



Validação do modelo de componentes de geradores eólicos para desenvolvimento de técnicas de monitoramento e diagnóstico de falhas

Palavras-Chave: energia eólica; máquinas rotativas; monitoramento de condição; diagnóstico de falha; modelagem de componentes e sistemas.

Autores(as):

Rafael Roberto Xavier de Castro FEM - UNICAMP

Prof. Dr. Gregory Bregion Daniel (orientador), FEM - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A crescente demanda global por energia elétrica e os impactos associados às fontes convencionais, como carvão, petróleo e energia nuclear, continuam impulsionando o desenvolvimento e a adoção de fontes renováveis de energia (REN21, 2024). O Acordo de Paris (2015), assinado por 196 países, estabeleceu como meta limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 °C até 2050, com a expectativa de que entre 70% e 85% da eletricidade mundial seja proveniente de fontes renováveis (UNFCCC, 2015). Assim, estima-se que mais de 1 TW de capacidade eólica esteja instalada até o final de 2023, com adição anual de cerca de 116 GW (REN21, 2024).

A energia eólica offshore, em particular, segue se destacando por seu elevado potencial técnico e sua contribuição para a descarbonização do setor elétrico. De acordo com a International Energy Agency (IEA, 2024), esse tipo de geração permanece com potencial estimado superior a 420.000 TWh por ano, valor equivalente a múltiplas vezes a demanda elétrica mundial. No Brasil, a expansão da energia eólica também é relevante: em 2024, foram adicionados aproximadamente 4,26 GW de capacidade eólica, o que representou quase 40% da nova capacidade elétrica instalada no país (Enerdata, 2024; ABEEólica, 2025).

Apesar de seu crescimento acelerado, a operação de turbinas eólicas, sobretudo em ambientes offshore, enfrenta desafios significativos no que se refere à confiabilidade dos sistemas. Falhas em componentes eletromecânicos, como transmissões, geradores, mancais e sensores, estão entre os principais fatores responsáveis por elevadas taxas de indisponibilidade (*downtime*), impactando negativamente a viabilidade técnica e econômica dessas unidades (Tavner, 2012; Zhang et al., 2021). Assim, torna-se essencial o desenvolvimento de métodos robustos e eficientes para o monitoramento de condição e o diagnóstico precoce de falhas.

Com o avanço das tecnologias digitais e das técnicas de inteligência artificial (IA), métodos baseados em aprendizado de máquina têm sido cada vez mais aplicados no diagnóstico preditivo e em tempo real de falhas em turbinas eólicas (Zhao et al., 2020). Inserido nesse contexto, o presente trabalho integra o projeto CNPq/MCI nº 407781/2022-6 que visa o desenvolvimento de modelos e técnicas voltados à identificação de falhas críticas em componentes de unidades geradoras eólicas, com ênfase em aplicações offshore., e tem como objetivo a validação de um modelo computacional desenvolvido utilizando o software *Simulink*, com o objetivo de simular o comportamento dinâmico da bancada de testes, especialmente a resposta de vibração dos eixos à rotação do conjunto. A validação desse modelo constitui o principal objetivo desta etapa, a qual será realizada a partir da construção de um banco de dados com os sinais coletados por sensores instalados na bancada e da comparação entre os resultados computacionais e os obtidos experimentalmente.

METODOLOGIA:

Com a chegada de todos os componentes da bancada de testes no laboratório, foi possível fazer o levantamento de todas as características físicas e parâmetros elétricos. As tabelas abaixo dispõem os dados em questão.

Tabela 1: Parâmetros do motor e do gerador.

Equipamento	Motor Assíncrono Trifásico	Corrente Estatórica	8,5 A
Fabricante	Equacional	Tensão Rotórica	224 V
Modelo	EA4-6-ME	Corrente Rotórica	6,8 A
Nº Série	18.352	Rotação	1740 RPM
Potência	2,2 kW	Regime	S1 – Contínuo
Tensão Estatórica	220 V	Classe de Isolação	F

Tabela 2: Resistências ôhmicas do motor e do gerador

Resistências ôhmicas do estator		
R – S: 0,8626 Ω	S – T: 0,8614 Ω	R – T: 0,8610 Ω
Resistências ôhmicas do rotor		
U – V: 1,1466 Ω	V – W: 1,1462 Ω	U – W: 1,1458 Ω

Tabela 3: Relação de transmissão do conjunto redutor e multiplicador

Relação de redução	20:1
Relação de multiplicação	1:20

Esses parâmetros foram atualizados no modelo computacional, a fim de aproximar a resposta calculada pelo modelo com a resposta real do sistema. Sendo assim, os seguintes gráficos foram plotados:

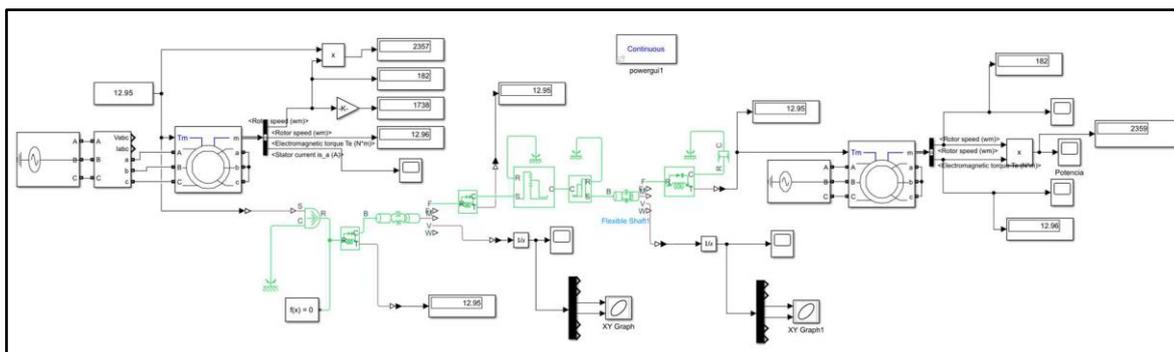


Figura 1: Diagrama de blocos do modelo computacional desenvolvido no software comercial SIMULINK.

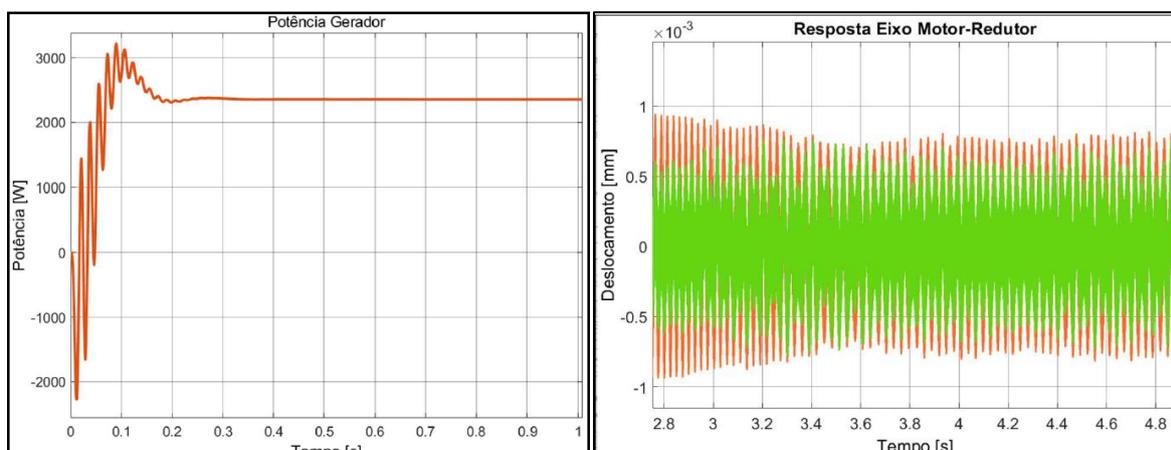


Figura 2: Diagrama da potência de saída no gerador (esquerda) e diagrama do deslocamento (direita) no eixo x, em verde, e no eixo y, em laranja.

Destaca-se que ainda há parâmetros do modelo computacional que precisam ser estimados, como o desbalanceamento que excita o sistema e os coeficientes associados à matriz de rigidez e amortecimento dos

mancais. Como esses valores não são fornecidos pelo fabricante e não há métodos experimentais diretos e simples para obtê-los com precisão, ambos serão estimados por meio de uma abordagem indireta. Essa abordagem consiste em ajustar os parâmetros do modelo computacional de forma que sua resposta se aproxime da resposta medida experimentalmente em laboratório.

Com a chegada dos componentes finais da bancada de teste, também se iniciaram as coletas de dados. Atualmente, o motor, conjunto redutor, conjunto multiplicador e gerador contam cada um com três acelerômetros, nas posições longitudinal, lateral e transversal, totalizando 12 acelerômetros, além disso, quatro acelerômetro foram instalados na base da bancada, todos na posição vertical.

Com isso, os dados para as seguintes condições de operação da bancada de testes foram coletados (todos os testes foram realizados com a velocidade nominal do motor (30 Hz)):

- Condição Normal (eixo alinhado, sem curtos)
 - Carga no gerador = 0 kw
 - Carga no gerador = 0,5 kw
 - Carga no gerador = 1 kw
- Curto no estator (eixo alinhado), 10%, 15%, 20%, 25%
 - Carga no gerador = 0 kw
 - Carga no gerador = 0,5 kw
 - Carga no gerador = 1 kw
- Curto no rotor (eixo alinhado), 15%, 25%
 - Carga no gerador = 0 kw
 - Carga no gerador = 0,5 kw
 - Carga no gerador = 1 kw
- Desalinhamento no eixo – *Drive end* 15 mm
 - Carga no gerador = 0 kw
 - Carga no gerador = 0,5 kw
 - Carga no gerador = 1 kw
- Desalinhamento no eixo – *Non Drive end* 30 mm
 - Carga no gerador = 0 kw
 - Carga no gerador = 0,5 kw
 - Carga no gerador = 1 kw

Para cada condição de operação o seguinte roteiro foi seguido:

1. Configurar a bancada de testes para a condição a ser testada:
 - a. Rotação do Motor
 - b. Desalinhamento/Alinhamento do eixo
 - c. Curto no Estator/Rotor
 - d. Carga no Gerador
2. Ajustar os parâmetros de aquisição de dados
 - a. Número de medidas: 5
 - b. Frequência de aquisição: 60000 Hz
 - c. Tempos de aquisição 5 segundos
3. Acionar o motor e aguardar 2 minutos antes de iniciar a coleta de dados
4. Aplicar a Transformada de Fourier na resposta do sinal obtida no passo 3, de forma a avaliar o espectro de frequência do sinal

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A partir das respostas obtidas pelos sensores instalados na bancada, é possível aplicar a Transformada de Fourier nos sinais adquiridos, a fim de obter seu espectro de frequência. Essa análise permite identificar o comportamento dinâmico do sistema e observar fenômenos característicos que ocorrem durante sua operação, como ressonâncias, desbalanceamentos e efeitos relacionados a falhas em componentes rotativos (Randall, 2011).

Na condição normal de operação, ou seja, sem a introdução de falhas, é esperado que a resposta espectral do sistema apresente picos de amplitude correspondentes à frequência de rotação à qual o sistema está submetido. Na Figura 3, por exemplo, observa-se um pico de amplitude em 29,78 Hz, valor compatível com a frequência de rotação nominal do sistema, de 30 Hz (1800 RPM).

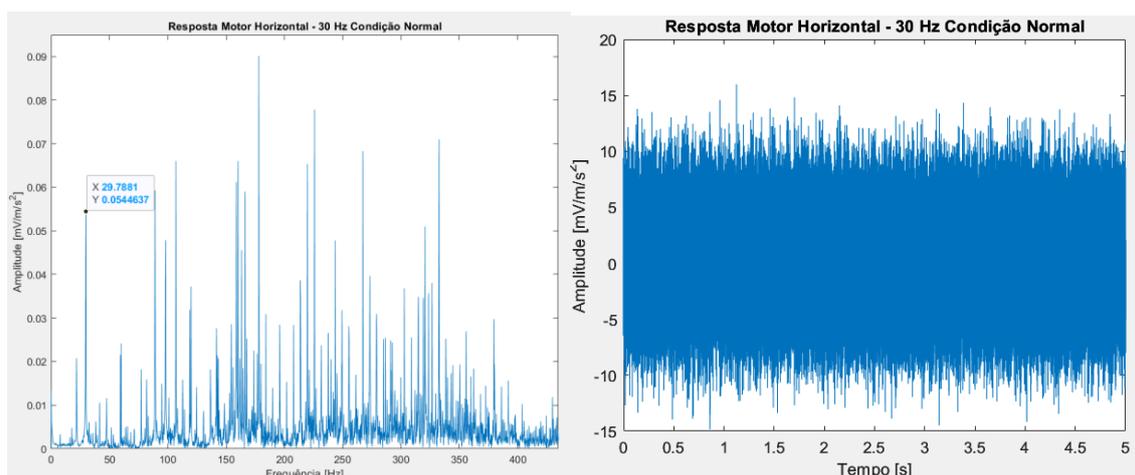


Figura 3: Reposta no domínio da frequência (esquerda) e no domínio do tempo (direita) de um teste realizado com 30 Hz (1800 RPM) com o eixo completamente alinhado.

Com a inserção de falhas mecânicas e elétricas em sistemas rotativos, é esperado que a resposta em frequência apresente picos de amplitude em frequências características associadas a cada tipo de defeito. Até o presente momento, não foi possível implementar falhas mecânicas no sistema, os testes realizados concentraram-se apenas na inserção de desalinhamento do eixo do gerador. Especificamente, em casos de desalinhamento, é comum a ocorrência de componentes significativas nas frequências harmônicas da rotação, destacando-se picos nas faixas de 2X e 3X da frequência de rotação (Eisenmann, 1998). A figura 4 apresenta a resposta em frequência do gerador obtida durante o ensaio com um desalinhamento de 30 mm no lado oposto ao acionamento do eixo

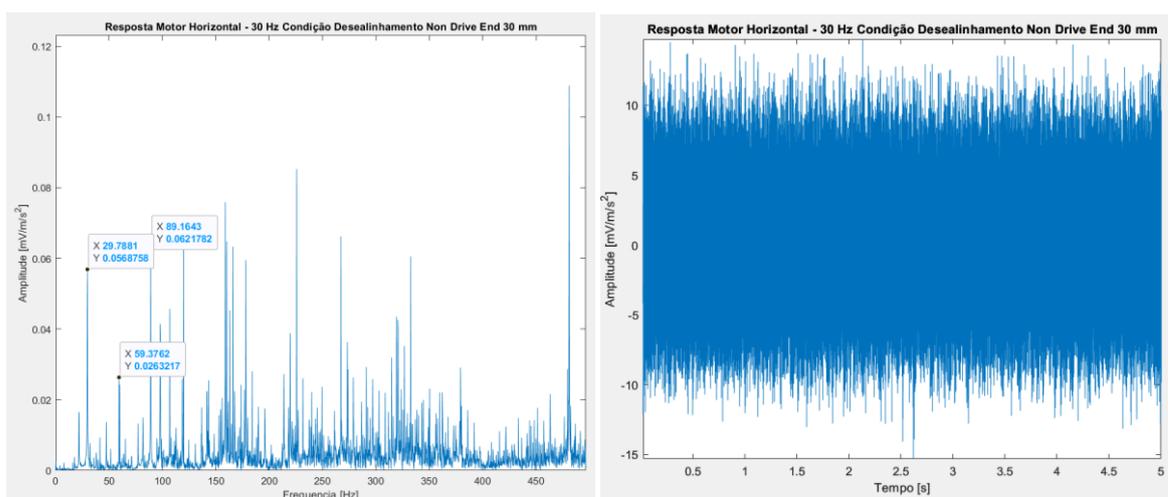


Figura 4: Reposta no domínio da frequência (esquerda) e no domínio do tempo (direita) de um teste realizado com 30 Hz (1800 RPM) com o eixo desalinhando em 30 mm no lado oposto ao acionamento

É possível observar picos de amplitude nas frequências de 60 Hz (2X) e 90 Hz (3x), além do pico na frequência de rotação do sistema 30 Hz, indicando assim o efeito do desalinhamento no eixo do gerador no sistema.

CONCLUSÕES:

O modelo computacional da bancada de testes foi atualizado com os parâmetros reais das máquinas e dos componentes presentes no sistema, de modo que os resultados obtidos passam a refletir com maior fidelidade o comportamento dinâmico observado experimentalmente.

Adicionalmente, os ensaios realizados em laboratório para as diferentes condições de operação previamente apresentadas não apenas proporcionaram uma compreensão aprofundada do funcionamento da bancada, como também resultaram na construção de um banco de dados abrangente. Esse banco contempla tanto as respostas associadas à condição normal de operação quanto aqueles referentes às condições de falha implementadas até o momento.

Por fim, destaca-se que o processo de validação do modelo computacional terá início após a conclusão dos experimentos laboratoriais. A validação será realizada por meio da comparação entre as respostas simuladas pelo modelo e os dados experimentais presentes no banco. A partir dessa comparação, espera-se estimar os parâmetros de excitação por desbalanceamento e os coeficientes da matriz de rigidez e amortecimento dos mancais.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq pelo apoio através do projeto CNPq/MCI nº 407781/2022-6. Agradece-se também à UNICAMP pelo suporte institucional. Com o apoio de ambos foram providos os recursos e espaço necessários para que a bancada fosse concretizada.

BIBLIOGRAFIA

1. REN21. **Renewables 2023 Global Status Report**. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2023.
2. UNFCCC. **The Paris Agreement**. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015.
3. IRENA. **World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway**. International Renewable Energy Agency, 2021.
4. IEA. **Offshore Wind Outlook 2019**. International Energy Agency, 2019.
5. ANEEL. **Banco de Informações de Geração – BIG**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023.
6. ABEEólica. **Boletim Anual de Geração Eólica no Brasil**. Associação Brasileira de Energia Eólica, 2024.
7. Tavner, P. J. **Offshore Wind Turbines: Reliability, Availability and Maintenance**. IET, 2012.
8. Zhang, Z., et al. "A review on the condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine gearbox." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, 2021, 110791.
9. Zhao, R., et al. "Deep learning in the fault diagnosis of rotating machinery: A review." *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 115, 2020, pp. 213–237.
10. Randall, R. B. **Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications**. John Wiley & Sons, 2011.
11. Eisenmann, R. C. (1998). **Machinery Malfunction Diagnosis and Correction: Vibration Analysis and Troubleshooting for Process Industries**. Prentice Hall.