

# DIGITAL TWIN APLICADO AOS ATIVOS DE UM PARQUE EÓLICO *OFFSHORE*

**João Victor Montenegro Diniz Silva (Creation Research Group/UFRN)**

**Mario Orestes Aguirre González (Creation Research Group/UFRN)**

**João Paulo Costa de Araújo (Creation Research Group/UFRN)**

**Letícia Soares Teixeira de Souza (Creation Research Group/UFRN)**

**Andressa Medeiros Santiso (Creation Research Group/UFRN)**



*O aumento de mudanças climáticas tem impulsionado o uso de energias renováveis e, nesse contexto, a energia eólica offshore tornou-se uma das opções de energias renováveis mais relevantes. O Relatório Global da Energia Eólica 2024 do Global Wind Energy Council (GWEC) e do IRENA (2024) apontam expectativas de incremento de instalação, passando de 75,2 GW em 2023 para 494 GW em 2030. Porém, restrições como capacidade de infraestrutura, equipamentos de instalação, tecnologia de turbinas, condições extremas do mar, distância da costa, variação de condições climáticas e outros, dificultam a instalação, operação e manutenção de parques eólicos offshore. Assim, a utilização de ferramentas tecnológicas que auxiliam na previsão, controle e monitoramento de ativos físicos, como o Digital Twin (DT), são relevantes para este segmento. O DT utiliza dados de ativos físicos coletados através de sensores, com integração entre sistemas para geração de dados, integrando-os em simulações para criar uma cópia digital do modelo físico. Para isso, são utilizadas ferramentas como aprendizado de máquina, big data, entre outras, trabalhando coordenadamente, com objetivo de otimizar a operação e manutenção dos ativos. O objetivo deste trabalho é identificar os impactos da utilização do DT nas atividades que envolve os ativos eólicos offshore, dando ênfase às ferramentas tecnológicas utilizadas em seu escopo. O procedimento da pesquisa se deu em quatro etapas: (1) pesquisa bibliográfica, em busca de artigos e relatórios; (2) identificação dos impactos da utilização do DT em parque eólico offshore e as principais ferramentas utilizadas em seu escopo; (3) exemplos de aplicação do DT no monitoramento de ativos e (4) análise dos resultados. Assim, foi identificado que o DT auxilia na previsão e antecipação de falhas, otimiza operações e resultados do parque eólico offshore.*

*Palavras-chave: Operação e manutenção, Gêmeo Digital, Energia eólica offshore, Energia Renovável, Sistemas de Produção e Operações.*

## 1. Introdução

Nos últimos anos, as energias renováveis tem sido impulsionadas por diversos fatores, sobretudo a crise climática que tem exigido redução de emissões de gases provenientes do uso de combustíveis fósseis, conforme limitado pelo Protocolo de Kyoto (ESTEBAN *et al.*, 2011) e a restrição da temperatura do planeta em menos de 1,5°C até 2050, segundo meta do Acordo de Paris (IRENA, 2023). Como resultado, a energia eólica *offshore* vem ganhando considerável espaço, estabelecendo-se como uma das formas mais desenvolvidas de energia renovável em todo o mundo devido ao seu maior fator de capacidade (ESTEBAN *et al.*, 2011), capacidade de geração (MARKARD; PETERSEN, 2009) disponibilidade de espaço e menor impacto visual e sonoro, favorecendo sua implementação (GOMES *et al.*, 2019).

Nesse cenário, o desenvolvimento de energia eólica *offshore* mostra-se promissor. De acordo com o Relatório Global da Energia Eólica de 2024, do *Global Wind Energy Council (GWEC)*, prevê-se que a capacidade anual de instalação de energia eólica *offshore* quadruple, passando de 10,8 GW em 2023 para mais de 37,1 GW em 2028 (GWEC, 2024). Dessa forma, a energia eólica *offshore* demonstra-se como a fonte renovável mais competitiva em termos de custos na maioria dos mercados (DECASTRO *et al.*, 2019).

