

REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A DETECÇÃO DE FALHAS EM AEROGERADORES COM SISTEMAS DE MONITORAMENTO INTELIGENTES

Marcos Aurélio Nunes Vieira, vieira.aurelio@discente.ufg.br¹

Marlize Garcia Fagundes Neto, marlize@ufg.br¹

¹Universidade Federal de Goiás - UFG, Av. Ingá, Quadra B, s/n, Campus Samambaia CEP: 74.690-900 – Goiânia – GO – Brasil.

Resumo. Este trabalho faz uso de uma metodologia de busca de artigos na base de dados Scopus que possam contribuir na solução de problemas relacionados ao monitoramento e avaliação de estruturas de aerogeradores utilizando sistemas inteligentes detectores de falhas. Com a seleção dos artigos, foram estabelecidos métodos de ranqueamento para avaliação e classificação conforme critérios de elegibilidade onde foi possível destacar os principais artigos, relevantes e de impacto, convergentes com o escopo desta revisão, além de averiguar a eficiência dos métodos e critérios estabelecidos. Foi notado a eficácia dos critérios de classificação pois foram encontrados trabalhos alinhados ao escopo objetivado e com bons fatores de impacto, os quais foram elencados e explanados neste trabalho. Ademais, foi-se percebido a importância da utilização de energias limpas e renováveis, e também confirmar a viabilidade do uso de estratégias de machine learning para a detecção de falhas em aerogeradores e assim garantir que manutenções preventivas sejam efetuadas em tempo devido, reduzir os custos de operação e manutenção (O&M), além de evitar catástrofes e que toda a estrutura da turbina eólica seja perdida.

Palavras chave: Turbinas eólicas, Monitoramento de integridade estrutural, Detecção de falhas, Inteligência Artificial, Machine Learning.

Abstract. This work makes use of a search methodology for articles in the Scopus database that can contribute to the solution of problems related to the monitoring and evaluation of wind turbine structures using intelligent fault detection systems. With the selection of articles, ranking methods were established for evaluation and classification according to eligibility criteria where it was possible to highlight the main relevant and impactful articles, convergent with the scope of this review, in addition to ascertaining the efficiency of the established methods and criteria. The effectiveness of the classification criteria was noted, as works were found that were aligned with the scope and with good impact factors, which were listed and explained in this paper. Furthermore, the importance of using clean and renewable energies was perceived, as well as confirming the viability of using machine learning strategies to detect faults in wind turbines and thus ensure that preventive maintenance is carried out in due time, reducing operation and maintenance (O&M) costs, and avoiding catastrophes and the loss of the entire wind turbine structure.

Keywords: Wind turbines, Structural health monitoring, Fault detection, Artificial Intelligence, Machine Learning.

1. INTRODUÇÃO

Conforme apontado por Rodrigues (2022), atualmente há grandes desafios relacionados ao setor energético o qual requer o desenvolvimento e/ou aprimoramento de tecnologias fundadas em fontes renováveis. Nesse viés, as tecnologias eólicas tornam-se cada vez mais visíveis devido sua eficiência e baixo custo de geração, e considerando regiões sem muitas opções de matrizes energéticas além da potência motriz eólica, os aerogeradores vêm se popularizando. A energia eólica, apesar de ser uma fonte de energia limpa e renovável, pode apresentar alguns impactos negativos nas regiões instaladas os quais incluem poluição sonora e abalos na fauna e flora local. Porém, consegue proporcionar diversas vantagens, principalmente a independência de combustíveis fósseis, não gerar dióxido de carbono (CO₂) e ainda favorecer a diversificação da matriz energética.

Apesar de que, atualmente, dentre as matrizes energéticas, a energia eólica é a que mais cresce, a indústria ainda se depara com o aumento dos custos de operação e manutenção (O&M) devido a falhas prematuras de componentes principais e, conseqüentemente, aumento do custo da energia, assim tornam-se prioridades reduzir os custos de operação e manutenção e melhorar a confiabilidade das turbinas eólicas, o qual se dá, principalmente, pelo monitoramento adequado dessas estruturas (AZEVEDO, 2015, apud Sheng & Veers, 2011).

