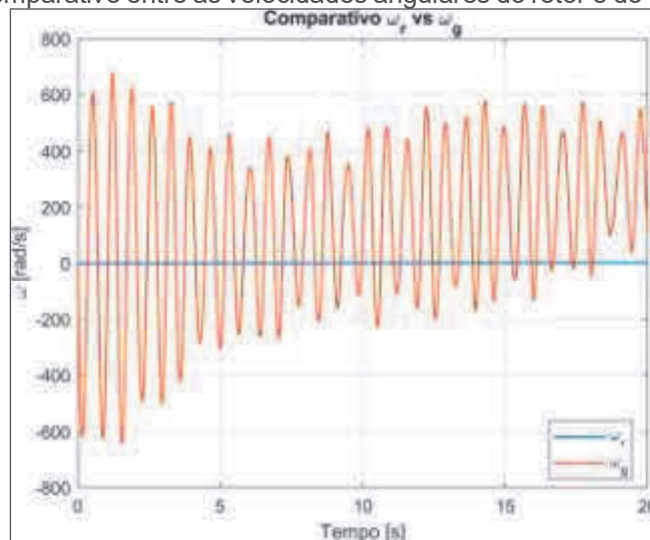


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.3 Resultados das Simulações

O acesso às séries temporais no ambiente de trabalho do *MATLAB* acrescenta grande flexibilidade para o processamento e análise dos resultados, nos domínios de tempo e frequência. A Figura 25 mostra um gráfico com a comparação entre as velocidades no rotor e no gerador. Embora as análises no domínio do tempo sejam importantes no estudo de vibrações, as análises no domínio da frequência são mais efetivas no processo de identificação das causas da vibração.

Figura 25 - Comparativo entre as velocidades angulares do rotor e do gerador



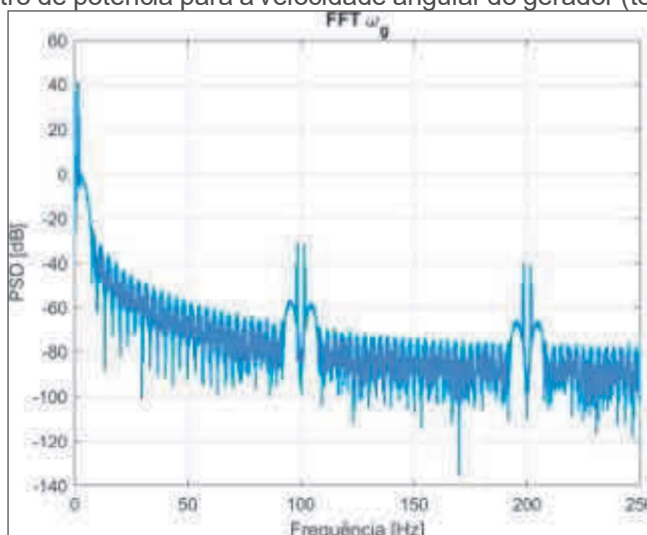
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A transformação de séries temporais no domínio do tempo para domínio da frequência é usualmente feita mediante a aplicação da transformada de Fourier. O *MATLAB* possui uma *toolbox* de análise de sinais que possui diversas funções de alto nível para a determinação do espectro de potência dos sinais, como por exemplo, as funções *periodogram* e *pwelch*. A algoritmo essencial para o processamento e análise de dados é o FFT (*Fast Fourier Transform*). O modelo desenvolvido neste trabalho usa as funções da *Signal Processing Toolbox* do *MATLAB*. Essencialmente, essas funções fornecem o espectro de potência e a frequência. A taxa de amostragem do sinal digital é fundamental para a identificação da frequência. O teorema de Nyquist diz que a máxima frequência sem ambiguidade de uma série temporal é igual a metade da frequência de amostragem.

A análise do espectro de potência para identificar pontos de interesse é feita a partir de gráficos do espectro versus frequência. Usualmente, os gráficos são construídos na escala natural (Potência vs frequência) ou em escala semi- logarítmica, onde a potência do espectro aparece em Decibéis e a frequência em Hertz. A segunda alternativa é mais usada na análise de vibrações.