Entretanto, algumas restrições, como capacidade de transporte, equipamentos de instalação e tecnologia das turbinas (GUO *et al.*, 2022), bem como condições extremas do mar, distância da costa (CIURIUC *et al.*, 2022) e variações climáticas, dificultam a instalação de parques eólicos *offshore* e as atividades de operação e manutenção (O&M). Isso influencia na redução dos níveis de confiabilidade, avaliados para parques eólicos *offshore*, destacando a importância das operações e manutenções (SHAFIEE *et al.*, 2015).

Portanto, os custos de O&M são cruciais e passíveis de otimização, uma vez que, de acordo com Ortegon *et al.* (2013), tais custos representam uma parcela considerável do custo total do ciclo de vida de um parque eólico *offshore*. Nesse sentido, a utilização de ferramentas tecnológicas que auxiliam na previsão, controle e monitoramento de ativos físicos, como o *Digital Twin (DT)* (FULLER *et al.*, 2023), torna-se relevante para o mercado da energia eólica *offshore*.

O *DT*, ou gêmeo digital, utiliza dados de ativos físicos, sensores, indicadores e histórico, integrando-os em soluções matemáticas, reduzindo o tempo e projetando um ativo físico em um modelo virtual (GLAESSEN e STARGEL, 2012). Boschert e Rosen (2016) acrescentam que essa ferramenta descreve as características físicas e funcionais de um componente, produto ou sistema, com informações que podem ser úteis ao longo de todo o seu ciclo de vida. Segundo

Pujana *et al.* (2023), o *DT* é uma representação virtual de um sistema ou ativo físico com o mesmo comportamento.

Dessa forma, considerando a importância das atividades de O&M para a energia eólica *offshore*, os custos envolvidos e a utilização do *DT* como uma ferramenta de apoio às referidas atividades, o presente artigo visa responder a seguinte questão da pesquisa “Quais são os impactos da utilização do *DT* nas atividades de O&M da energia eólica *offshore*?”.

Assim a Internet das Coisas (IoT), tecnologia de sensores, *Big Data*, modelos de simulação (WANG *at al.*, 2021; ABOUZID e SAID, 2023), Inteligência Artificial, Indústria 4.0 e Fabricação Inteligente (CIURIUC *et al.*, 2022; ABOUZID *et al.*, 2023) são ferramentas que propiciam o desenvolvimento e a utilização do *DT*, não apenas nas atividades de O&M, mas também em diversas áreas, uma vez que permitem a conexão de dados em tempo real entre entidades físicas e modelos virtuais. Com apoio dessas tecnologias, o *DT* pode ser desenvolvido e modelado de acordo com o objetivo de cada aplicação.

Pelo exposto, o objetivo do artigo é identificar os impactos da utilização do *DT* nas atividades que envolve os ativos eólicos *offshore*, enfatizando as ferramentas utilizadas em seu escopo. Para isso, o artigo está estruturado em quatro seções. A seção 1 apresenta a contextualização do tema discutido. A seção 2 explana o método da pesquisa, considerando os procedimentos realizados no desenvolvimento do estudo. A seção 3 aborda as tecnologias que apoiam o *DT* nas atividades de O&M da energia eólica *offshore*. E, a seção 4 apresentada as considerações sobre o tema.

## 2. Método da Pesquisa

O método de pesquisa do artigo é caracterizado como aplicada, uma vez que objetiva gerar conhecimento acerca da ferramenta do *DT* na energia eólica *offshore*. Nesse contexto, é uma pesquisa de abordagem qualitativa, visto que não utiliza métodos estatísticos para análise de dados e depreensão de resultados (GIL, 2002). Quanto aos objetivos, pode ser caracterizado como descritivo e exploratório, pois busca apresentar e analisar os impactos da utilização do gêmeo digital nas atividades de O&M na energia eólica *offshore*. O método adotado foi uma pesquisa bibliográfica tradicional, uma vez que busca extrair dados e informações importantes a partir da literatura já existente – artigos, teses, relatórios e livros (PRODANOV e DE FREITAS, 2013).