Segundo Brandão (2011), o monitoramento e conhecimento do estado no qual uma máquina está operando são fatores cruciais para que haja uma devida manutenção, no tempo correto, ter informações mais concretas e reais sobre o estado de operação e conservação da máquina, além de prever falhas futuras e efetuar uma manutenção preventiva e, desse modo, evitar a parada ou destruição total da máquina e até mesmo contornar graves catástrofes, e, centralizando a geração de energia eólica, garantir o pleno funcionamento dos parques eólicos.

Os aerogeradores são projetados para durar cerca de 20 anos, porém estão constantemente expostos a avarias – condições climáticas severas e bastante variáveis – que os leva a frequentes mudanças dinâmicas e cargas locais refletindo em acentuadas forças de tensão mecânica, que por sua vez, podem prejudicar a integridade da estrutura como um todo. Ademais, acompanhar a condição real dessas turbinas eólicas a longo prazo é bastante limitado, o que dificulta a tarefa de otimizar a devida manutenção com abordagens mais rentáveis, e impedindo a exploração de todo o potencial da estrutura, inclusive de prolongar sua vida útil (OLIVEIRA *et al.*, 2017), (AZEVEDO, 2015) e (BRANDÃO, 2011). Tal situação reflete no crescente uso de sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SHM, do inglês, *structural health monitoring*) para a avaliação da condição de componentes estruturais de aerogeradores, principalmente, devido ao alto custo de reposição desses componentes (DOWNEY, 2015, apud KALDELLIS, 2013 e CIANG, 2008).

Diante do exposto de que pesquisas relacionadas à área de monitoramento de condição e diagnóstico de falhas em turbinas eólicas vem aumentado consideravelmente (AZEVEDO, 2015), porém, ainda há um déficit a ser superado, principalmente a respeito de sistemas de monitoramento utilizando técnicas automatizadas. Assim, esta revisão sistemática objetiva encontrar trabalhos científicos relevantes relacionados a sistemas de monitoramento de estruturas de turbinas eólicas para a detecção de falhas utilizando técnicas computacionais ligadas a Inteligência Artificial (IA), *machine learning*, redes neurais e afins.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho, fez-se uso da base de dados Scopus (www.scopus.com) com o intuito de obter literaturas alinhada com as palavras chaves de interesse.

Durante o levantamento das literaturas utilizou-se a ferramenta nativa de busca avançada da base da dados, onde quatro grupos foram formados e separados pelo operador “AND”, os quais eram:

- Região de atuação do problema: Aerogeradores
- Problema em foco: Detecção de falhas
- Método de obtenção de dados: Sensores físicos
- Técnicas de análise: *Machine learning*

As palavras chave foram atribuídas e distribuídas de forma que abrangesse o quadro geral de cada campo onde ao final formou-se uma lista de palavras pertinentes a cada um e também de modo que abrangesse a maior quantidade possível de documentos resultantes relacionados, enquanto que o resultado final do levantamento bibliográfico obtido foi dado pela interseção desses campos. Ademais, a dinâmica de pesquisa por esses grupos é demonstrada pela Fig. 1.

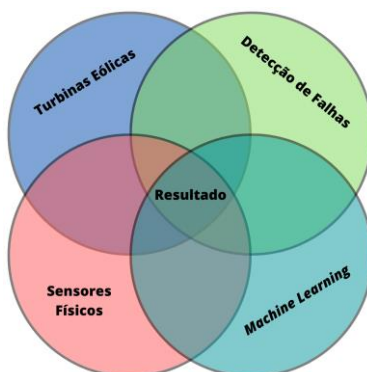


Figura 1. Metodologia de seleção de artigos a serem avaliados

A lista de palavras chave utilizadas em cada grupo, bem como sua quantidade, é apresentada na Tab. 1. Além disso, também é exposto a quantidade de trabalhos resultantes em caso de o grupo ser pesquisado isoladamente. Ressalta-se que a lista foi atualizada pela última vez em 03/01/2023 na base de dados Scopus.

Tabela 1. Relação dos conjuntos de palavras chave e seus respectivos resultados

| GRUPO | QTD. | PALAVRAS CHAVE | QTD. RESULTANTE |
|--------------------|------|---|-----------------|
| Aerogeradores | 3 | "wind turbine" "wind turbines" "wind energy" | 206.486 |
| Detecção de falhas | 5 | "damage detection" "structural monitoring" "structural damage detection" "SHM" "failure analysis" | 180.430 |
| Sensores Físicos | 4 | "straight gauge" "anemometer" "wind-gauge" "accelerometer" | 88.501 |
| Machine Learning | 5 | "machine learning" "artificial intelligence" "neural network" "soft sensors" "deep learning" | 1.663.894 |

Durante o procedimento de busca foi-se utilizado o delimitador "TITLE-ABS-KEY", o qual utiliza os campos título, resumo e palavras chave para selecionar os documentos alinhados com os grupos de palavras chave escolhidas. Ao considerar a interseção dos quatro conjuntos foram retornados 53 (cinquenta e três) documentos.

