



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

**Inteligência Artificial
na Gestão de Operações:**
Limitações e possibilidades



CLASSIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO PARA GÊMEOS DIGITAIS NA INDÚSTRIA EÓLICA OFFSHORE

LUCAS THIAGO GOMES SOARES DE ARAÚJO - lucasago28@gmail.com
CREATION RESEARCH GROUP – UFRN

PEDRO HENRIQUE CASTRO BEZERRA - pedrocastro.pj@gmail.com
CREATION RESEARCH GROUP – UFRN

MARIO ORESTES AGUIRRE GONZALEZ - mario.gonzalez@ufrn.br
CREATION RESEARCH GROUP – UFRN

RAFAEL MONTEIRO DE VASCONCELOS - rafaelmonteirov@yahoo.com.br
CREATION RESEARCH GROUP – UFRN

DAVID CASSIMIRO DE MELO - davidcassi@yahoo.com.br
CREATION RESEARCH GROUP - UFRN

ÁREA: 5. ENGENHARIA DO PRODUTO

SUBÁREA: 5.3 – PLANEJAMENTO E PROJETO DO PRODUTO

RESUMO: ESTE ESTUDO EXPLORA A APLICAÇÃO DE GÊMEOS DIGITAIS E FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO (BIM, FEA E CFD) EM PARQUES EÓLICOS OFFSHORE, COM FOCO NA SUSTENTABILIDADE E ENERGIA RENOVÁVEL. A REVISÃO DA LITERATURA NO SCOPUS DESTACA QUE O BIM É AMPLAMENTE UTILIZADO PARA MONITORAR A CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DOS PARQUES, GERENCIANDO EFICIENTEMENTE INFORMAÇÕES AO LONGO DO CICLO DE VIDA DO PROJETO. A CFD OTIMIZA O DESIGN AERODINÂMICO E ESTRUTURAL DAS TURBINAS, PERMITINDO AJUSTES NA DISPOSIÇÃO DAS TURBINAS PARA MAXIMIZAR A CAPTURA DE ENERGIA E PREVER O DESEMPENHO SOB CONDIÇÕES ADVERSAS. A FEA Foca na integridade estrutural, simulando componentes como caixas de engrenagens e avaliando a durabilidade dos materiais em ambientes marítimos desafiadores. A análise combinada dessas tecnologias possibilita o monitoramento em tempo real e a previsão do comportamento das turbinas, melhorando a eficiência, durabilidade e sustentabilidade operacional. Este estudo contribui para a compreensão do uso de GÊMEOS DIGITAIS EM PARQUES EÓLICOS OFFSHORE, DESTACANDO INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E PRÁTICAS EFICAZES QUE AUMENTAM A EFICIÊNCIA E SEGURANÇA DESSAS INSTALAÇÕES.

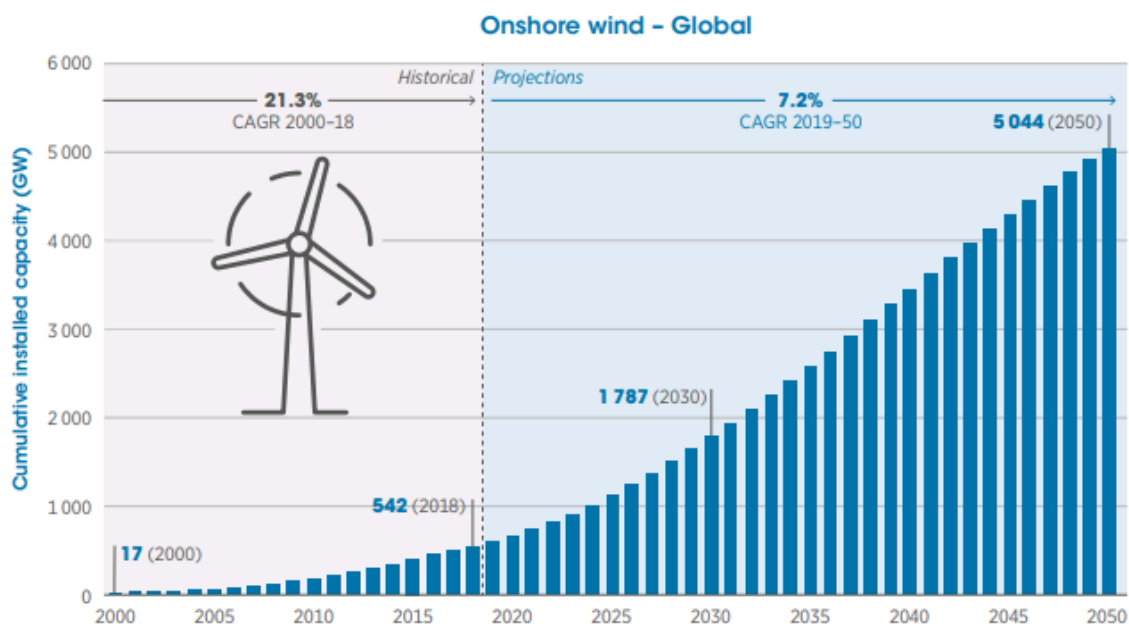
PALAVRAS-CHAVES: GÊMEOS DIGITAIS; ENERGIA EÓLICA OFFSHORE; BIM; FEA; CFD.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescente foco na sustentabilidade e o aumento da busca por fontes de energia renovável, o setor de energia eólica tem ganhado destaque e se tornado uma alternativa promissora para a geração de energia nas próximas décadas. De acordo com Santiso *et al.* (2023), esse impulso é alavancado pela redução de custos que é influenciada por diversos fatores. O aumento da capacidade das turbinas eólicas, melhoria técnica de instalação e a experiência adquirida ao longo do tempo vêm tornando a indústria eólica um processo mais barato e viável economicamente.

Como uma das principais apostas de geração de energia elétrica, os parques *onshore*, localizados em áreas terrestres, irão produzir, aproximadamente, 5000 gigawatts no ano de 2050 segundo a agência internacional de energia renovável (IRENA, 2019). Isso representa um volume de produção aproximadamente 10 vezes maior que o valor de energia instalado em parques eólicos *onshore* já instalados em 2018 como mostrado na Figura 1.

FIGURA 1- Capacidade instalada cumulativa da energia eólica terrestre crescerá mais de três vezes até 2023 e quase 10 vezes até 2050.



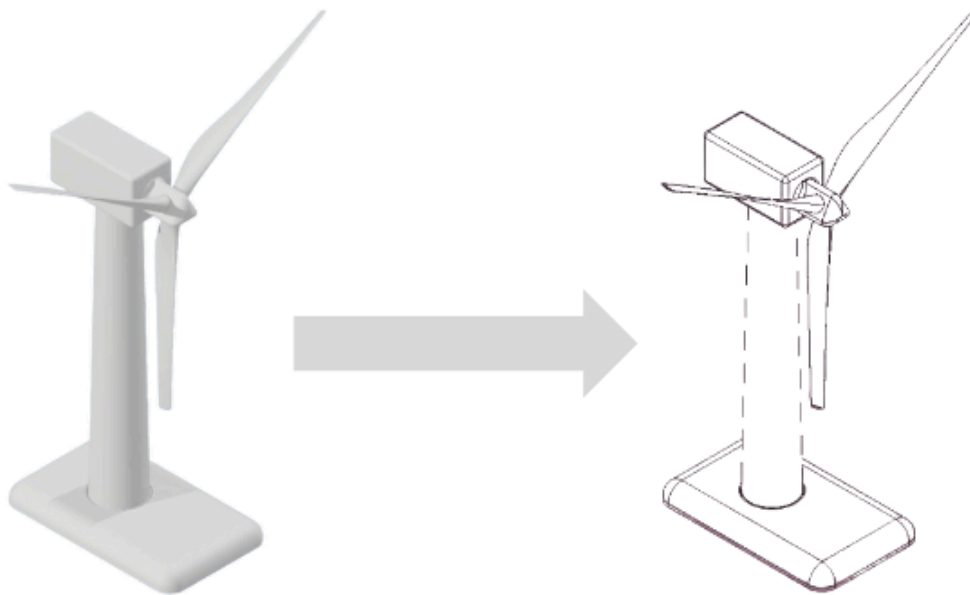
Fonte: IRENA (2019).

Os parques localizados em área marítima, oferecem vantagens significativas em comparação aos parques terrestres, como maior quantidade de vento assim como a ventos mais consistentes. Apesar de apresentarem melhores condições de geração, os parques eólicos offshore apresentam desafios com complexidade maior que os instalados em terras que

exigem soluções inovadoras e eficientes.

Com os desafios impostos pela transição energética e a necessidade de aumento de eficiências dos novos parques eólicos, novas tecnologias estão sendo empregadas a partir da indústria inteligente. Uma dessas tecnologias é o gêmeo digital, que consiste em replicar digitalmente um sistema físico em tempo real como detalhado na Figura 2, oferecendo oportunidades de monitoramento contínuo, podendo ser remotamente executado, além de realizar diagnósticos de falhas e otimização do desempenho ao longo de toda vida útil do projeto (Li; Lei; Mao, 2022).

FIGURA 2- Criação de um aerogerador físico e seu gêmeo digital, permitindo simulações e monitoramento em tempo real para otimização de desempenho.



Fonte: Elaboração própria (2024).

A simulação computacional é uma ferramenta essencial na engenharia moderna, permitindo a análise de sistemas complexos antes da implementação física. Segundo Li *et al.* (2024), a simulação oferece benefícios como a redução de custos e riscos, além de um ambiente controlado para experimentação. Ela permite antecipar problemas, otimizar *designs* e melhorar a eficiência dos sistemas eólicos *offshore*. A capacidade de prever o comportamento futuro dos componentes físicos por meio de simulações facilita a tomada de decisões e testes de ações específicas. Plataformas de gêmeos digitais dedicadas simplificam a criação e o uso de gêmeos digitais para manutenção preditiva, monitoramento e otimização operacional, contribuindo para a sustentabilidade econômica (Wiens *et al.*, 2024).

Com o auxílio de ferramentas como os gêmeos digitais e a utilização de *softwares* de simulação computacional, ferramentas poderosas para enfrentar desafios impostos pela indústria eólica *offshore*, os engenheiros poderão avaliar cenários complexos, otimizando designs e prevendo o desempenho dos sistemas em tempo real. Este artigo busca explorar em detalhes a aplicação de ferramentas de simulação com princípios de gêmeos digitais em parques eólicos *offshore*. Além disso, busca examinar a importância da simulação na garantia de eficácia, segurança e sustentabilidade desses projetos, destacando como ela permite avaliar diferentes cenários, reduzindo custo e tempo de desenvolvimento de projetos.

Além disso, foram analisadas as principais ferramentas de simulação utilizadas em parques eólicos *offshore*, como a simulação numérica de fluidos (CFD) para modelar o comportamento do vento e das estruturas, a simulação de ondas e correntes para avaliar os impactos ambientais, a simulação estrutural (FEA) para garantir a segurança das fundações e torres, e a Modelagem de Informações da Construção (BIM) para integração e gestão de informações durante todo o ciclo de vida do projeto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O conceito de "gêmeos" remonta ao programa Apollo da NASA, onde foram construídos pelo menos dois veículos espaciais idênticos para replicar as condições do veículo durante a missão (Rosen *et al.*, 2015). Um desses veículos permanecia na Terra e era utilizado para treinamento e preparação de voo, permitindo simular e resolver problemas que poderiam surgir durante a missão real.

Além disso, inicialmente, os gêmeos digitais não receberam muita atenção. No entanto, em 2011, abriram-se novas oportunidades com o conceito de gêmeos digitais. Foi nesse ano que o Laboratório de Pesquisa da Força Aérea dos Estados Unidos (AFRL) propôs um gêmeo digital para a manutenção e previsão de vida de aeronaves em ambientes de serviço complexos (Zhang; Liu; Zhuang, 2024).

Nesse sentido, a tecnologia de gêmeos digitais encontrou aplicações generalizadas em diversos setores, incluindo aeroespacial, automotivo, saúde, manufatura e cidades inteligentes. As aplicações pioneiras são observadas nas espaçonaves da NASA e nos caças a jato da Força Aérea dos EUA (Chen *et al.*, 2024). Grandes fornecedores como Siemens, PTC e Dassault Systèmes incorporaram os conceitos de gêmeos digitais em seus sistemas de PLM. Além disso, o modelo de gêmeos digitais também foi proposto para apoiar a implementação resiliente da Internet das Coisas (IoT) como ilustrado na Figura 3.

FIGURA 3 - Esquema de representação dos ciclos de um gêmeo digital com a utilização de IoT, destacando a interação contínua entre o mundo físico e digital para otimização e monitoramento em tempo real.

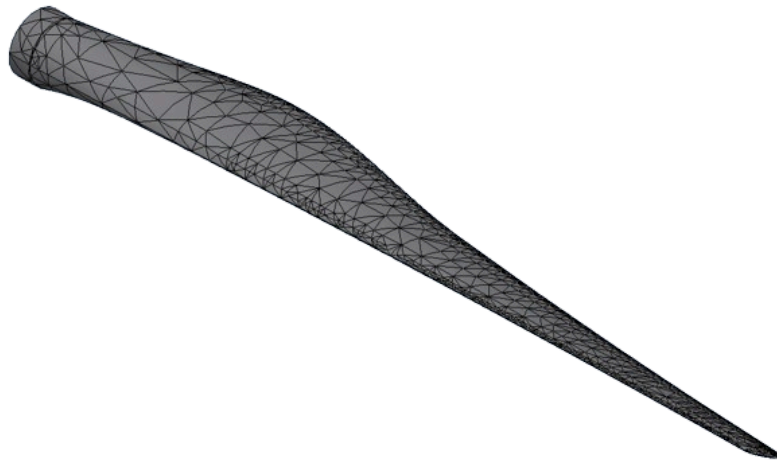


Fonte: Elaboração própria (2024).

2.1 Análise de Elementos Finitos

A Análise de Elementos Finitos (FEA) desempenha um papel crucial na avaliação estrutural de turbinas eólicas em parques *offshore*. Esta técnica permite modelar virtualmente componentes complexos, como pás e estruturas de suporte das turbinas, dividindo-os em pequenos elementos (Figura 4) para uma análise detalhada de como cada parte responde às condições variáveis de carga (Tao *et al.*, 2022).

FIGURA 4 - Malha de Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma pá de turbina eólica, utilizada para estudar a distribuição de tensões e a resposta estrutural.



Fonte: Elaboração própria (2024).

No contexto *offshore*, a FEA é essencial para otimizar o design das turbinas eólicas, considerando fatores como ventos extremos e ondas intensas. Isso inclui a avaliação da resistência à fadiga e da durabilidade dos materiais em condições ambientais adversas (Menasri *et al.*, 2023).

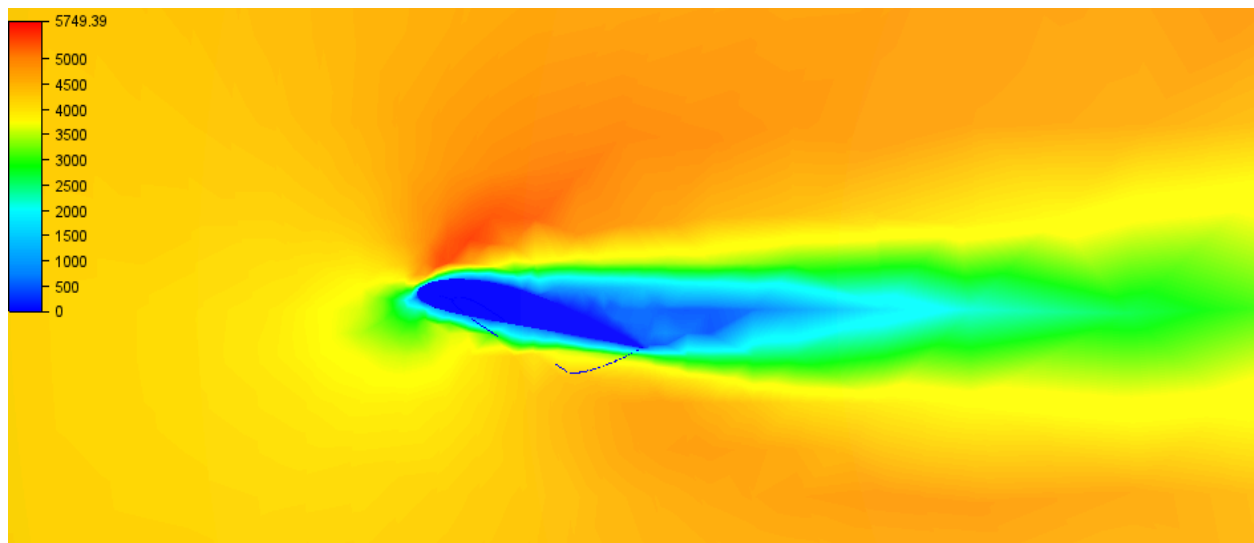
Alguns *softwares* de simulação se destacam em diferentes indústrias e aplicações. O ANSYS é um *software* versátil, amplamente utilizado para simulações estruturais, térmicas, de fluidos, eletromagnéticas e multifísicas. O Abaqus se sobressai por sua modelagem avançada, especialmente em cenários não lineares e dinâmicos, sendo muito empregado em pesquisas, no setor automotivo, aeroespacial e biomecânico. O SolidWorks Simulation, integrado ao CAD SolidWorks, facilita análises estruturais, térmicas e de fluidos diretamente no processo de *design*. Já o Autodesk Inventor Nastran oferece funcionalidades de Análise de Elementos Finitos (FEA) dentro do ambiente CAD Autodesk Inventor, possibilitando análises estruturais e simulações dinâmicas.

2.1 Dinâmica dos Fluidos Computacional

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) desempenha um papel crucial na otimização do *layout* e na maximização da eficiência energética dos parques eólicos. Utilizando CFD, os engenheiros podem simular como o vento interage com as turbinas eólicas, modelando a velocidade, direção do vento e fenômenos aerodinâmicos complexos

Menasri *et al.*, 2023).

FIGURA 5 - Análise de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) de uma pá de turbina eólica, mostrando a distribuição da velocidade do vento e as características aerodinâmicas.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Essas simulações permitem ajustes precisos na disposição das turbinas, garantindo a captura máxima da energia eólica disponível. Além disso, a CFD é fundamental para prever o desempenho das turbinas sob condições climáticas adversas, contribuindo para a operação segura e eficiente dos parques eólicos *offshore* (Wang *et al.*, 2021).

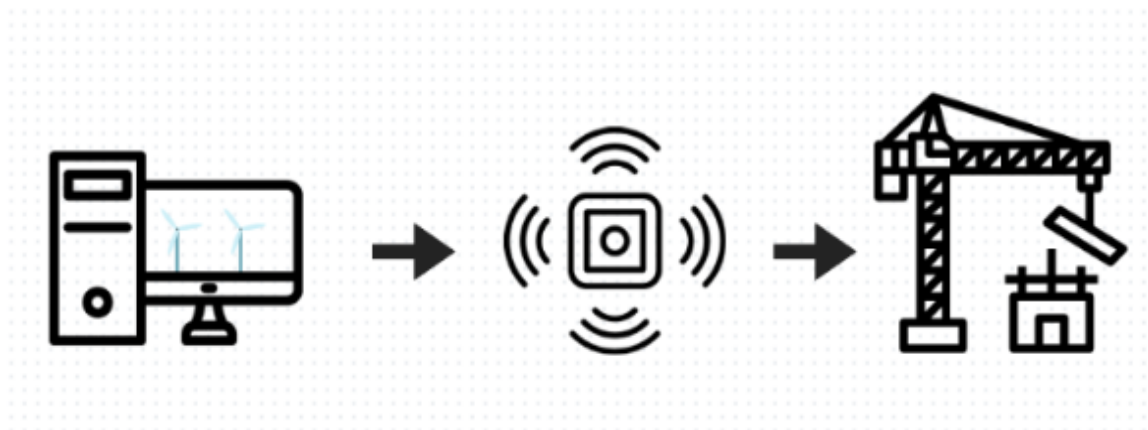
Alguns *softwares* são fundamentais para simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). O ANSYS Fluent é reconhecido por sua avançada modelagem de fluxo de fluidos e transferência de calor. O OpenFOAM, de código aberto, oferece flexibilidade e personalização para simulações complexas de fluidos. O STAR-CCM+, da Siemens, se destaca por suas capacidades multifísicas e simulações em larga escala. O COMSOL Multiphysics proporciona análises detalhadas de fluxo de fluidos e fenômenos acoplados. Por fim, o Autodesk CFD, integrado ao portfólio da Autodesk, é ideal para simulações precisas de fluxo de fluidos e análise térmica.

2.3 Modelagem de Informações da Construção

A Modelagem de Informações da Construção (BIM) (ISO 2021) emerge como uma fonte de verdade crucial durante as fases de projeto e construção de edifícios. Facilitando a colaboração entre profissionais de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), o BIM se

tornou amplamente difundido nas últimas décadas, proporcionando uma plataforma integrada para o desenvolvimento de projetos. Segundo Céspedes-Cubides e Jradi (2024), o BIM oferece uma abordagem colaborativa e integrada que melhora a eficiência e a precisão durante todas as fases do ciclo de vida de um projeto (Figura 6).

FIGURA 6 - Fases do *Building Information Modeling* (BIM), destacando o modelo digital, o envio de dados e a construção, ilustrando o ciclo completo de um projeto desde a concepção até a execução.



Fonte: Elaboração própria (2024).

A tecnologia BIM é principalmente empregada para aprimorar a eficiência nos processos de projeto e construção arquitetônicos, especialmente durante os estágios iniciais do ciclo de vida de um edifício. Em contrapartida, o Gêmeo Digital (*Digital Twin*) foca no monitoramento de ativos físicos para otimizar a eficiência operacional e facilitar a manutenção preditiva (Wang *et al.*, 2024).

Além disso, diversos *softwares* BIM são amplamente utilizados na indústria. O Autodesk Revit é conhecido por sua capacidade de modelagem tridimensional precisa e integração com análises estruturais avançadas, facilitando a criação de projetos complexos de maneira eficiente. O Navisworks, por sua vez, é essencial para a coordenação e simulação de projetos, permitindo a detecção precoce de conflitos e problemas de construção. Já o ArchiCAD se destaca pela interface amigável e pela ênfase na colaboração multidisciplinar, possibilitando que equipes trabalhem de forma sincronizada em projetos de grande escala.

3. METODOLOGIA

Este estudo visa investigar os tipos de simulação utilizados em gêmeos digitais para parques eólicos, com foco em BIM (*Building Information Modeling*), FEA (*Finite Element Analysis*) e CFD (*Computational Fluid Dynamics*). A pesquisa foi baseada em uma revisão da literatura científica disponível no Scopus. O objetivo principal é entender como essas técnicas de simulação estão sendo aplicadas no contexto de parques eólicos e quais benefícios elas trazem para a eficiência e operação dessas instalações.

A pesquisa é de natureza descritiva e exploratória. É descritiva porque visa detalhar os métodos de simulação empregados em gêmeos digitais, fornecendo uma visão abrangente das práticas atuais. Ao mesmo tempo, é exploratória porque busca identificar tendências emergentes e inovações tecnológicas no campo da engenharia de parques eólicos, particularmente no uso de gêmeos digitais. Essa abordagem combinada permite uma compreensão mais profunda e contextualizada do tema.

Os dados foram coletados a partir de artigos científicos indexados na base de dados Scopus. Para isso, foram realizadas consultas específicas utilizando as palavras-chave "digital twin" AND "wind turbine" AND ("BIM" OR "FEA" OR "CFD"). Os artigos selecionados foram aqueles que apresentaram relevância direta para o tema em estudo. O processo de seleção incluirá a leitura dos resumos e, quando necessário, a análise completa dos artigos para garantir a pertinência dos dados coletados.

A população-alvo deste estudo incluiu todos os artigos científicos publicados sobre gêmeos digitais aplicados a turbinas eólicas nos últimos 4 anos. A amostra foi composta por artigos relevantes encontrados na consulta ao Scopus, garantindo uma base de dados robusta e representativa. Esta abordagem permitirá uma análise abrangente das diferentes aplicações e métodos de simulação utilizados na criação e manutenção de gêmeos digitais em parques eólicos.

A análise de dados foi realizada utilizando técnicas de análise de conteúdo qualitativa. Essa análise visa identificar e categorizar os tipos de simulação (BIM, FEA, CFD) descritos nos artigos e determinar para quais aplicações específicas cada ferramenta de simulação foi utilizada.

Para facilitar a análise dos dados coletados, foi criada uma tabela que organiza as informações dos artigos selecionados de forma sistemática. Esta tabela inclui colunas que detalham o título do artigo, os autores, o ano de publicação, as técnicas de simulação utilizadas (BIM, FEA, CFD) e as aplicações específicas para cada método no contexto de

parques eólicos. A utilização dessa tabela permite uma visualização clara e estruturada dos dados, auxiliando na identificação de padrões e tendências emergentes. Além disso, a tabela facilita a comparação entre diferentes estudos, destacando as inovações tecnológicas e práticas mais eficazes na aplicação de gêmeos digitais para a melhoria da eficiência e operação das turbinas eólicas.

A estrutura tabular dos dados também serve como uma ferramenta prática para sintetizar os resultados da pesquisa de maneira clara e eficiente. Essa abordagem facilita a comparação entre diferentes estudos, destacando as inovações tecnológicas e as práticas mais eficazes na aplicação de gêmeos digitais para a melhoria da eficiência e operação das turbinas eólicas. Isso contribui para a construção de uma base de conhecimento sólida e abrangente, essencial para uma compreensão aprofundada do uso de gêmeos digitais em parques eólicos e suas implicações práticas e tecnológicas.

4. RESULTADOS

A análise do Quadro 1 revela como diferentes métodos de simulação são aplicados em gêmeos digitais para turbinas eólicas, destacando suas respectivas contribuições e focos de pesquisa.

QUADRO 1 - Métodos de simulação aplicados em *digital twins*, destacando as diversas técnicas utilizadas para modelagem e monitoramento em tempo real.

Título	Fonte	Método utilizado	Foco
Um gêmeo digital para monitorar a construção de um parque eólico	(Ospina-Bohórquez <i>et al.</i> , 2023)	BIM	Propõe a criação de um DT para monitorar a construção de um parque eólico
Ferramentas digitais para turbinas eólicas <i>offshore</i> flutuantes (FOWT): um estado da arte	(Ciuriuc <i>et al.</i> , 2022)	BIM	Simplificar diferentes partes do desenvolvimento da usina eólica <i>offshore</i>
Projeto de reconstrução potencial de uma casa existente em Washington DC para se aproximar da meta de construção de energia líquida zero	(Kaewunruen <i>et al.</i> , 2019)	BIM	Modelar edifícios
Um gêmeo digital aerodinâmico da erosão de ponta do mundo real: Aquisição, Geração e CFD 3D	(Forsting <i>et al.</i> , 2024)	CFD	Análise do comportamento do fluido na aerodinâmica e na topografia
Distribuição do campo de fluxo e avaliação do desempenho da resistência estrutural de uma turbina eólica <i>offshore</i> fixa com base na tecnologia de gêmeo digital	(Cao <i>et al.</i> , 2023)	CFD	Análise comportamento do fluido na estrutura

Rumo ao gêmeo digital ambiental e estrutural da turbina eólica <i>offshore</i>	(Zhao; Dao; Le, 2023)	CFD	Análise de cargas dos ventos na estrutura da turbina eólica
Método de monitoramento em tempo real de gêmeo digital do desempenho das lâminas da turbina com base em simulação numérica	(Cao <i>et al.</i> , 2022)	CFD	Análise hidrodinâmica
Modelagem CFD de pás de turbinas eólicas com borda de ataque erodida	(Carraro <i>et al.</i> , 2022)	CFD	Comparação aerodinâmicas das pás
Abordagem baseada em gêmeos digitais para um projeto ótimo multiobjetivo de caixas de engrenagens de turbinas eólicas	(Llopis-Albert <i>et al.</i> , 2024)	FEA	Simulação de caixas de engrenagens WT com o objetivo de melhorar seu <i>design</i> , diagnóstico, operação e manutenção
Conexão digital de uma turbina eólica <i>offshore</i> em uma monopilha usando abordagem de modelagem de ordem reduzida	(Zhao; Dao; Le, 2023)	FEA	Fornecer previsões quase instantâneas dos modos e das Respostas da estrutura da turbina devido à carga
Validação de um método de simulação numérica totalmente integrado para avaliar a integridade estrutural em um modelo flexível de FOWT usando RB-FEA	(Knezevic <i>et al.</i> , 2022)	FEA	Análise de integridade estrutural de alta fidelidade para uma turbina eólica <i>offshore</i> flutuante (FOWT)
Modelo estrutural gêmeo digital multifidelidade para uma lâmina de rotor de turbina eólica a favor do vento em subescala	(Chetan <i>et al.</i> , 2021)	FEA	Um modelo estrutural gêmeo digital multifidelidade preciso para as propriedades geométricas, estruturais e dinâmicas estruturais da lâmina construída
Um gêmeo digital para avaliar a vida útil restante de estruturas de turbinas eólicas <i>offshore</i>	(Pacheco-Blázquez <i>et al.</i> , 2024)	FEA	Exploramos a implementação prática de gêmeos digitais e sua eficácia na otimização de operações e manutenção preditiva, com foco no controle do estado estrutural em tempo real de estruturas de turbinas eólicas compostas e na previsão da vida útil restante rastreando o estado de fadiga na estrutura

Fonte: Elaboração própria (2024).

O método BIM (*Building Information Modeling*) é amplamente utilizado para a criação de gêmeos digitais que monitoram a construção e operação de parques eólicos. O estudo de Ospina-Bohórquez *et al.* (2023) propõe especificamente a implementação de um gêmeo digital para supervisionar o processo de construção, enquanto Ciuriuc *et al.* (2022) simplifica partes do desenvolvimento de usinas eólicas *offshore* através da modelagem detalhada proporcionada pelo BIM. Essa abordagem visa melhorar a eficiência e a gestão de informações ao longo do ciclo de vida do projeto.

O método CFD (*Computational Fluid Dynamics*) é aplicado principalmente para analisar o comportamento do fluido ao redor das turbinas eólicas. Forsting *et al.* (2021) e Cao *et al.* (2023) exploram como o CFD pode otimizar o design aerodinâmico das turbinas e melhorar seu desempenho estrutural ao analisar a aerodinâmica e as cargas de vento. Essa

simulação é crucial para entender como as turbinas respondem às condições de vento e para melhorar sua eficiência energética.

Por outro lado, o FEA (*Finite Element Analysis*) concentra-se na análise da integridade estrutural das turbinas eólicas. Llopis-Albert *et al.* (2024) utiliza FEA para simular caixas de engrenagens, visando melhorar seu design, diagnóstico, operação e manutenção. Knezevic *et al.* (2023) válidas métodos de simulação para avaliar a integridade estrutural de turbinas eólicas *offshore* flutuantes (FOWT), essencial para garantir a segurança e eficiência das estruturas em ambientes marítimos desafiadores.

Em resumo, cada método de simulação desempenha um papel fundamental na modelagem avançada, na análise de desempenho e na otimização do *design* de turbinas eólicas através de gêmeos digitais. A combinação dessas tecnologias permite não apenas monitorar e prever o comportamento das turbinas em tempo real, mas também melhorar significativamente sua eficiência, durabilidade e sustentabilidade operacional.

5. CONCLUSÃO

Em conclusão, este artigo explorou profundamente o papel crucial das ferramentas de simulação baseadas em gêmeos digitais na criação e operação eficiente de parques eólicos *offshore*. A combinação de simulação numérica avançada, como Análise de Elementos Finitos (FEA), Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e Modelagem de Informação da Construção (BIM), oferece não apenas uma visão detalhada do desempenho das turbinas eólicas em tempo real, mas também possibilita a otimização contínua do design, a previsão de falhas e a melhoria da sustentabilidade operacional desses projetos.

As vantagens das simulações baseadas em gêmeos digitais são evidentes, permitindo aos engenheiros e planejadores enfrentarem desafios complexos com maior eficiência e precisão. Ao integrar dados em tempo real com modelos virtuais precisos, é possível não apenas aumentar a confiabilidade das turbinas eólicas *offshore*, mas também reduzir custos de desenvolvimento e operacionais ao longo de sua vida útil.

Embora haja desafios significativos, como a necessidade de dados precisos e a complexidade da modelagem em ambientes marítimos, as tendências indicam um futuro promissor com avanços contínuos em tecnologias de simulação e integração de gêmeos digitais. Espera-se que essas inovações não apenas impulsionam a eficiência energética, mas também contribuam para um setor de energia mais sustentável e resiliente nas próximas décadas futuras.

Portanto, investir em ferramentas de simulação baseadas em gêmeos digitais não é apenas uma escolha estratégica, mas uma necessidade para os *stakeholders* no setor de energia eólica *offshore*, garantindo um desenvolvimento mais rápido, seguro e eficiente desses projetos essenciais para o futuro energético global.

REFERÊNCIAS

- ANGELOVA, D. D. et al. A Review on Digital Twins and Its Application in the Modeling of Photovoltaic Installations. **Energies**, v. 17, n. 5, p. 1227, 1 jan. 2024.
- CAI, Y. et al. Effect of combined surge and pitch motion on the aerodynamic performance of floating offshore wind turbine. *Ocean engineering*, v. 306, p. 118061–118061, 1 ago. 2024.
- CAO, Wanlin; ZHOU, Lei. Resilient microgrid modeling in Digital Twin considering demand response and landscape design of renewable energy. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 64, p. 103628, 2024.
- CAO, Yu et al. Flow field distribution and structural strength performance evaluation of fixed offshore wind turbine based on digital twin technology. **Ocean Engineering**, v. 288, p. 116156, 2023.
- CAO, Yu et al. Método de monitoramento em tempo real de gêmeo digital do desempenho de lâminas de turbina com base em simulação numérica. **Ocean Engineering**, v. 263, p. 112347, 2022.
- CARRARO, Michael et al. Modelagem CFD de pás de turbinas eólicas com borda de ataque erodida. **Fluids**, v. 7, n. 9, p. 302, 2022.
- CESPEDES-CUBIDES, Andres Sebastian; JRADI, Muhyiddine. Uma revisão de gêmeos digitais de construção para melhorar a eficiência energética no estágio operacional da construção. **Energy Informatics**, v. 7, n. 1, p. 11, 2024.
- CHEN, Bai-Qiao et al. Enhancing Reliability in Floating Offshore Wind Turbines through Digital Twin Technology: A Comprehensive Review. **Energies**, v. 17, n. 8, p. 1964, 2024.
- CHETAN, Mayank; YAO, Shulong; GRIFFITH, D. Todd. Modelo estrutural gêmeo digital multifidelidade para uma lâmina de rotor de turbina eólica a favor do vento em subescala. **Wind Energy**, v. 24, n. 12, p. 1368-1387, 2021.
- CIURIUC, Alexandra et al. Ferramentas digitais para turbinas eólicas offshore flutuantes (FOWT): Um estado da arte. **Energy Reports**, v. 8, p. 1207-1228, 2022.
- FORSTING, A. Meyer et al. Um gêmeo digital aerodinâmico da erosão de ponta do mundo real: Aquisição, Geração e CFD 3D. Em: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2024. p. 022021.
- GRIEVES, Michael W. Gestão do ciclo de vida do produto: o novo paradigma para empresas. **International Journal of Product Development**, v. 2, n. 1-2, p. 71-84, 2005.
- HAGHSHENAS, A. et al. Predictive digital twin for offshore wind farms. **Energy Informatics**, v. 6, n. 1, 25 jan. 2023.

HASAN, A. et al. An Interactive Gemeos digitais Platform for Offshore Wind Farms' Development. p. 269–281, 1 jan. 2023.

IRENA. Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper). Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019.

KAEWUNRUEN, Sakdirat; SRESAKOOLCHAI, Jessada; KERINNONTA, Lalida. Projeto de reconstrução potencial de um sobrado existente em Washington DC para se aproximar da meta de construção de energia líquida zero. **Sustainability**, v. 11, n. 23, p. 6631, 2019.

KATSOUidakis, Evangelia et al. Digital twins for health: a scoping review. **NPJ Digital Medicine**, v. 7, n. 1, p. 77, 2024.

KNEZEVIC, David et al. Validação de um método de simulação numérica totalmente integrado para avaliar a integridade estrutural em um modelo flexível de FOWT usando RB-FEA. Em: **International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos, 2022. p. V001T01A021.

LI, Lianhui; LEI, Bingbing; MAO, Chunlei. Gêmeo digital na manufatura inteligente. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 26, p. 100289, 2022.

LI, Weichao et al. Tecnologia de controle de segurança de frequência para armazenamento eólico simulado em rede elétrica integrada. **Electronics**, v. 13, n. 5, p. 861, 2024.

LI, Xiaofei et al. A novel data-driven reduced-order model for the real-time prediction of gas-solid heat transfer in fluidized beds. **Applied Thermal Engineering**, p. 123670, 2024.

LLOPIS-ALBERT, Carlos et al. Abordagem baseada em gêmeos digitais para um projeto ótimo multiobjetivo de caixas de engrenagens de turbinas eólicas. **Matemática**, v. 12, n. 9, p. 1383, 2024.

MOHSENI, M.; C. GUEDES SOARES. CFD analysis of wave loading on a 10 MW TLP-type offshore floating wind turbine in regular waves. *Ocean engineering*, v. 301, p. 117540–117540, 1 jun. 2024.

NOUREDDINE MENASRI et al. 3D CFD model for the analysis of the flow field through a horizontal axis wind turbine (HAWT). *Acta Polytechnica*, v. 63, n. 4, 5 set. 2023.

OSPINA-BOHÓRQUEZ, Alejandra et al. Um gêmeo digital para monitorar a construção de um parque eólico. **Infrastructures**, v. 8, n. 1, p. 10, 2023.

PACHECO-BLAZQUEZ, Rafael et al. Um gêmeo digital para avaliar a vida útil restante de estruturas de turbinas eólicas offshore. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 12, n. 4, p. 573, 2024.

ROSEN, Roland et al. Sobre a importância da autonomia e dos gêmeos digitais para o futuro da manufatura. **Ifac-papersonline**, v. 48, n. 3, p. 567-572, 2015.

SANTISO, Andressa et al. Fatores que influenciam na redução de custos na indústria eólica offshore: o caso no Reino Unido. In: *Brazil Windpower Papers*, 2023.

TAO, Fei et al. Modelagem de gêmeos digitais. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 64, p. 372-389, 2022.

WANG, Mengmeng et al. Progresso recente na análise de confiabilidade de estruturas de suporte de turbinas eólicas offshore considerando soluções de gêmeos digitais. **Ocean Engineering**, v. 232, p. 109168, 2021.

WANG, Wanting et al. De BIM para gêmeo digital em BIPV: Uma revisão do conhecimento atual. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 67, p. 103855, 2024.

WIENS, Marcus et al. DigiWind - Uma estrutura de gêmeo digital de código aberto para sistemas de energia eólica. **IEEE Access**, 2024.

ZHANG, Lei; LIU, Jianhua; ZHUANG, Cunbo. Digital Twin Modeling Enabled Machine Tool Intelligence: A Review. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 37, n. 1, p. 47, 2024.

ZHAO, Xiang; DAO, My Ha; LE, Quang Tuyen. Digital twining de uma turbina eólica offshore em uma monopilha usando abordagem de modelagem de ordem reduzida. **Renewable Energy**, v. 206, p. 531-551, 2023.

ZHAO, Xiang; DAO, My Ha; LE, Quang Tuyen. Rumo ao gêmeo digital ambiental e estrutural da turbina eólica offshore. Em: **Conferência Internacional sobre Mecânica Offshore e Engenharia Ártica**. Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos, 2023. p. V007T08A010.