A Figura 26 a seguir mostra o gráfico do espectro de frequência para a velocidade angular de saída para toda a amostra.

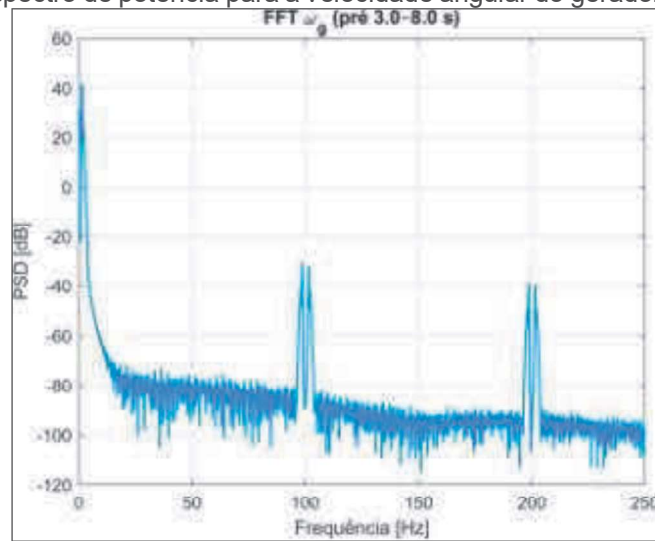
Figura 26 - Espectro de potência para a velocidade angular do gerador (todo o período)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

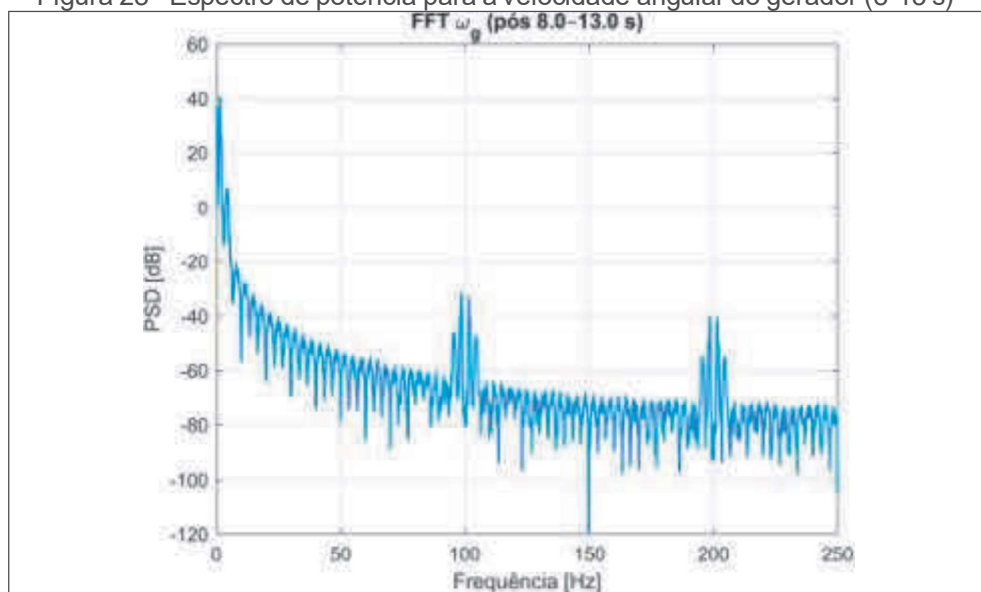
A Figura 27 mostra o mesmo espectro para o intervalo entre 3 e 8 segundos. Esse intervalo é anterior a aplicação do torque extra em função degrau. A Figura 28 mostra o espectro para o período entre 8 e 13 segundos.