Dado o resultado retornado na base de dados, foi-se necessário eleger métodos para classificar e avalia-los e assim definir se a concepção central de cada artigo é convergente ou divergente do escopo almejado por esta revisão.

2.1 Ranqueamento decrescente do número de citações

Inicialmente, o primeiro método de elegibilidade utilizado consistiu em ranquear os documentos resultantes de acordo com a quantidade de citações, em ordem decrescente. Com isso, cada um dos documentos foi classificado em "convergente", caso abranja o escopo almejado ou "divergente" caso contrário, com auxílio da avaliação de cada um dos respectivos *abstracts*.

2.2 Ranqueamento decrescente por indicadores Scopus

Considerando um volume maior de resultados, o método de ranqueamento pelo número de citações pode excluir potenciais artigos publicados recente que, possivelmente, ainda não tiveram tempo para se destacarem. A fim de contornar esta situação, existem indicadores nativos da própria base de dados que apresentam fatores de impacto do periódico ou meio de publicação ao qual o artigo está vinculado.

Ao ser verificado o ISSN dos 53 documentos resultantes foram identificados 31 periódicos com ISSN distintos. Assim, foi-se utilizado a ferramenta 'Sources' da base Scopus para averiguar os indicadores de impacto de cada meio de publicação, por fim, obteve-se 25 periódicos com ISSN válido.

A base de dados Scopus apresenta sete indicadores – CiteScore, Highest percentile, Citations, Documents, % Cited, SNIP e SJR – os quais diferem entre si e fornece um característico fator de impacto, os quais foram utilizados para avaliar a relevância e impacto de cada um dos artigos em avaliação.

3. RESULTADOS

A partir dos métodos de ranqueamento e avaliação foram selecionados os artigos que se destacaram dentre esses parâmetros, por meio dos quais pode-se averiguar a qualidade dos resultados obtidos com esta revisão sistemática.

3.1 Artigo mais citado

Título: "An SVM-based solution for fault detection in wind turbines".

Autores: Santos, P.; Villa, L. F.; Reñones, A.; Bustillo, A.; Maudes, J.

Ano de publicação: 2015

Quantidade de citações: 150 (1/53)

Journal: Sensors (Switzerland)

CiteScore: 6,4 HP: 91% SNIP: 1,42 SJR: 0,803

Após a avaliação do *abstract*, o artigo foi definido como convergente pois apresenta um sistema multissensorial baseado em SVM (do inglês, *support vector machines*) para diagnosticar falhas em aerogeradores, obtendo informações de um acelerômetro, um sensor físico. O sistema multissensorial aplicado foi validado com o auxílio de uma bancada de testes que simulou duas condições de falha, semelhantes às reais, as quais os aerogeradores são submetidos: desalinhamento e desequilíbrio, além de ter seu desempenho comparado com resultados adquiridos de redes neurais artificiais.

Ao observar os resultados deste artigo, foi destacado um resultado que, após ser definido a melhor configuração da rede neural artificial (RNA ou ANN, do inglês, *artificial neural network*), esta foi comparada com alguns métodos de SVM, e é mostrada na Tab. 2.

Tabela 2. Comparação dos Resultados do SVM e ANN

| | Linear SVM | Perceptron SVM | Gaussian SVM | Stump SVM | ANNs |
|---------------------------------|------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|
| Acurácia (%) | 98,26 (0,24) | 96,86 (0,36) | 97,25 (0,31) | 97,85 (0,23) | 97,47 (0,24) |
| Tempo de Ajuste (s) | 444,27 (10,38) | 1241,27 (16,27) | 16068,97 (35,42) | 945,17 (11,19) | 46.611,12 (2.391,96) |
| Tempo de Treinamento (s) | 12,48 (0,40) | 21,55 (0,31) | 15,61 (0,28) | 22,17 (0,28) | 491,00 (10,77) |

Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2015, p. 5642)

Pela Tab. 2 é possível verificar os resultados, onde o desvio padrão está incluso entre parênteses, em que o método de SVM Linear apresentou-se como o melhor método em termos das três variáveis, e ainda, mostrou-se um sistema de monitoramento inteligente eficientes com ótimo índice de acurácia para a detecção das falhas estabelecidas.