O procedimento do estudo contemplou quatro etapas, conforme Figura 1.

Figura 1: Procedimento da pesquisa.



Fonte: Autoria Própria (2024).

A primeira etapa consistiu em uma pesquisa bibliográfica tradicional em teses, dissertações e livros sobre o tema de DT e energia eólica *offshore*. A segunda etapa contemplou a busca e análise de artigos no Portal Periodicos Capes e suas bases de dados – *Scopus* e *ScienceDirect* para obtenção de artigos relacionados ao tema, resultando na seleção de 27 artigos. Na terceira etapa foram identificados e analisados artigos com aplicação do DT no monitoramento de ativos. A quarta etapa consistiu na elaboração de resultados, com a sistematização dos impactos da aplicação do DT nos parques eólicos *offshore*.

### 3. Tecnologias do *Digital Twin*

Dentro desta nova era digital em que a indústria eólica está emergindo, algumas tecnologias desempenham papel primordial. Ferramentas como Inteligência Artificial (IA), *Big Data* (BDA), computação em nuvem, entre outras, estão possibilitando que empresas do setor de geração de energia, mais especificamente o setor eólico, estabeleçam relações eficientes entre operação/manutenção e otimização (LIU *et al.*, 2021).

A demanda por ferramentas tecnológicas gira em torno das necessidades de obtenção de dados, controle e comunicação eficiente de processos. Nesse sentido, Ambarita *et al.* (2024) afirmam que a aplicação do *Digital Twin* requer tecnologias de comunicação para conectar todos os ativos físicos com os digitais de forma adequada para que possa fornecer fidelidade aos dados.

Na linha de frente desta comunicação, entre o físico e o digital, está a demanda por sensores, onde grandezas elétricas e mecânicas apresentam necessidade de medição com nível adequado de precisão. Sensores de corrente, tensão e pressão, assim como demais sensores, formam uma rede de dados capaz de fornecer mensurações das grandezas que envolvem o

monitoramento do ativo, transmitindo-os para sistemas de monitoramento e controle. Todo esse conjunto é conhecido na indústria 4.0 como Internet das Coisas (IoT) (SHARMA *et al.*, 2022).

Os dados coletados pela IoT são processados por ferramentas como aprendizado de máquina (*machine learning*) e Inteligência Artificial, entre outras, a fim de identificar padrões, prever falhas e realizar atividades de otimização e predição. Alguns desses processos possibilitam uma operação automatizada, possibilitando reconfiguração dinâmica ao longo do ciclo do processo. Quando ocorre a integração dessas tecnologias, dentro de uma macro estrutura otimizada, é possível criar domínios físicos e digitais, multidisciplinares, capazes de reproduzir diversos processos no modelo digital, de forma síncrona, que possui comunicação bidirecional com o ativo físico. A esse modelo se dá o nome de *Digital Twin* (WU *et al.*, 2020).

O *Digital Twin* faz parte das novas tecnologias que surgem na digitalização das organizações. Essa tecnologia se assemelha aos conceitos de Internet das Coisas (IoT), aprendizado de máquina, inteligência artificial e realidade aumentada, sendo desenvolvida pela academia e indústria devido aos seus benefícios como a redução de custos, riscos, melhoria de oferta de serviços, eficiência, segurança, confiabilidade, resiliência e apoio as decisões (VANDERHORN; MAHEDEVAN, 2021). O conceito foi introduzido pela primeira vez por Grieves como o “equivalente digital do produto físico” em 2003 na Universidade de Michigan (LIU *et al.*, 2021). Grieves apresentou o conceito contendo três componentes: Virtual, físico e a interação entre eles. Tao *et al.* (2018) expandiram o conceito para cinco componentes, acrescentando os dados e aplicação de serviços, expandindo o conceito inicialmente introduzido.

