

## TECNOLOGIA DO GÊMEO DIGITAL APLICADO À MANUTENÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE

Letícia Soares<sup>1</sup>, Mario González<sup>2</sup>, Luis Aguirre<sup>3</sup>, Rafael Vasconcelos<sup>4</sup>, Luana Nogueira<sup>5</sup>

1, 2, 3, 4 e 5 Creation – Grupo de pesquisa em Inovação de Produtos e Processos para Energias  
Renováveis/Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção/UFRN

leticia.soares.096@ufrn.edu.br; mario.gonzalez@ufrn.br; luis.aguirre.398@ufrn.br;  
rafael.monteiro.050@ufrn.br; luanapereiranog@gmail.com

### RESUMO

O Gêmeo Digital (Digital Twin - DT) é um modelo virtual que ao ser combinado com entidades físicas pode ser utilizado no monitoramento e otimização da operação e manutenção das turbinas eólicas. O objetivo do artigo é identificar o estado da arte sobre a aplicação do gêmeo digital na manutenção de turbinas eólicas offshore. A base teórica abordou temas referentes à manutenção de turbinas eólica e gêmeo digital. O método de pesquisa utilizada foi uma revisão bibliográfica sistemática (RBS), descrevendo dados sobre os artigos analisados e apresentando perspectivas de pesquisas futuras. O tema é relevante uma vez que permite o melhor planejamento das atividades de operação e manutenção (O&M) das turbinas eólicas, sendo essas cruciais para o funcionamento das turbinas e, conseqüentemente, para a redução de custos dos parques eólicos. Foram analisados 54 artigos que relacionam o tema, no período de 2007 até 2023. Para análise foram extraídas informações específicas de cada artigo e analisadas em conjunto, a fim de obter resultados importantes com o uso de diagramas de afinidade. Como resultado, percebeu-se um número pequeno de artigos relacionados à manutenção de turbinas eólicas offshore usando o gêmeo digital. Essa consideração é feita com base na amostra analisada, expondo essa lacuna da literatura. Também, a quantidade de publicações de artigos, quando analisados por países está correlacionado com a capacidade instalada dos parques eólicos offshore. Por exemplo, o Reino Unido, a China e a Dinamarca que possuem as maiores capacidades instaladas de energia eólica offshore no mundo, também possuem maior número de publicações no tema, o que nos leva a concluir a relevância da aplicação do Gêmeo Digital nas usinas eólicas offshore.

### Palavras-chaves:

Turbina eólica offshore; Manutenção; Digital twin; Revisão bibliográfica sistemática

### ABSTRACT

The Digital Twin (DT) is a virtual model that when combined with physical entities can be used in monitoring and optimizing the operation and maintenance of wind turbines. The objective of this paper is to identify the state of the art on the application of the digital twin in the maintenance of offshore wind turbines. The theoretical background covered topics concerning wind turbine maintenance and digital twin. The research method used was a systematic literature review (SBR), describing data on the articles analyzed and presenting perspectives for future research. The topic is relevant since it allows for better planning of operation and maintenance (O&M) activities of wind turbines, these being crucial for the operation of the

turbines and, consequently, for reducing the costs of wind farms. We analyzed 54 articles that relate to the topic, in the period from 2007 to 2023. For analysis, specific information was extracted from each article and analyzed together, in order to obtain important results with the use of affinity diagrams. As a result, a small number of articles related to offshore wind turbine maintenance using the digital twin was noticed. This consideration is made based on the sample analyzed, exposing this gap in the literature. Also, the amount of article publications, when analyzed by countries is correlated with the installed capacity of offshore wind farms. For example, the United Kingdom, China and Denmark which have the largest installed capacities of offshore wind power in the world, also have a higher number of publications on the topic, which leads us to conclude the relevance of the application of the Digital Twin in offshore wind power plants.

**Keywords:**

Offshore wind turbine. Maintenance; Digital twin; Bibliographic review

**1. INTRODUÇÃO**

A demanda por energia renovável teve um aumento significativo nos últimos anos. Nesse contexto, a energia eólica é uma das fontes, a qual se enquadra nos requisitos de energia renovável, uma vez que o vento, seu principal recurso, é inesgotável, e seu processo de geração não envolve combustão. A energia eólica tem duas subdivisões que se referem ao ambiente onde seus parques estão instalados, sendo elas *onshore* e *offshore*. Na eólica *onshore*, os parques são localizados em terra, já na eólica *offshore*, as usinas são localizadas em diversos pontos do ambiente marítimo (VAICBERG; VALIATT; QUEIROZ, 202; GONZÁLEZ *et al.*, 2021).