3.2 Artigo publicado em veículo com maior citescore

Título: “A comprehensive study on Structural Health Monitoring (SHM) of wind turbine blades by instrumenting tower using machine learning methods”.

Autores: Khazaei, M.; Derian, P.; Mouraud, A.

Ano de publicação: 2022

Quantidade de citações: 1 (21/53)

Journal: Renewable Energy

CiteScore: 13,6 HP: 90% SNIP: 2,108 SJR: 1,877

O artigo foi classificado como convergente porque realiza um estudo de viabilidade para detectar falhas na estrutura da pá por meio da análise da vibração da torre eólica. A torre foi instrumentada com acelerômetros e medidores de deslocamento, enquanto que a pá do aerogerador foi submetida a falhas estruturais, com isso foi desenvolvida redes neurais convolucionais para classificar as vibrações da torre captadas em condições seguras e defeituosas da pá, e assim definir a relação entre estruturas defeituosas da lâmina e o impacto na vibração da torre, observando que essas falhas podem ser detectadas e diagnosticadas.

Um resultado interessante apresentado nesse artigo estabelece os índices de acurácia de quatro métodos de entrada de dados utilizados pelo classificador CNN (*Convolutional Neural Network*) – Amplitude de Série Temporal (TSA), Transformada Discreta de Wavelet (DWT), Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Função Característica Estatística (SFF) – considerando dois modos de vibração da torre eólica, SS (*Side-to-Side*) e FA (*Fore-Aft*), para quatro diferentes intensidades de turbulência (WTI – *Wind Turbines Intensity*). Tais resultados são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3. Resultados Gerais da Classificação Baseado nos Deslocamentos da Torre

| Modo de Vibração | | WTI = 0% | | WTI = 5% | | WTI = 10% | | WTI = 20% | |
|------------------|-----|--------------|-----|--------------|------|--------------|------|--------------|------|
| | | Acurácia (%) | AUC | Acurácia (%) | AUC | Acurácia (%) | AUC | Acurácia (%) | AUC |
| Deslocamento FA | TSA | 99,8 | 1 | 50 | 0,5 | 50 | 0,5 | 50 | 0,5 |
| | DWT | 99,8 | 1 | 50 | 0,5 | 50 | 0,5 | 50 | 0,5 |
| | FFT | 99,4 | 1 | 54,3 | 0,5 | 50 | 0,5 | 50 | 0,5 |
| | SFF | 99,5 | 1 | 50 | 0,5 | 50 | 0,5 | 50 | 0,5 |
| Deslocamento SS | TSA | 100 | 1 | 98,1 | 1 | 88,2 | 0,94 | 68,7 | 0,74 |
| | DWT | 100 | 1 | 98,5 | 1 | 89,4 | 0,95 | 72,6 | 0,77 |
| | FFT | 99,7 | 1 | 93,9 | 0,98 | 78,4 | 0,86 | 71,6 | 0,79 |
| | SFF | 99,7 | 1 | 78,9 | 0,87 | 64,5 | 0,70 | 55,6 | 0,57 |

Fonte: Adaptado de (KHAZAEI, 2022)

Ao ser observado os índices de precisão das classificações alcançadas e sua respectiva AUC (do inglês, Area Under the Curve) – que relaciona a capacidade do classificador em distinguir diferentes condições – para os parâmetros e condições estabelecidas, os resultados mais precisos e confiáveis foram obtidos baseados nas aproximações DWT, e ainda que o deslocamento da torre do tipo SS possibilitou uma melhor eficiência dos métodos utilizados em comparação com o deslocamento do tipo FA. Para mais, as tendências de acurácia para o deslocamento SS são apresentadas na Fig. 2.