Sua aplicação incorpora a Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e análise de dados para melhoria dos resultados. Sua construção utiliza sensores para captura de dados dos componentes dos ativos a serem monitorados em tempo real e utiliza para criação do *Digital Twin*, possibilitando a visualização do ativo como um todo. Isso proporciona uma vantagem de maior aprendizagem e entendimento dos ativos e sistemas que o envolve, possibilitando otimização operacional, melhoria na qualidade, aumento da eficiência e economia de custos (JAVOID *et al.*, 2023).

A utilização dessa tecnologia na operação e manutenção de parques eólicos *offshore* apresenta capacidade de suporte no monitoramento de falhas, previsão de vida útil, segurança, gerenciamento de impacto ambiental, suporte a decisões, podendo auxiliar novos projetos e otimizando através de dados históricos operacionais (XIA; ZOU, 2023).

É fundamental distinguir o conceito de *Digital Twin* de definições de tecnologias já existentes que, por si só, não configuram um *Digital Twin*. O Quadro 1 apresenta algumas diferenças. Enquanto o *DT* é uma réplica virtual capaz de atualizar em tempo real com todos os parâmetros e comportamentos do ativo, uma simulação se limita apenas ao modelo computacional sendo alimentado manualmente pelos dados inseridos.

Quadro 1 – Comparativo entre o *Digital Twin* e tecnologias existentes.

Tecnologia	Diferença quando comparado ao <i>Digital Twin</i>
Simulação	Sem atualização em tempo real
Aprendizado de máquina	Não é cópia do ativo monitorado
Protótipo Digital	Não apresenta dados do ativo
Modelagem Baseado em Agente	Sem atualização em tempo real

Fonte: Adaptado Sharma et al. (2022).

São inúmeros os casos de sucesso da aplicação do *Digital Twin* na operação e manutenção de processos produtivos. Schreder *et al.* (2016) desenvolveram uma modelagem de *Digital Twin* com aprendizado de máquina e metodologia de comunicação para troca de dados entre a parte física e a digital. Neste estudo, utilizou-se um componente físico que possuísse atributos a serem mapeados, uma ferramenta de modelagem e outra que permitisse o fornecimento de dados, estabelecendo uma comunicação com sistemas externos que possuem a capacidade de captar e consumir as informações recebidas. O componente utilizado foi uma válvula industrial, componente utilizado em diversas aplicações e sendo crítico em sistemas, o que o torna eletivo para monitoramento através de sensores. O *software AutomationML* foi utilizado para modelagem dos elementos do componente escolhido para que possam responder as informações recebidas dos sensores implementados. A troca de informações e dados exigiu um sistema de comunicação entre o sistema presente na válvula e o sistema final, presente em um dispositivo de *smartphone*, utilizando um dispositivo de IoT para enviar as informações desejadas para um sistema externo. A realização deste trabalho no contexto da Indústria 4.0 apresentou o conceito de *Digital Twin* e um sistema de comunicação entre a parte virtual e física através da utilização de *software* e sensores.

No contexto da energia eólica, os setores *offshore* e *onshore*, Sivalingam *et al.* (2018) utilizaram a tecnologia para prever a vida útil do conversor de força de uma turbina eólica. O objetivo do monitoramento e da criação do *DT* para este componente, residiu na necessidade de otimização da estratégia de manutenção para aumento da confiabilidade e durabilidade do mesmo. Essa ação só foi possível através da implementação de um sistema integrado de rede e

aquisição de dados (*SCADA*, sigla em inglês) para se obter os dados e com isso determinar o estado e condição do componente.

A condição física baseada em previsão de vida útil, aliada à condição básica de manutenção, é apontada como a melhor estratégia para turbinas eólicas *offshore*, devido ao seu alto custo e possibilita uma redução em cerca de 10% do custo de manutenção. Em ambos os ambientes, a velocidade do vento e variação de temperatura causam as variações de carga a qual as turbinas estão submetidas, levando a ocorrência elevada de falhas. A construção do modelo preditivo foi realizada em linguagem de programação orientada a objetos, utilizando *Python*, para modelagem matemática que representa a dinâmica e representando as condições do ativo. A modelagem foi abastecida com dados reais do componente monitorado através do sistema *SCADA*, com objetivo da reprodução da condição do ativo. Quando implementado o *DT*, resultou-se produção de resultados satisfatórios na otimização operacional, aumento da vida útil, maior índice de confiabilidade, além de auxiliar e otimizar as tomadas de decisões no gerenciamento dos ativos, demonstrando que é fundamental a utilização desta tecnologia para se chegar a uma ótima estratégia de O&M (Sivaligam *et al.*, 2018).

O modelo apresentado por Moghadam *et al.*, (2021), estabeleceram um *Digital Twin* de alta capacidade computacional para o monitoramento da transmissão de força de uma turbina eólica para controle de elementos internos, tendo como objetivo o aumento da vida útil através de abordagens estatísticas. Essas abordagens utilizaram as forças submetidas nos elementos mecânicos do componente, buscando estimar parâmetros que ocasionem falhas para prever e diagnosticar eventuais falhas. A construção do modelo matemático teve como base equações analíticas utilizadas no projeto dos elementos mecânicos do componente, fazendo a execução de simulações com dados captados em tempo real para geração de dados em tempo real e sendo utilizado para previsão de vida útil. Assim, forneceram a base de desenvolvimento de um modelo aplicado na manutenção preditiva de turbinas eólicas com um sistema tendo base a vida útil.

Cao *et al.* (2023), aliaram o *Digital Twin* junto a simulação utilizando dinâmica computacional dos fluidos (CFD, sigla em inglês) que é utilizado para realização de previsão afim de disponibilizar de forma síncrona o comportamento do efeito esteira em que o parque eólico *offshore* está instalado, também apresentando deformações estruturais e tensões nos componentes de cada ativo. Esse modelo surgiu pela necessidade de monitoramento do campo eólico devido aos modelos existentes não serem capazes de monitorar e demonstrar os fenômenos que ocorrem na área instalada ao ser aliado a tecnologia do *DT* e auxiliado por

técnicas de aprendizado de máquina. O objetivo desta união foi ter uma ferramenta computacional com capacidade de monitoramento do parque eólico, componentes dos ativos e previsão da vida útil, principalmente, quando submetidos a condições climáticas extremas. A apresentação dos parâmetros e monitoramento em tempo real resultou numa melhoria de 4% na vida útil quando comparado a utilização somente do *CFD*.

Os modelos de *DT* construídos por Zhang e Zhao (2023) e Kandemir *et al.* (2023), foram construídos utilizando aprendizado de máquina para simulação de cenários com intuito de análise e predição do efeito esteira e efeitos climáticos que ocorrem na área dos parques eólicos *offshore*. O monitoramento se faz necessário para se ter o estado e parâmetros das turbinas, resultando em uma orientação na tomada de controle e decisão para uma otimização operacional, resultando no aumento da vida útil, da disponibilidade e de geração. No modelo apresentado por eles, além desse controle operacional, a tecnologia permitiu uma otimização de localização das turbinas eólicas *offshore* flutuantes, pare redução do efeito esteira que tem como consequência o aumento da energia gerada pelo parque.

#### 4. Análise dos Resultados

A utilização do *Digital Twin* apresenta resultados satisfatórios na indústria de energia eólica *offshore*, podendo ser aplicado na otimização da manutenção, aumento da vida útil dos ativos, redução de custos, previsão de falhas, previsão de geração de energia, entre outros. No campo da manutenção, essa tecnologia oferece monitoramento com uma visão detalhada dos ativos e seus componentes, além de fornecer resultados de análises preditivas. Assim, sua utilização proporciona a otimização de recursos e informações para atuação na gestão de atividades de operação e manutenção dos parques, levando a maiores índices de confiabilidade e disponibilidade dos ativos.

Dessa forma, a implementação do *Digital Twin* tem possibilitado monitoramento em tempo real, previsões, simulação de situações climáticas, simulação operacional e de disposição dos ativos, como no caso das eólicas *offshore* flutuantes, elevando o nível de qualidade, segurança, aumento de geração de energia, previsibilidade, vida útil, redução de custos e outros. O Quadro 2 apresenta os impactos identificados do *Digital Twin* em parques eólicos *offshore*.

Quadro 2 – Impactos do *Digital Twin* em parques eólicos *offshore*.

Impacto	Autores
Redução de custo de O&M	Xia e Zou (2022).
Apoio na tomada de decisão	Ambarita <i>et al.</i> (2024)
Previsão de falhas e vida útil	Moghadam e Nejad (2021); Ciuriuc <i>et al.</i> (2021)
Planejamento de parada dos ativos eólicos (Turbina, linhas coletoras, subestação) e decisões operacionais	Sivalingam <i>et al.</i> (2018);
Posicionamento das turbinas eólicas <i>offshore</i>	Kandemir <i>et al.</i> (2023).
Previsão de cenário climático do campo <i>offshore</i>	Zhang e Zhao (2023); Wang <i>et al.</i> (2023).

Fonte: Autoria Própria (2024).

Os impactos observados no estudo de Cao *et al.* (2023), demonstraram a capacidade de previsão, simulação de cenários nos componentes que fazem parte da turbina eólica *offshore*, monitoramento das condições climáticas do campo em que as turbinas estão inseridas, sendo o *DT* capaz de gerar dados e cenários utilizando apenas 0,01% do tempo e custo computacional se comparado ao *CFD*. Xia e Zou (2022) demonstraram a capacidade de suporte do *DT* nas tomadas de decisões de operação, manutenção e previsibilidade de falhas utilizando métodos estatísticos e de aprendizado de máquina para detecção de falhas, tendo como ganhos a otimização de decisões, operações e a redução dos custos. Kandemir *et al.* (2022), simulou o funcionamento do parque eólico *offshore* e a disposições das turbinas para otimização da geração de energia, com a diminuição do efeito esteira provocado por elas, tendo um aumento de produção. Isso demonstra que a utilização do *DT* antecipa cenários, apresenta controle em tempo real e possibilita a simulação de cenários que se busque a otimização dos ativos, auxiliando as decisões a serem tomadas.

Os estudos mencionados nesse artigo demonstram que a utilização da tecnologia do *Digital Twin* auxiliou nas análises e simulação de cenários e parâmetros de difícil acesso local ou de aquisição de dados, permitindo visualizar cenários ótimos possíveis sem alto custo, prevendo o comportamento e implicações no parque eólico *offshore* apresentam nos cenários reais ou simulados. No estudo de Schroeder *et al.* (2016), demonstrou-se como a troca de informações entre a parte física e a digital pode ocorrer, criando modelos para a automação do aprendizado de máquina. Sivalingam *et al.* (2018) implementaram um modelo que previa o dano acumulado e a vida útil da turbina eólica *offshore*, estabelecendo um *framework* completo

para a implementação do *Digital Twin* em uma estratégia de manutenção preditiva otimizada. Cao et al. (2023), uniram a tecnologia do DT junto a simulação para maior compreensão e monitoramento dos efeitos ambientais nos componentes da turbina eólica. Por sua vez, Zhang e Zhao (2023) e Kandemir et al. (2023) utilizaram o aprendizado de máquina na análise e previsão para o posicionamento das turbinas eólicas no parque *offshore*, a fim de evitar o efeito esteira, otimizando o posicionamento para alcançar uma geração de energia mais eficiente, além de compreender o impacto do efeito esteira no ambiente.

## 5. Conclusões, Considerações finais e Recomendações

Diante do panorama global voltado a redução de emissões e promoção da transição energética e o potencial da eólica *offshore* para este fim, a tecnologia de *Digital Twin* surge como oportunidade inovadora para desenvolvimento do setor.