Figura 27 - Espectro de potência para a velocidade angular do gerador (3-8 s)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

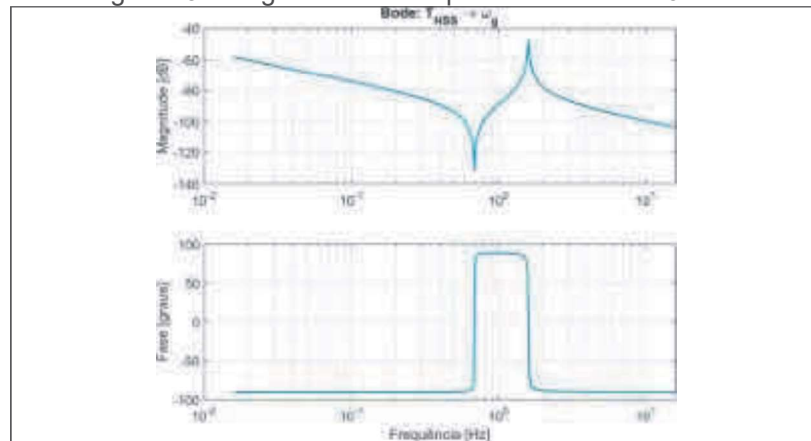
Figura 28 - Espectro de potência para a velocidade angular do gerador (8-13 s)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

É notável a mudança do espectro para o entorno das frequências de 100 e 200 Hz. Outro gráfico importante na análise de vibração é o diagrama de Bode, mostrado na Figura 29 a seguir:

Figura 29 - Diagrama de Bode para a turbina de 10 MW



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O diagrama de Bode é composto por dois gráficos, um expressando a magnitude do ganho em Decibéis e log da frequência. O segundo gráfico expressa a fase em graus versus o log da frequência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Revisão dos objetivos específicos

Esta pesquisa apresentou um estudo abrangente sobre o comportamento dinâmico da vibração mecânica em torres eólicas, através de uma campanha experimental, simulações e modelagens no espectro da frequência utilizando o software *Simulink*. Os objetivos específicos estabelecidos foram alcançados de forma satisfatória. O modelo experimental evidenciou o comportamento da vibração em componentes mecânicos de uma caixa de engrenagens de uma turbina eólica de 10 MW, simulando dados reais presentes no sistema, incluindo possíveis falhas ou anomalias em componentes mecânicos da caixa de engrenagens e eixos de transmissão. Os resultados das simulações possibilitaram uma análise detalhada do comportamento dinâmico da vibração nos componentes mecânicos mais críticos de uma turbina eólica.

5.2 Principais conclusões

Nesta pesquisa, o modelo experimental foi elaborado de maneira a simular as condições aerodinâmicas e o comportamento da vibração em componentes de um aerogerador. Para isso, foram realizadas simulações no *Simulink* onde foram inseridas perturbações nos eixos, nas formas de ruídos e pulsos, simulando falhas, anomalias e condições reais de operação.

O modelo proposto permitiu investigar a resposta do trem de transmissão a excitações e falhas típicas em turbinas eólicas com rotor de eixo horizontal. A combinação de análises no tempo e espectrais oferece uma base prática para monitoramento de condição e diagnóstico.

Ademais, o modelo é bastante flexível no que tange ao aumento da sua complexidade mediante o acréscimo de elementos dinâmicos assim como melhorias nas análises dos dados brutos, isto é, além do pós-processador desenvolvido.

A principais conclusões dessa pesquisa são:

- a) A utilização do software *Simulink*, revelou resultados eficientes. As séries temporais no ambiente de trabalho do *MATLAB*, contribuíram positivamente para o processamento e análise dos resultados, principalmente nos domínios de tempo e frequência;
- b) Foi possível analisar os dados gerados através das excitações inseridas no sistema, demonstrando que em torres eólicas a maior fonte de vibração mecânica é advinda da caixa de velocidades e seus componentes internos, como por exemplo, eixos, rolamentos e engrenagens;
- c) Observou-se que é extremamente importante manter o monitoramento constante dos níveis de vibração em torres eólicas, como também, a periodicidade das inspeções, análises de vibração nos pontos críticos, coleta e análise de óleo da caixa de velocidades e a lubrificação dos componentes móveis, contribuindo para a segurança operacional, a integridade e a vida útil dos equipamentos.