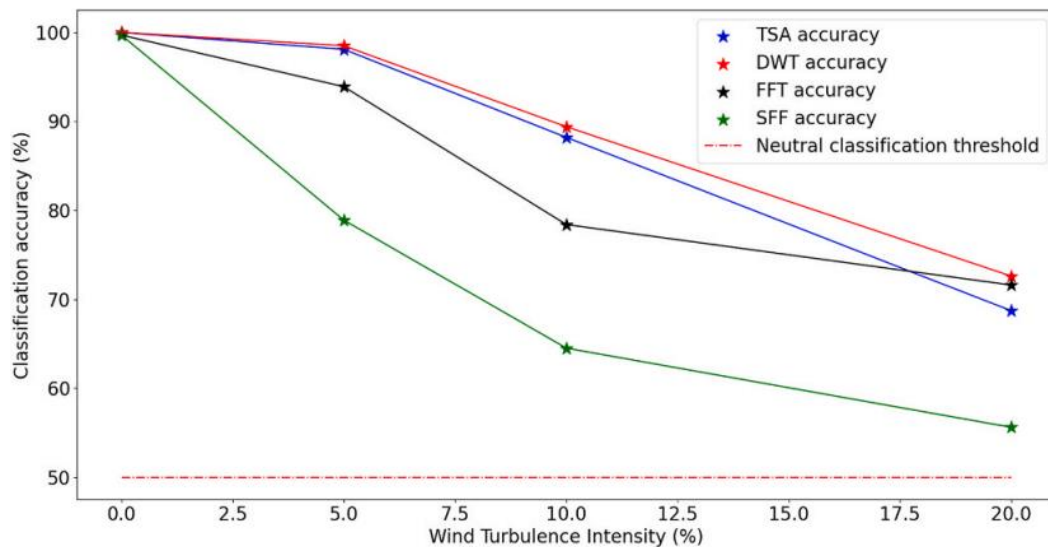


Figura 2. Tendência de acurácias obtidas com base no deslocamento SS da torre (KHAZAEI, 2022)

Como apresentado na Fig. 2, o método proposto é capaz de identificar as falhas da pá eólica com base na vibração da torre usando TSA e DWT, os quais forneceram elevados índices de precisão de cerca de 90% em WTI de 10%, que representa uma taxa de turbulência padrão e frequentemente usada em estudos e pesquisas (KHAZAEI, 2022).

3.3 Outros artigos classificados como convergentes

Os métodos utilizados para a elegibilidade e classificação demonstraram-se eficientes visto que os artigos com maior quantidade de citação e publicado pelos periódicos com maiores fatores de impacto demonstraram-se alinhados com o escopo desta revisão. Contudo, os demais artigos foram avaliados com base em seus respectivos *abstracts*, considerando principalmente os artigos com mais citações e publicados pelos *journals* com melhores pontuações. Ademais, destaca-se três artigos, os quais foram considerados convergentes e bastante pertinentes ao foco deste trabalho.

Título: “Fault diagnosis of wind turbine gearbox based on deep bi-directional long short-term memory under time-varying non-stationary operating conditions”.

Autores: Cao, L.; Qian, Z.; Zareipour, H.; Huang, Z.; Zhang, F.

Ano de publicação: 2019

Quantidade de citações: 24 (5/53)

Journal: IEEE Access

CiteScore: 6,7 HP: 90% SNIP: 1,326 SJR: 0,927

Neste artigo, considerado como convergente, é apresentado uma nova estrutura de avaliação de falhas em aerogeradores baseada em DB-LSTM (do inglês, *deep bi-directional long short-term memory*). Essa nova estrutura de diagnóstico objetiva superar as barreiras deparadas pelo *deep learning* e simular condições de funcionamento não estacionárias e variáveis com o tempo, buscando assemelhar-se mais ainda com as condições de operação reais. Vale ressaltar que foram utilizados acelerômetros para coletar dados da estrutura estudada e validar a eficácia e viabilidade do método apresentado.

Título: “PSO-BP neural network-based strain prediction of wind turbine blades”.

Autores: Liu, X.; Liu, Z.; Liang, Z.; Zhu, S.-P.; Correia, J.; De Jesus, A.

Ano de publicação: 2019

Quantidade de citações: 34 (2/53)

Journal: Materials

CiteScore: 4,7 HP: 68% SNIP: 1,137 SJR: 0,604

Este trabalho foi eleito compatível porque utiliza a técnica computacional de redes neurais *backpropagation* aprimorada por PSO (do inglês, *Particle Swarm Optimization*), um modelo preditivo, para prever a deformação de pontos não medidos de pás de turbina eólica durante testes estáticos, fornecendo mais informações para a avaliação e caracterização estrutural das pás. A verificação da usabilidade desses modelos de redes neurais preditivas foi feita pela comparação dos resultados da previsão com resultados de simulações.