A concepção do *Digital Twin* inova na abordagem tradicional na engenharia de controle de processos ao criar uma réplica virtual precisa e dinâmica do ativo físico por meio da qual as empresas alcançam níveis mais altos de controle e operação. Suas diversas aplicações abrangem desde a operação em processos industriais até a gestão de parques eólicos *offshore*. No entanto, para o maior aproveitamento do *DT*, é crucial a utilização de tecnologias adequadas e integrá-las de forma eficiente para que deem suporte ao objetivo desejado. O sistema que deve ser utilizado deve apresentar robustez e segurança de dados como princípios da implementação do processo de construção de um *DT*. À medida em que se avança na indústria 4.0, o *Digital Twin* se apresenta como protagonista na busca por uma maior eficiência.

O objetivo deste trabalho foi identificar os impactos da utilização do DT nas atividades que envolve os ativos eólicos *offshore*. Isso destaca seu papel fundamental no monitoramento e otimização das operações em parques eólicos *offshore*. Os desafios enfrentados nas atividades operacionais em ambiente *offshore* são causados por fatores como localização, condições climáticas e marítimas adversas. Nesse contexto, a tecnologia do *Digital Twin* se mostra essencial para o monitoramento e auxílio na tomada de decisões operacionais e de manutenção, proporcionando benefícios como otimização da manutenção, aumento da vida útil dos ativos, redução de custos, maior segurança operacional, previsão de falha, controle e previsão de geração de energia, entre outros.

Como analisado nos estudos citados, é o alto impacto que a tecnologia do *Digital Twin* leva ao gerenciamento, otimização de operações e manutenção, previsão de falhas, análise de falhas e a previsão, redução de custos e outras otimizações. No estudo realizado por Sivalingam

demonstra a redução de custos de manutenção e reduzindo também o custo de geração, outro estudo que se deve destacar foi realizado por Cao *et al.* (2023), demonstrando a redução dos custos computacionais, demonstrando grande vantagem na utilização de outras utilizações

Recomenda-se, para futuros estudos, a aplicação do *Digital Twin* em processos de construção e de O&M de parques eólicos *offshore* utilizando como métodos de pesquisa o *survey*, estudo de casos, experimentos e pesquisa-ação.

## REFERÊNCIAS

ABOUZID, Ihsane; SAIDI, Rajaa. Digital twin implementation approach in supply chain processes. **Scientific African**, [S.L.], v. 21, p. 01821, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01821>.

AMBARITA, Evi Elisa et al. Industrial digital twins in offshore wind farms. **Energy Informatics**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1, 6 fev. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s42162-024-00306-6>.

BOSCHERT, Stefan; ROSEN, Roland. Digital Twin—The Simulation Aspect. **Mechatronic Futures**, [S.L.], p. 59-74, 2016. Springer International Publishing. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1\\_5](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5).

CAO, Yu et al. Flow field distribution and structural strength performance evaluation of fixed offshore wind turbine based on digital twin technology. **Ocean Engineering**, [S.L.], v. 288, p. 116156, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116156>.

CIURIUC, Alexandra et al. Digital tools for floating offshore wind turbines (FOWT): a state of the art. **Energy Reports**, [S.L.], v. 8, p. 1207-1228, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.034>.

DECASTRO, M. et al. Europe, China and the United States: three different approaches to the development of offshore wind energy. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 109, p. 55-70, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.025>.

ESTEBAN, M. Dolores et al. Why offshore wind energy? **Renewable Energy**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 444-450, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.009>.

FULLER, Aidan et al. Digital Twin: enabling technologies, challenges and open research. **Ieee Access**, [S.L.], v. 8, p. 108952-108971, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2020.2998358>.

GLAESSGEN, Edward et al. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. **53Rd Aiaa/Asme/Asce/Ahs/Asc Structures, Structural Dynamics And Materials Conference 20Th Aiaa/Asme/Ahs**

**Adaptive Structures Conference 14Th Aiaa**, [S.L.], p. 1818, 23 abr. 2012. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-1818>.

GOMES, Mateus Sant'anna de Sousa et al. Proposal of a methodology to use offshore wind energy on the southeast coast of Brazil. **Energy**, [S.L.], v. 185, p. 327-336, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.057>.

GUO, Yaohua et al. Review of integrated installation technologies for offshore wind turbines: current progress and future development trends. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 255, p. 115319, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115319>.

GWEC, Global Wind Report, 2024. Abu Dhabi.

IRENA. World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway, Volume 1. Abu Dhabi: 2023.

IRENA, G.W.E.C., 2023 "Global Offshore wind report 2023". GWEC: *Brussels, Belgium*, Vol, 1.

JAVOID, Mohd et al. Digital Twin applications toward Industry 4.0: a review. **Cognitive Robotics**, [S.L.], v. 3, p. 71-92, 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>.

KANDEMIR, Ege et al. Digital twin-driven dynamic repositioning of floating offshore wind farms. **Energy Reports**, [S.L.], v. 9, p. 208-214, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.091>.

LIU, Mengnan et al. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. **Journal Of Manufacturing Systems**, [S.L.], v. 58, p. 346-361, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>.

MARKARD,.; PETERSEN, R. The offshore trend: Structural changes in the wind power sector. **Energy Policy**, vol. 37, no. 9, pp. 3545–3556, 2009, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.04.015>.

MOGHADAM, Farid K. et al. Online condition monitoring of floating wind turbines drivetrain by means of digital twin. **Mechanical Systems And Signal Processing**, [S.L.], v. 162, p. 108087, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108087>.

ORTEGON, Katherine et al. Preparing for end of service life of wind turbines. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 39, p. 191-199, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.022>.

PRODANOV, C.C. and DE FREITAS, E.C., 2013. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição. Editora Feevale.

PUJANA, Ainhoa et al. Hybrid-Model-Based Digital Twin of the Drivetrain of a Wind Turbine and Its Application for Failure Synthetic Data Generation. *Energies*, [S.L.], v. 16, n. 2, p. 861, 12 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en16020861>.

SCHROEDER, Greyce N. et al. Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange. *Ifac-Papersonline*, [S.L.], v. 49, n. 30, p. 12-17, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.115>.

SHAFIEE, Mahmood et al. Maintenance logistics organization for offshore wind energy: current progress and future perspectives. *Renewable Energy*, [S.L.], v. 77, p. 182-193, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.045>.

SHARMA, Angira et al. Digital Twins: state of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal Of Industrial Information Integration*, [S.L.], v. 30, p. 100383, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383>.

SIVALINGAM, Krishnamoorthi et al. A Review and Methodology Development for Remaining Useful Life Prediction of Offshore Fixed and Floating Wind turbine Power Converter with Digital Twin Technology Perspective. 2018 2Nd International Conference On Green Energy And Applications (Icgea), [S.L.], p. 197-204, mar. 2018. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icgea.2018.8356292>.

TAO, Fei et al. Digital Twin in Industry: state-of-the-art. *Ieee Transactions On Industrial Informatics*, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 2405-2415, abr. 2019. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. <http://dx.doi.org/10.1109/tii.2018.2873186>.

VANDERHORN, Eric; MAHADEVAN, Sankaran. Digital Twin: generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, [S.L.], v. 145, p. 113524, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>.

WANG, Management et al. Recent progress on reliability analysis of offshore wind turbine support structures considering digital twin solutions. *Ocean Engineering*, [S.L.], v. 232, p. 109168, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109168>.

WU, Jiaju et al. The Development of Digital Twin Technology Review. *2020 Chinese Automation Congress (Cac)*, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-6, 6 nov. 2020. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/cac51589.2020.9327756>.

XIA, Jiajun; ZOU, Guang. Operation and maintenance optimization of offshore wind farms based on digital twin: a review. *Ocean Engineering*, [S.L.], v. 268, p. 113322, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113322>.

ZHANG, Jincheng; ZHAO, Xiaowei. Digital twin of wind farms via physics-informed deep learning. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 293, p. 117507, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117507>.