5.3 Trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros destaca-se:

- Desenvolver um sistema de monitoramento dos sinais de vibração em tempo real, utilizando sensores do tipo acelerômetros e inteligência artificial;
- Realizar ensaios experimentais de vibração em outros componentes dos aerogeradores de rotor de eixo horizontal, observando o comportamento dinâmico e as condições naturais do ambiente;
- Realizar pesquisas, simulações e análises aprofundadas sobre os impactos da vibração em torres eólicas *Offshore*, considerando fatores como, por exemplo, correntes marítimas, movimento das ondas e interações entre a torre e o solo marinho.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS NOMINAIS

ALONSO, Rafael Herrero, CASTELLANO, Ubiratan Francisco, TSAI, David, GRACES, Ingrid, RAMOS, Dorel Soares. **Energy transition and decarbonization of road transportation: A case study of São Paulo's Race to Zero by 2050**, Brazil, Case Studies on Transport Policy, Volume, 19, 2025, 101365, ISSN 2213-624X, <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101365>.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213624X25000021>.

Acesso em: 22 jun. 2025. Percentil Scopus: 90%.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Bibliografia Temática: transição energética no setor elétrico brasileiro**, Núcleo de Biblioteca e Arquivo. – Brasília : ANEEL : NBA, abr. 2024. 25 p., v. 6, n. 2.

CEPEL, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, 2001. Disponível em:

<https://cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=1>

Acesso em: 6 mar. 2025.

CHEN, Z.; LI H. **Overview of different wind generator systems and their comparisons**. 2008.

Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/iet-rpg%3A20070044> Acesso em: 06 jul. 2025

CRESESB. **Centro de referência para as energias solar e eólica Sérgio de S. Brito**.

Disponível em: CRESESB-Centro de Referência para Energia Solar e Eólica.

Acesso em: 25 jun. 2025.

DIARRASSOUBA, Karamoko. **Health monitoring, fault detection and diagnosis in industrial rotating machinery by advanced vibration analysis**. Tesi Dottorato in Progettazione Meccanica Dipartimento Dell' Innovazione Industriale e Digitale (DIID). Università Degli Studi di Palermo, 2017.

DUTRA, Ricardo. **Energia eólica, princípios e tecnologia**, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito - CRECESB, Org. Ricardo Dutra, 2008.

FARIA, Carlos Eduardo Costa de. **Análise de vibrações em uma torre de energia eólica**. Relatório de pesquisa de Iniciação Científica - Assessoria de Pós-Graduação e Pesquisa - Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais aplicadas - FATECS, Centro Universitário de Brasília. Brasília, 2018.

FARIA, I. B. S. ; POGGIALI, F. S. J. . Vibrações em estruturas no Brasil: uma revisão bibliográfica da literatura. **Engenharia Civil UM**, [S. l.], n. 60, p. 54–60, 2022. Disponível em: <https://revistas.uminho.pt/index.php/ecum/article/view/4148>. Acesso em: 13 ago. 2025

FENG, Ke; JI, J.C.; NI, Qing; BEER, Michael. A review of vibration-based gear wear monitoring and prediction techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 182, 2023,109605, ISSN 0888-3270. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327022006951>. Acesso em: 20 jun.2025. Percentil Scopus: 99%.

FIRMANSYAH, Iman; YAMAGUCHI, Yoshiki. FPGA-based implementation of a chirp signal generator using an OpenCL design, **Journal Microprocessors and Microsystems**, Volume 77, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141933120303665> Acesso em: 19 abr. 2025. Percentil Scopus: 84%.

GENEROSO, Daniel J. **Elementos de Máquinas**. Módulo 3 [S.l.], Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC, 2009. v. 1.

GWEC. **Global wind report 2024**. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2024> . Acesso em: 08 out. 2024.

LIMA, D.; YÁNEZ, P. López-. Análise dinâmica elástica em torres tubulares de aço para turbinas eólicas de eixo horizontal. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo e Design em Engenharia**. Vol. 36, (1), 2020. Disponível em: https://www.scipedia.com/public/Lima_Lopez-Yanez_2019a. Acesso em:14 jun. 2025 Percentil Scopus: 22%.

LUCIANO, Bruno. **Rolamento radial ou rolamento axial**: Quais usar? Quais as diferenças? ABECOM, 2020. Disponível em:<https://www.abecom.com.br/rolamento-radial-e-rolamento-axial-quais-as-diferencas/>.2020. Acesso em: 20 jul. 2023.

_____. **Quais os tipos de falhas de um rolamento?** ABECOM, 2020. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/falhas-de-um-rolamento/>. 2020. Acesso em: 23 ago. 2023.

MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de máquinas**. Editora Érica, São Paulo, 2009 .

MELO, L. F. de S., PICAÑO JÚNIOR, P. L., & ESPINDOLA, G. M. de. Os caminhos da sustentabilidade no Brasil: estudo de caso baseado em indicadores de sustentabilidade. **Revista Observatório de la Economía Latinoamericana**,Vol. 22, n.1, 2024.

MENNA, Alexandre R. **Detecção de falhas em mancais de rolamento por análise de vibrações em banda larga**: um caso prático de aplicação em uma população de equipamentos rotativos. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

NETTO, Alfredo Pieritz. **Manutenção industrial**. Indaial: UNIASSELVI, 2018.

Portal energia. Por Pedro Reis | 20 de Abril, 2016, 17:13 | **Aerogerador, Energia Eólica**.

Disponível em: <https://www.portal-energia.com/funcionamento-de-um-aerogerador/>
Acesso em: 16 ago.2025.

RAO, Singiresu S. **Vibrations Mechanical**. 4th ed., Printice Hall, New Jersey, 2003.

RAJU, S.K., Periyasamy, M., Alhussan, A. A. *et al*. **Machine learning boosts wind turbine efficiency with smart failure detection and strategic placement**. *Sci Rep* 15, 1485 (2025).

Disponível em: <https://doi-org.ez40.periodicos.capes.gov.br/10.1038/s41598-025-85563-5>. Acesso em: 19 jul. 2025. Percentil Scopus: 98%.

SALAMEH, Jack P.; CAUET, Sebastien; ETIEN, Erik; SAKOUT, Anas; RAMBAULT, Laurent. **Gearbox condition monitoring in wind turbines**: A review, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 111,2018, Pages 251-264, ISSN 0888-3270. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327018301791>
Acesso em: 05 jul. 2025. Percentil Scopus: 97%.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. Tradução João Batista de Aguiar e José Manoel de Aguiar. 7ª Edição, Porto Alegre, Editora Bookman, 2005.

SILVA, Manuel Duarte da. **Tipificação de fundações de torres eólicas em parques industriais, para diversos tipos de solos**. Dissertação de mestrado - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/entities/publication/a04d773d-3e17-43b2-913e-c9e187811dcc> . Acesso em: 17 mai. 2024.

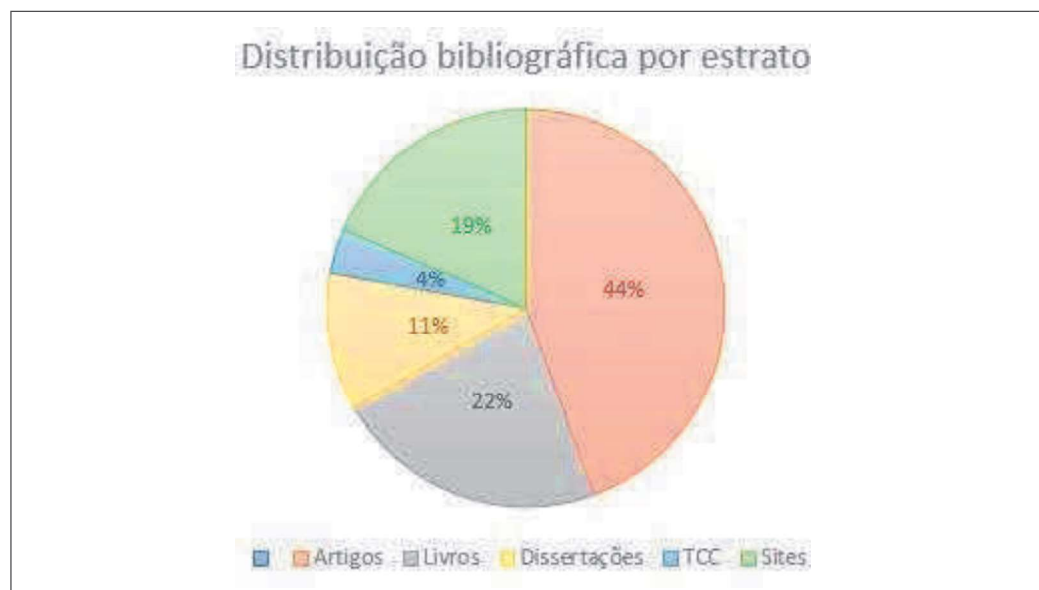
SOARES, Gabriel Moreno Caparroz. **Tecnologias de caixas de velocidades e geradores elétricos de aerogeradores de grande porte**. , 2017. Escola politécnica - Universidade de São Paulo.

SOUTO, Marcos Eduardo Costa. **Proposta de diretrizes e boas práticas para a operação e manutenção de usinas eólicas do Brasil**. Dissertação de mestrado - Engenharia de Produção Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

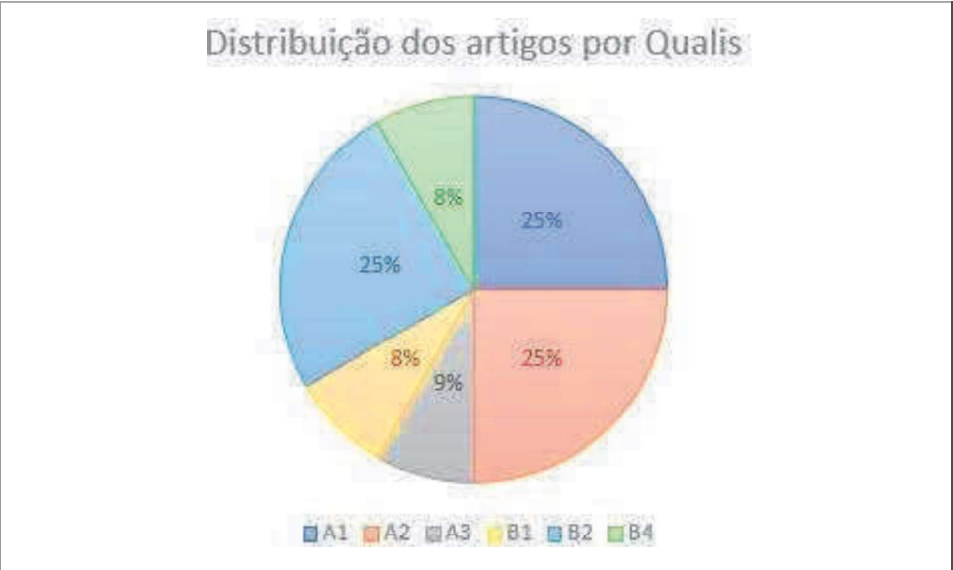
WIDIANINGSIH, Luky Patricia. Can Renewable Energy, Carbon Taxes, and Economic Growth Mitigate Countries' Carbon Emissions?. **International Journal of Energy Economics and Policy**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 103–109, 2024. Percentil Scopus: 97%. Disponível em: <https://econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/17566>. Acesso em: 03 jun. 2025.

WINDBOX. **Principais componentes dos aerogeradores**. Disponível em: <https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>.2020. Acesso em: 18 jun. 2023.

3.1 Referências por Estrato



3.2 Referências por Qualis



3.3 Referências por Data dos Artigos