Título: “Crack detection and localization on wind turbine blade using machine learning algorithms: a data mining approach”.

Autores: Joshuva, A.; Sugumaran, V.

Ano de publicação: 2019

Quantidade de citações: 23 (6/53)

Journal: SDHM Structural Durability and Health Monitoring

CiteScore: 2,0 HP: 39% SNIP: 0,779 SJR: 0.274

Apesar deste artigo não ter sido publicado por um periódico com melhores indicadores Scopus, ainda assim, apresentou-se pertinente e classificado como convergente por abordar a importância de identificar danos estruturais em aerogeradores precocemente e evitar catástrofes, onde, para essa identificação de falhas, foram modelados quinze algoritmos de aprendizado de máquina construídos com base na resposta da pá da turbina eólica às vibrações submetidas.

4. CONCLUSÕES

Foi possível observar que as ferramentas de busca avançada da base de dados Scopus demonstrou-se bastante relevante para o levantamento de referências bibliográficas. Para mais, a utilização de grupos de palavras chave juntamente com a interseção destes conjuntos mostrou-se uma estratégia muito eficiente para a redução do volume massivo de artigos atrelados aos grupos à uma quantidade menor de 53 artigos alinhados ao escopo central deste trabalho.

Quanto aos métodos de ranqueamento utilizados para classificar o resultado inicial de 58 documentos, revelaram-se eficazes para elencar os principais artigos nos quesitos de mais citado e com maiores indicadores de impacto. Porém, a análise individual dos artigos resultantes através do *abstract* tornou-se uma forma de avaliação indispensável para garantir que os artigos destacados estejam, de fato, englobados no foco central.

Ademais, foi possível observar a importância do desenvolvimento e aprimoramento de geração de energias limpas e renováveis, e tratado de aerogeradores e parques eólicos, técnicas computacionais com machine learning se mostram ferramentas úteis e eficientes para o monitoramento e detecção de falhas em estruturas eólicas garantindo que catástrofes, perdas de investimentos, altos custos de operação e manutenção sejam evitados.

Conclui-se ainda que aerogeradores necessitam do devido acompanhamento e que algoritmos inteligentes são ótimos aliados para esse monitoramento e conseqüentemente auxílio para tomadas de decisão relacionadas a esta área.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Goiás – UFG e à unidade acadêmica Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – EMC/UFG por proporcionar um ambiente de grandes aprendizados. Agradeço também a FURNAS Centrais Elétricas pelo incentivo financeiro e motivação para buscar mais conhecimentos e poder desenvolver trabalhos como este proposto.

6. REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, H. D. M., 2015. “Um Método para Identificação de Falhas em Componentes e Subcomponentes de Turbinas Eólicas Através de Monitoramento de Condição Baseado em Vibração”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, Brasil.
- BRANDÃO, R. F. P. M., 2011. “Turbinas Eólicas: Manutenção”. Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Área de Máquinas e Instalações Elétricas. Departamento de Engenharia Eletrotécnica.
- DOWNEY, A.; LAFLAMME, S.; UBERTINI, F., 2017. “Experimental wind tunnel study of a smart sensing skin for condition evaluation of a wind turbine blade”. *Smart Materials and Structures* **26**, 125005.
- KHAZAEI, M.; DERIAN, P.; MOURAUD, A., 2022. “A comprehensive study on Structural Health Monitoring (SHM) of wind turbine blades by instrumenting tower using machine learning methods”. *Renewable Energy* **199**, 1568-1579.
- OLIVEIRA, G.; MAGALHÃES, F.; CUNHA, Á. *et al.*, 2017. “Dynamic monitoring system for utility-scale wind turbines: damage detection and fatigue assessment”. *J Civil Struct Health Monit* **7**, 657-668.
- RODRIGUES, P. A. D., 2022. “Desenvolvimento de Sistema de Monitoramento de Turbinas Eólicas por meio de Sensores Virtuais”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, Brasil.
- SANTOS, P.; VILLA, L. F.; REÑONES, A.; BUSTILLO, A.; MAUDES, J., 2015. “Na SVM-based solution for fault detection in wind turbines”. *Sensors* **15**, 5627-5648.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações.