

Projeto e Modelagem de uma Bancada de Testes aplicada a Turbinas Eólicas em Escala Reduzida

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:

Desde o século passado, observa-se uma tendência mundial do aumento da demanda de energia elétrica a cada ano. Nesse cenário, é reconhecido que as fontes tradicionais de energia elétrica, como combustíveis fósseis e nuclear, não só geram uma poluição ambiental em enorme escala, mas também apresentam uma disponibilidade limitada [1]. Com o objetivo de suprir essa crescente demanda de energia elétrica, e ainda minimizar os impactos ambientais advindos dos processos de geração energia, as fontes de energia renováveis são uma alternativa imprescindível [2] [3]. Dentre as fontes de energia renováveis, a geração de eletricidade eólica é uma opção com grande potencial de desenvolvimento, em especial, a energia eólica offshore (turbinas instaladas em alto-mar), visto a grande capacidade de geração de energia que esse tipo de instalação apresenta.

Contudo, apesar das vantagens citadas anteriormente, ainda é necessário grande desenvolvimento científico e tecnológico para tornar esses sistemas mais confiáveis. O custo de operação e de manutenção de uma turbina eólica offshore é extremamente elevado, isso ocorre devido a variedade nas condições de operação, que podem gerar um desgaste acelerado em diversos componentes do sistema, como mancais, sistemas hidráulicos, transmissões, geradores elétricos, unidades de controle eletrônico, sensores, entre outros. Nesse cenário, o aumento da confiabilidade de operação das turbinas eólicas offshore é fundamental. Identificar anomalias nos sistemas mecânicos e elétricos é fundamental para antecipar qualquer tipo de falha de forma a minimizar a queda de desempenho e evitar paradas para manutenção.

Nesse contexto, o diagnóstico de falha em turbinas eólicas é uma forma de aumentar a confiabilidade desse recurso. A digitalização e a inteligência artificial vêm cada vez mais se tornando protagonistas no desenvolvimento de técnicas de monitoramento de condição dessas máquinas. Todavia, ainda, é necessário desenvolver modelos robustos e representativos para o comportamento dinâmico de turbinas eólicas. Assim, o presente estudo visa estudar e avaliar uma configuração de bancada de testes aplicadas a turbinas eólicas, propondo soluções que possam garantir eficientemente a montagem e fixação dos componentes envolvidos nesta máquina, a saber, rotor, caixa de transmissão e gerador, além do desenvolvimento de um modelo computacional para simular o comportamento dinâmico da bancada de testes projetada.

METODOLOGIA:

Com o objetivo de reproduzir o comportamento dinâmico de uma turbina eólica real, este estudo desenvolveu a conceitualização, projeto e análise de uma bancada de testes aplicada. Dentre os componentes dessa bancada destacam-se: o motor elétrico, usado para simular o torque advindo das pás de uma turbina real, um conjunto redutor de velocidade, responsável por reduzir a rotação imposta pelo motor para simular as baixas

rotações de operação de uma turbina real, um conjunto multiplicador semelhante ao empregado em turbinas eólicas reais (multiplicador planetário) e, por fim, um gerador elétrico.

Tanto o motor elétrico quanto o gerador foram fabricados por uma empresa especializada (empresa Equacional). Assim, o presente estudo contempla a avaliação dos conceitos e das configurações de montagem do conjunto rotativo, dando foco especialmente na seleção e na montagem da caixa de transmissão. Em suma, deve ser garantido a versatilidade nas configurações de testes, de forma que o conceito da bancada deve prever os devidos graus de liberdade necessários para a montagem de diferentes caixas de transmissão, sem comprometer a rigidez de fixação do sistema.

A configuração final da bancada é mostrada na Figura 1. Os desenhos técnicos 3D de cada componente da bancada de testes foram desenvolvidos, e uma montagem inicial do conjunto foi feita no software comercial (CREO Parametric).

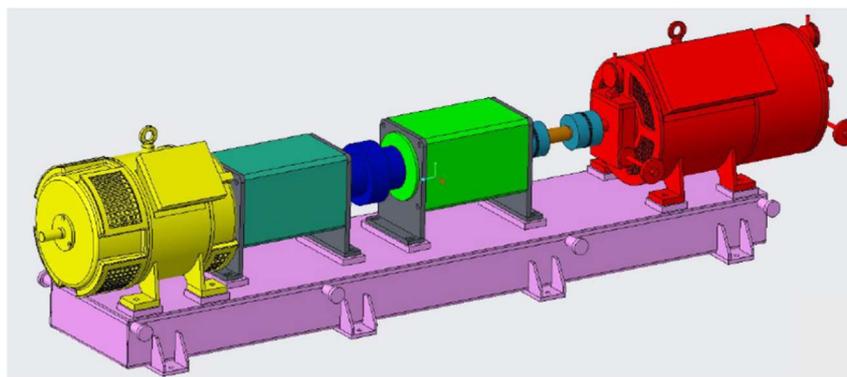


Figura 1: Desenho 3D da bancada de teste (Software: CREO Parametric)

Em sequência, foram projetados os suportes e a fixação dos sensores utilizados na instrumentação dos equipamentos. O projeto foi realizado no software CREO Parametric e, também neste software, foram feitas simulações para que fosse possível analisar as frequências e modos de vibrar dos suportes dos sensores. A partir dos resultados dessa análise modal, foi possível garantir com que a frequência natural desse conjunto fosse distante da frequência de operação da bancada de testes, evitando, portanto, problemas relacionados a ressonâncias nesses suportes.

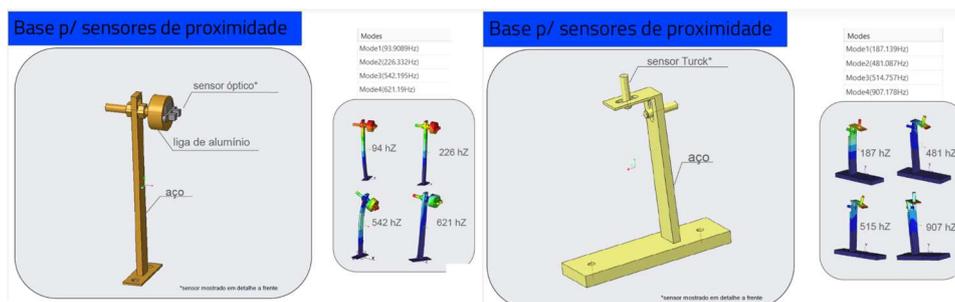


Figura 2: Desenho 3D dos suportes para sensores, ao lado os resultados das análises modais

Deste modo, com o projeto dos desenhos técnicos e a análise modal da bancada experimental realizada e finalizada, iniciou-se a modelagem dinâmica dos componentes. O software MatLab/Simulink foi utilizado para o desenvolvimento do modelo dinâmico dos componentes. Na modelagem da bancada experimental de uma turbina eólica em escala reduzida, foram utilizados os modelos de eixo flexível, engrenagem planetária e outros componentes elétricos, conforme ilustrado na Figura 3.

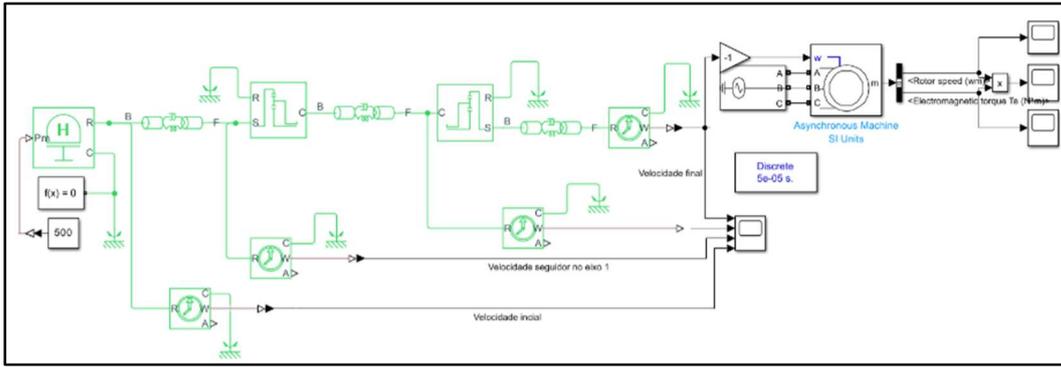


Figura 3: Modelo computacional em diagrama de bloco (Software: MATLAB/Simulink)

O modelo de eixo flexível é utilizado para modelar o eixo rotativo presente na bancada, permitindo analisar seu comportamento dinâmico devido um desbalanceamento de massa sob uma dada condição de operação. O modelo presente na biblioteca do software *MatLab/Simulink* contempla a análise torcional e lateral.

Em ambas análises, o comportamento dinâmico do eixo é modelado através de parâmetros concentrados. Na Figura 4 é ilustrada a representação esquemática da modelagem aplicada à análise torcional do eixo flexível. Cada elemento flexível contém um comprimento l_{FE1} , uma mola de rigidez k_{FE1} , um amortecedor b_{FE1} e duas inércias I_{FE_1C} e I_{FE_1R} .

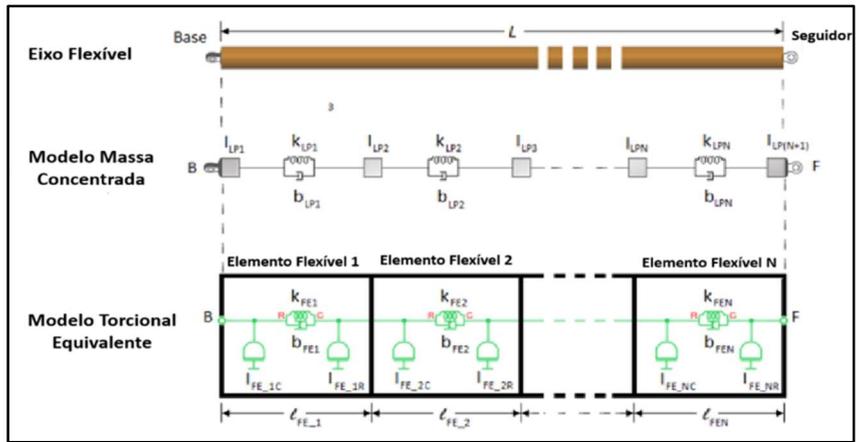


Figura 4: Método das massas concentradas aplicado ao modelo torcional [Documentação Eixo Flexível, [Documentação Eixo Flexível](#). Acesso em 01/08/2024]

Além disso, o amortecimento interno é definido pela taxa de amortecimento c para um eixo composto por um único elemento de massa concentrada com rigidez torcional e inércia equivalente.

De forma semelhante, o modelo para análise lateral (flexão do eixo) discretiza as propriedades contínuas do eixo em um número N de elementos flexíveis. Conforme ilustrado na Figura 5, os N elementos correspondem a uma série de massas concentradas, conectadas por elementos de amortecimento e rigidez.

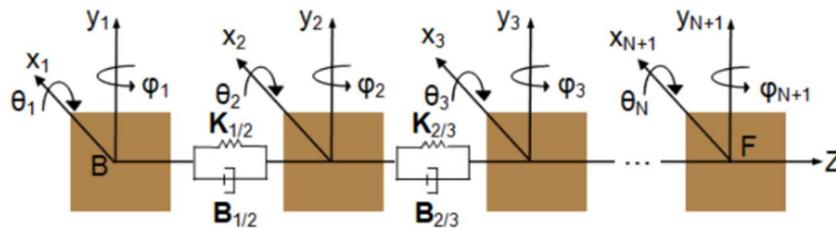


Figura 5: Representação esquemática do método das massas concentradas aplicado ao modelo de flexão do eixo flexível [Documentação Eixo Flexível, [Documentação Eixo Flexível](#). Acesso em 01/08/2024].

Com o eixo discretizado pelos N elementos de massa concentrada, é possível escrever a equação de movimento geral como:

$$M * \ddot{x} + (B + G_{disk} * \Omega) * \dot{x} + (K + G_{disk} * \Omega) * x = F \quad (1)$$

em que M é a matriz da massa do eixo, B é a matriz de amortecimento do eixo, K é a matriz de rigidez do eixo, G_{disk} é a matriz de efeito giroscópio, F é o vetor que representa as forças externas aplicadas e x é o vetor com os graus de liberdade do sistema.

O modelo das engrenagens planetárias é representado na Figura 6. O bloco descreve o comportamento cinemático de uma transmissão composta por uma engrenagem solar (S), transportador (C), engrenagem anel (R) e um conjunto de engrenagens planetárias (P). A partir das equações a seguir, é possível calcular a razão de transmissão entre os componentes.

$$r_c * \omega_c = r_s * \omega_s + r_p * \omega_p \quad (2)$$

$$r_r * \omega_r = r_c * \omega_c + r_p * \omega_p \quad (3)$$

$$r_c = r_s + r_p \quad (4)$$

$$r_r = r_c + r_p \quad (5)$$

onde r_c, r_s, r_p, r_r são o raio do transportador, da engrenagem solar, das planetárias e da anelar, e $\omega_c, \omega_s, \omega_p$ são a velocidade angular do transportador, da engrenagem solar e das planetárias

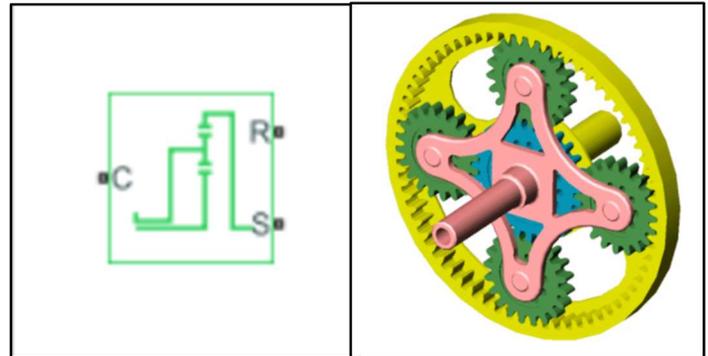


Figura 6: Representação do modelo planetário e um desenho técnico de um conjunto planetário, no qual a engrenagem planetária está em verde, a solar (S) em azul, a anelar (R) em amarelo e o transportador (C) em rosa [Documentação Engrenagem Planetária, [Gear train with sun, planet, and ring gears](#), acesso em 01/08/24]

Deste modo, é possível calcular a relação de transmissão entre a engrenagem anelar e a solar (g_{RS}) conforme a equação a seguir:

$$g_{RS} = \frac{r_r}{r_s}; (1 + g_{RS}) * \omega_c = \omega_s + g_{RS} * \omega_r \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Uma vez finalizada a fase de projeto da bancada de testes, os componentes elétricos e mecânicos foram comprados, e a base para os componentes foi manufaturada. A Figura 7 mostra a bancada no laboratório, sendo que todo o conjunto e configuração da montagem está sendo desenvolvido no Laboratório de Máquinas Rotativas, juntamente com docentes da FEEC que compõem a equipe de pesquisa (MCTI/CNPq). Vale ressaltar que os suportes para os sensores ainda não foram fixados nas bases e que, no presente momento, as transmissões mecânicas (*gearbox*) foram recebidas e serão agora acopladas na montagem final.

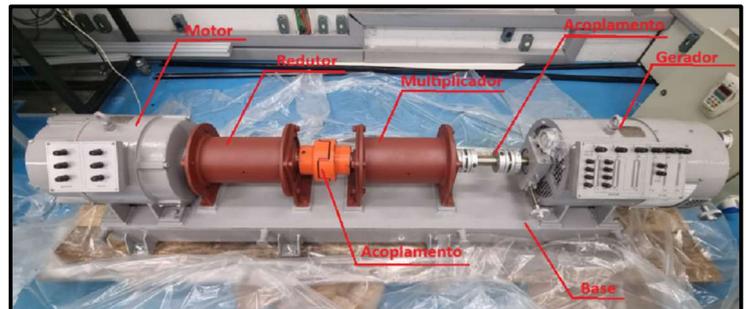


Figura 7: Bancada de testes montada em laboratório

Em relação ao modelo computacional desenvolvido para estudar o comportamento dinâmico da bancada, o modelo inicial para o eixo flexível foi finalizado, sendo possível reproduzir os efeitos gerados pela vibração durante a operação. Os gráficos abaixo mostram os deslocamentos em x e y para um eixo com as mesmas dimensões e propriedades do utilizado na bancada real, considerando um desbalanceamento de $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$.

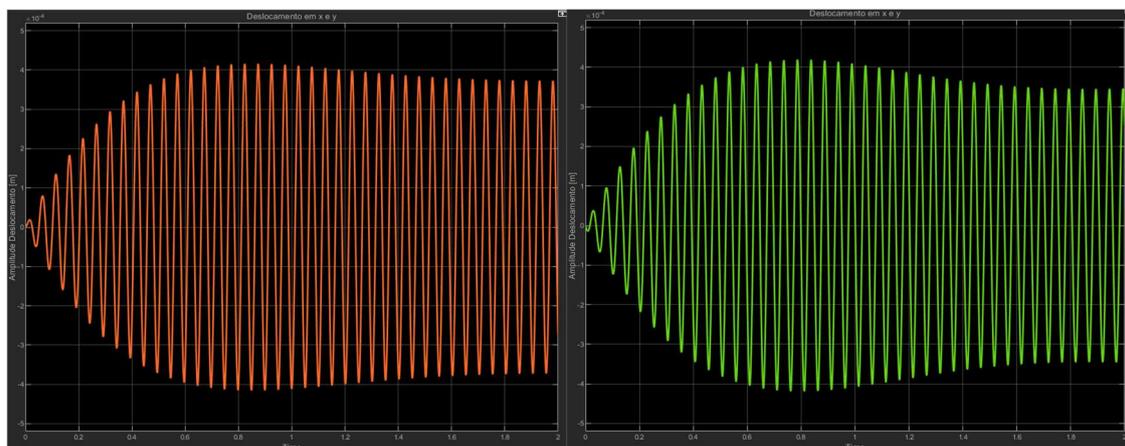


Figura 8: Deslocamento em x (esquerda) e Deslocamento em y (direita)

O modelo de transmissão planetária também já foi desenvolvido, sendo possível observar na Figura 9 (esquerda) as relações de velocidades impostas em cada conjunto planetário. As relações de velocidade utilizada são equivalentes à dos componentes reais. Além disso, um modelo simplificado de gerador foi adicionado, de forma que fosse possível converter a rotação de saída do conjunto planetário em uma potência de saída, mostrado na figura 9 (direita)

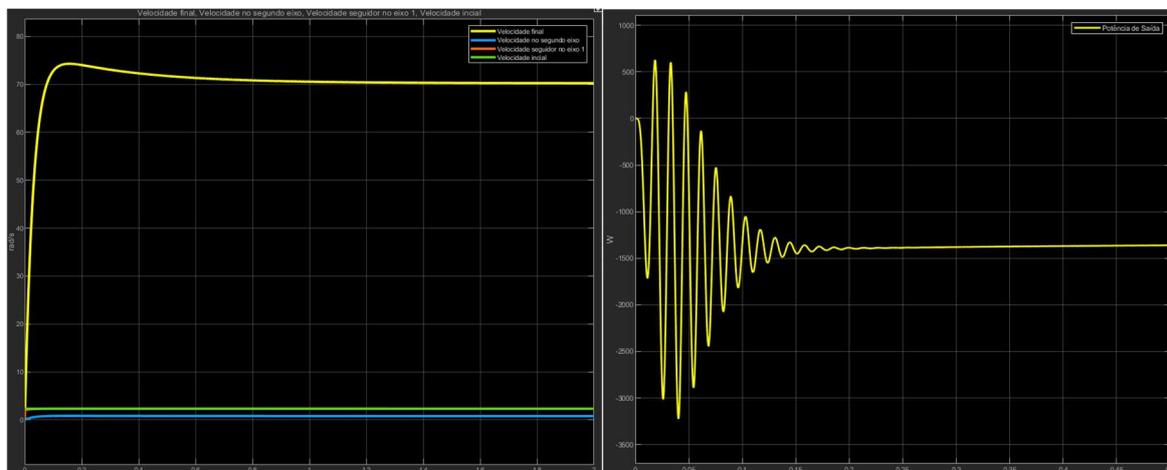


Figura 9: Velocidades de rotação através dos conjuntos planetários

CONCLUSÕES:

O projeto da bancada de testes e as soluções desenvolvidas para fixação dos componentes e dos sensores necessários para os experimentos foi eficiente e permitiu garantir versatilidade e segurança na montagem, assegurando a montagem de diferentes configurações para testes.

Além disso, depende-se que para que o modelo desenvolvido tenha aplicabilidade no projeto de pesquisa para diagnóstico de falha em componentes de turbinas eólicas, é necessário que haja uma validação do modelo a partir da comparação dos resultados calculado computacionalmente e dos dados reais do funcionamento da bancada coletados em laboratório.

Destaca-se que existem informações fundamentais a serem determinadas para que os resultados do modelo se aproximem dos dados experimentais. Para o modelo do eixo rotativo é fundamental a determinação da matriz de rigidez e de amortecimento dos mancais, já para o modelo das engrenagens planetárias é fundamental estimar as perdas de engrenamento, perdas por atrito e a inércia de cada componente do conjunto planetário. Informações essas, que se pretende determinar-se em uma próxima fase da Iniciação Científica.

BIBLIOGRAFIA

- 1.MATHIESEN, B. V.; LUND, H.; KARLSSON, K. 100% renewable energy systems, climate mitigation and economic growth. Applied energy, Elsevier, v. 88, n. 2, p. 488–501, 2011.
- 2.JIANG, P.; YANG, H.; HENG, J. A hybrid forecasting system based on fuzzy time series and multi-objective optimization for wind speed forecasting. Applied energy, Elsevier, v. 235, p. 786–801, 2019.
- 3.NIU, T. et al. multi-step-ahead wind speed forecasting based on optimal feature selection and a modified bat algorithm with the cognition strategy. Renewable Energy, Elsevier, v. 118, p. 213–229, 2018.
- 4.IEA - Offshore Wind Outlook, <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>, Acesso em 09/05/2024.
- 5.Osunlalu, I.A.; Meng, X.; Hua W. Wind turbine power curve modeling: state-of-the-art review and research challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018.
- 6.Spera, D. A. Wind turbine technology: fundamental concepts in wind turbine engineering", ASME Press, 2010.
- 7.Documentação Eixo Flexível, [Documentação Eixo Flexível](#). Acesso em 09/05/2024