Quando comparadas, a energia eólica *offshore*, apresenta várias restrições que influenciam na instalação dos parques, tais como a capacidade de transporte, os equipamentos de instalação e as dimensões das turbinas (GUO; WANG; LIAN, 2022). Além disso, os percalços do ambiente marinho e a variação constante das mudanças climáticas, reduzem os níveis de confiabilidade no sistema, a qual é avaliada entre 60% e 70% para parques eólicos *offshore* (SHAFIEE, 2015), o que ressalta a importância da operação e manutenção (O&M) nesses parques.

Nesse contexto, os custos de O&M são fatores importantes e cruciais, uma vez que, de acordo com Ortegon, Nies e Sutherland (2013), esses custos são partes consideráveis do custo total do ciclo de vida de um parque eólico *offshore*. Os mesmos autores exemplificam que, para uma turbina com vida útil de 20 anos, esses custos variam entre 20% e 35% do custo de geração de energia ao longo da vida. Dessa forma, é importante que, para tornar a energia eólica *offshore* competitiva, em termos de custos, os índices de confiabilidade, disponibilidade e O&M sejam melhorados (SHAFIEE, 2015).

Para que isso aconteça, é necessário ter ferramentas que possibilitem o monitoramento em tempo real dos componentes a serem analisados. Assim, surge o *digital twin* – gêmeo digital (DT), uma tecnologia recente, advinda dos avanços tecnológicos, a qual Boschert *et al.* (2016) definem o gêmeo digital como um método para descrever as características – físicas e funcionais – de um componente, contendo informações que podem ser úteis ao longo do seu ciclo de vida. No mesmo sentido, Fuller *et al.* (2020) reiteram que o DT é uma integração de dados entre máquinas físicas e virtuais. Portanto, o gêmeo digital auxilia na previsibilidade, controle e monitoramento de bens físicos, por meio de dados e simulações, e pode ser aplicado em setores econômicos, incluindo o de energia (HAGHSHENAS, 2022).

Por ser uma tecnologia recente, e ainda pouco utilizada na área de energia eólica *offshore*, faz-se necessário uma pesquisa aprofundada sobre os temas correlacionados. Por isso, o objetivo do artigo identificar o estado da arte sobre a aplicação do gêmeo digital na manutenção de turbinas eólicas *offshore*, por intermédio de uma revisão bibliográfica sistemática (RBS), buscando identificar as principais aplicações dessa tecnologia na energia eólica *offshore* e as perspectivas de pesquisas futuras.

A estrutura do artigo se dá inicialmente pela introdução e contextualização do tema, seguido do método de pesquisa, onde são explanados os procedimentos utilizados. Em seguida, a descrição e análise dos artigos selecionados, e, por fim, as conclusões.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Manutenção em turbinas eólicas *offshore*

A indústria de energia eólica está em constante desenvolvimento, sendo uma das opções renováveis em evidência atualmente. Dessa forma, é importante que o funcionamento de seus parques seja conforme o esperado, com o menor número de falhas e inatividade possível, sendo, a manutenção, essencial para garantir o funcionamento e eficiência das turbinas eólicas. No entanto, pelo sistema de energia eólica *offshore* ser localizado distante da costa, o custo de manutenção é elevado (KERRES; FISCHER; MADLENER, 2015).

De acordo com Ren *et. al.*, (2021), as atividades relacionadas a manutenção das OWTs são críticas, visto que a distância entre a costa e o parque eólico *offshore* dificulta o acesso, a organização da equipe de manutenção, incluindo transportes, é dispendiosa, a complexidade da manutenção é alta, devido aos vários tipos de fundação, e as condições meteorológicas atreladas a altura das turbinas, dificulta a execução das atividades.

Além das dificuldades mencionadas anteriormente, os custos devem ser considerados. O custo nivelado de energia (LCOE) representa o preço médio da eletricidade gerada por determinada fonte de energia. No caso da energia eólica, os custos de manutenção têm uma parcela significativa do LCOE, a qual representa 23% do custo total do investimento (REN *et al.*, 2021). Nesse contexto, os custos de manutenção não são somente relacionados a reposição de peças e reparos, mas também, os custos relacionados a inatividade da turbina, sendo assim, a não produção de energia (SCHEU *et al.*, 2012).

Dessa forma, é importante que haja um plano de manutenção para que o nível de confiabilidade do sistema seja alto, mas com um custo mínimo. Apesar disso, existe um paradigma, uma vez que se forem realizadas poucas manutenções, a taxa de falhas aumenta e o nível de confiabilidade diminui. Em contrapartida, se as manutenções forem realizadas frequentemente, o nível de confiabilidade aumenta, porém, os custos de manutenção se tornam acima do esperado (NGUYEN; CHOU, 2018).

Para a efetivação das atividades de manutenção, existem três tipos de manutenção que são utilizadas nos parques eólicos *offshore*: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção baseada na condição (NGUYEN; CHOU, 2018).

### 2.2 Gêmeo digital

O avanço tecnológico dos últimos anos e o desenvolvimento de áreas como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e Indústria 4.0, favoreceram a digitalização dos processos e sistemas nos diversos segmentos do mercado (MABKHOT *et al.*, 2018). Consoante ao avanço tecnológico, ocorreu a crescente evolução da energia eólica em várias partes do mundo, a qual comporta o interesse de aplicações dessas tecnologias, incluindo o DT (OLATUNJI *et al.*, 2021).

Apesar de ser uma tecnologia usada com mais frequência nos últimos anos, os primeiros registros da proposição desse conceito aconteceram no ano de 2003, quando o Dr. Michael Grieves declarou que o DT é um modelo virtual que possibilita a combinação com entidades físicas (GRIEVES, 2005). Posteriormente, em 2010, a NASA realizou uma pesquisa sobre o tema, implantando o DT para detecção de falhas em uma aeronave, consolidando, assim, a utilização do DT (GOCKEL *et al.*, 2012).

Na literatura não existe ainda um consenso quanto à definição do conceito de DT. Para Glaessgen e Stargel (2012), o DT utiliza dados de ativos físicos, sensores, indicadores e histórico, e os integra em simulações matemáticas, reduzindo o tempo e projetando um ativo físico em um modelo virtual. Além disso, também pode ser definido como uma integração mútua entre as dimensões físicas e virtuais, onde uma mudança em uma das dimensões afeta a outra, e vice-versa (Rosen *et al.*, 2015; Kritzinger *et al.*, 2018). Nesse contexto, Wang *et al.* (2021), reforçam que a utilização de dados funcionais de um ativo físico, permite integrá-los em uma simulação multidisciplinar, assim, estabelecendo um modelo virtual, sendo este o espelho do sistema original.

Desta forma, Glaessgen e Stargel (2012) e Qi e Tao (2018) sugeriram que um DT é composto por três partes: entidade física, modelo virtual e sistema de conexão. Tao *et al.* (2018) acrescenta a essas, mais duas partes: banco de dados e sistema de serviço. Assim, para construir um DT é necessário realizar a modelagem, fusão de dados, interação e colaboração de dados e serviços, totalizando assim, quatro etapas (Wang *et al.* 2021).

### 3. MÉTODO DO ESTUDO

A pesquisa é classificada como teórica, uma vez que seu objetivo é realizar uma revisão bibliográfica sistemática, a qual permite a realização de uma análise metódica acerca dos artigos selecionados sobre o tema de estudo, e, também, um detalhamento sobre um estudo de caso de implantação de um DT. Denyer e Tranfield (2009) e González e Toledo (2012) definem a RBS como um método que identifica estudos relevantes sobre determinados temas, seleciona e avalia esses estudos, de forma a permitir a análise e síntese de dados, resultando em conclusões compreensíveis.

Além disso, a pesquisa considerada exploratória com abordagem mista, visto que o levantamento bibliográfico permite tanto a análise quantitativa de dados, como também a análise qualitativa dos conceitos e definições. Para análise e argumentação foi utilizado o método indutivo, já que a partir da sistematização e análise das informações, é possível depreender conclusões sobre o tema.

A pesquisa foi desenvolvida em cinco etapas. A primeira consistiu na definição das palavras-chaves sobre o tema, sendo elas: *offshore wind turbines*, *digital twin* e *maintenance*. Na segunda etapa, a busca de artigos iniciou a partir das bases de dados do SCOPUS, Periódicos Capes, e também, no Google Acadêmico. Na base de dados do SCOPUS, foram utilizadas combinações das palavras-chave – *offshore*

*wind power AND maintenance, digital twin AND maintenance, digital twin AND offshore wind power, digital twin AND maintenance AND offshore wind power.* Com isso, as pesquisas resultaram em 1.151, 1.245, 28 e 12 documentos, respectivamente.

A terceira etapa consistiu na definição da amostra final a ser analisada. Para isso, foram aplicados quatro filtros de critérios de restrição – Área (*Energy*), Tipo de documento (*Article*), Fonte (*Journal*) e Idioma (*English*) – totalizando em 221, 48, 3 e 6, respectivamente. Em sequência, foram filtrados pelo título e resumo, e por último, pela leitura do artigo completo, restando 35, 7, 3 e 4, respectivamente, totalizando um número de 49 artigos. Junto a estes, foram adicionados 10 artigos selecionados no Google scholar, e excluídos 5, pois estavam duplicados. Assim, a amostra final foi de 54 artigos. A Tabela 3.1 apresenta essas informações.

Tabela 3.1 – *Step by step* para definição da amostra final

	<i>offshore wind power AND maintenance</i>	<i>digital twin AND maintenance</i>	<i>digital twin AND offshore wind power</i>	<i>digital twin AND maintenance AND offshore wind power</i>	Google scholar	Excluídos	TOTAL
<b>TOTAL</b>	<b>1.151</b>	<b>1.245</b>	<b>28</b>	<b>12</b>			
Área (Energia)	597	218	13	10			
Tipo de documento (Artigo)	267	66	3	8			
Fonte (Journal)	255	64	3	6			
Idioma (Inglês)	221	48	3	6	10	5	54
<b>TOTAL</b>	<b>221</b>	<b>48</b>	<b>3</b>	<b>6</b>			
Título e resumo	95	13	3	4			
Texto completo	35	7	3	4			
<b>TOTAL</b>	<b>35</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>4</b>			

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Após a exclusão de filtros e com a amostra final definida, deu-se início a quarta etapa, com a organização e sistematização das principais informações sobre os artigos. As informações extraídas foram título, autores, país, ano, tipo de estudo (método), abordagem, classificação (teórico ou prático), palavras-chaves e área de aplicação. Por fim, a quinta e última etapa consistiu na análise conjunta dos artigos, com a elaboração de gráficos, quadros, etc.

#### 4. ANÁLISE DE CASO DE UM DT DE UMA TURBINA EÓLICA

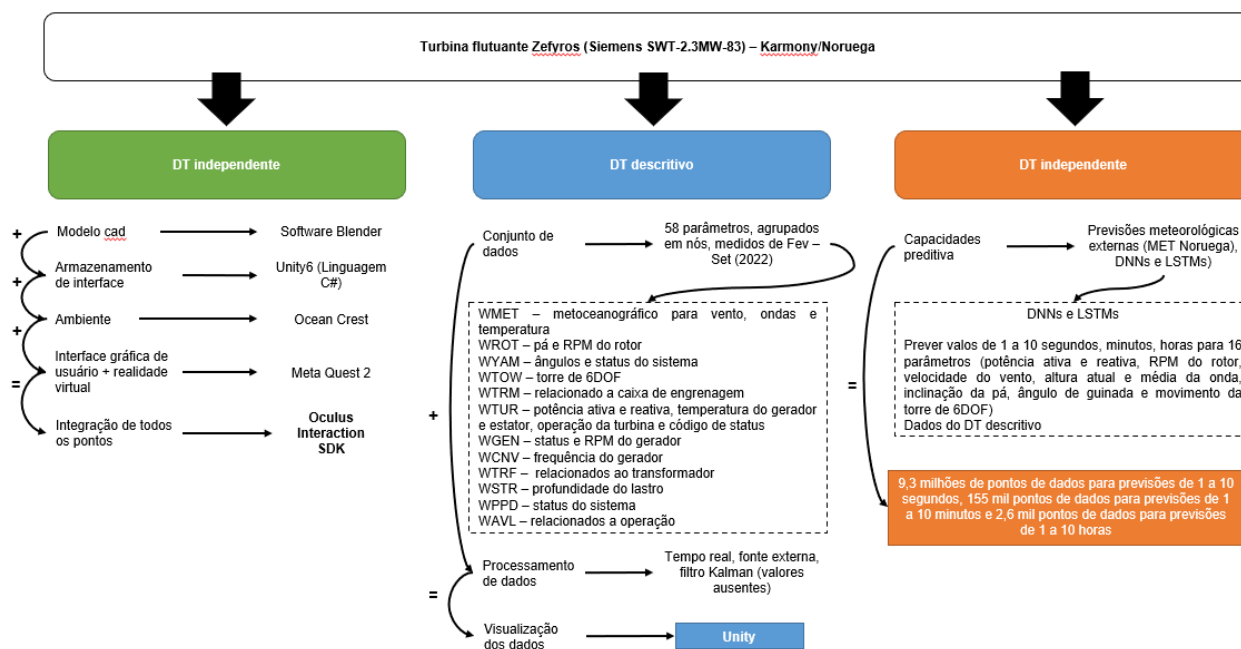
O estudo de caso analisado foi retirado do artigo “*Demonstration of a standalone, descriptive, and predictive digital twin of a floating offshore wind turbine*”, que explica o conceito de gêmeo digital e sua escala de capacidade a nível de energia eólica *offshore*, por meio da demonstração de gêmeos digitais autônomos, descritivos e prescritivos de uma turbina eólica flutuante. Essa nomenclatura é definida por

meio da escala, que vai de 0 a 5, onde 0: independente, 1: descritivo, 2: diagnóstico, 3: preditivo, 4: prescritivo e 5: autônomo.

O DT independente representa um ativo físico o qual não tem nenhuma conexão de dados em tempo real. O DT descritivo permite a inserção de dados em tempo real, com a utilização de sensores, possibilitando o detalhamento do funcionamento do ativo a qualquer momento. O DT de diagnóstico utiliza ferramentas de análise para notificar algum comportamento inesperado do ativo físico. O DT preditivo tem o objetivo de determinar o comportamento futuro do ativo, na função de apoiar a O&M. O DT prescritivo analisa situações hipotéticas, para fornecer recomendações que auxiliam às decisões. E, por fim, o DT autônomo é a substituição do recurso humano no processo, uma vez que os sistemas de controle podem evoluir, com a ajuda do DT, para torna-se totalmente autônomo em relação a O&M.

Os componentes do DT variam de acordo com cada um deles. Dessa forma, o DT independente é composto por um modelo 3D, software (motor de jogo), ambiente e a realidade virtual e aumentada. Já o DT descritivo necessita de um *checklist* ou *pipeline* de dados, para gerenciar o fluxo de informações, uma vez que esse DT é ativado a partir da inserção manual dos dados. O DT preditivo é formado por fontes externas de dados, modelos de programação e métodos para análises de dados. Dessa forma, a Figura 4.1 apresenta o detalhamento de informações para cada um dos tipos de DT implantados no estudo de caso.

Figura 4.1 – Detalhamento do estudo de caso



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Para o estudo de caso em questão foi construído um modelo 3D da turbina eólica flutuante, com o ambiente de oceano e céu para demonstrar um ambiente o mais realista possível. A interface gráfica do usuário permite que os parâmetros sejam ajustados e visualizados na turbina e seu ambiente.

Para o DT descritivo, foram instalados sensores que realizaram a medição de diversos parâmetros. Esses dados foram combinados com informações das previsões meteorológicas e puderam ser

visualizados em tempo real, o que resultou em uma interface de dados que possibilita a combinação e conexão de todas as fontes de dados para monitoramento e inspeção em tempo real.

Assim como no DT descritivo, o DT preditivo também utilizou as previsões meteorológicas. Essas previsões, unidas aos DNNs e LSTMs em dados históricos, forneceram previsões de curto e médio prazo de parâmetros específicos da turbina.

## 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos artigos foi realizada com base na amostra final de 54 artigos. Para isso, foram considerados os *Journals* em que foram publicados, os anos de publicação, o método utilizado, os países, as abordagens e as áreas de aplicação. Dessa forma, dentre os 54 artigos selecionados, foram encontrados 25 *Journals* que publicaram sobre o tema. Assim, os que mais se destacaram foram os *Energies* com 12,96%, *Renewable Energy* e *Wind Engineering* com 11,11% e *Wind Energy*, com 7,41%, ocupando as primeiras posições no *ranking* dos *Journals* que mais publicaram sobre o tema.

Nesse contexto, foi observado que o interesse sobre o *digital twin* na manutenção de turbinas eólicas *offshore*, teve início em 2007, data da primeira publicação correlacionando os temas. Em seguida, os anos de 2013 e 2016, mostram um aumento de publicações perante os outros anos analisados, tendo o maior número de publicações em 2022.

Para a classificação dos artigos, considerando o tipo de estudo (método) utilizada pelos autores no desenvolvimento dos referidos artigos, foram encontrados quatro tipos, sendo eles: Estudo de caso, Revisão de literatura, Simulação e Experimento, sendo o Estudo de caso a maior representação entre os quatro.

Quanto às abordagens identificadas no desenvolvimento dos artigos, a abordagem combinada teve o maior percentual, com 37,04%, seguido da abordagem quantitativa, com 35,18%, e, por último, a abordagem qualitativa, com 27,78%.

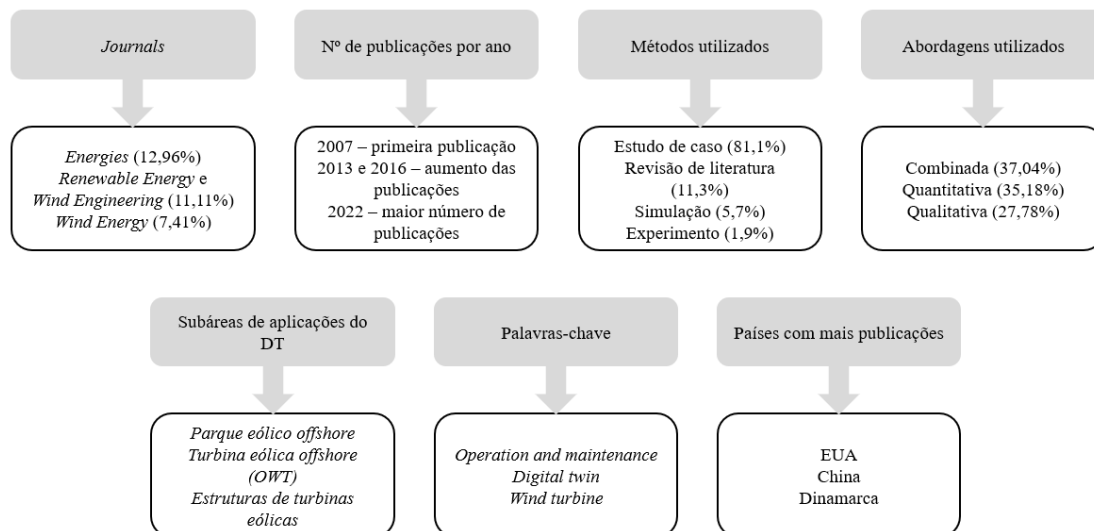
Com relação à localidade, dentre os 54 artigos publicados, foram identificados 14 países que tiveram maior número de publicações sobre os temas da pesquisa. O Reino Unido destacou-se com um número de 13 publicações, seguido da China, com 12, e da Dinamarca, com 7. Outros países, como Espanha, Noruega, Alemanha, e Estados Unidos e Suécia, tiveram 5, 4, 3 e 2 publicações, respectivamente. Os demais tiveram apenas uma publicação.

Por fim, foram identificadas dez subáreas de aplicação do gêmeo digital dentro do contexto eólico *offshore*. As principais subáreas são os parques eólicos *offshore*, com 40,74%, seguido das turbinas eólica *offshore*, com 35,19%, correspondendo ao primeiro e segundo lugar do *ranking*. É válido salientar que outras subáreas também foram identificadas, porém, com um percentual menor comparado às citadas anteriormente.

Uma análise que também deve ser considerada é com relação às palavras-chaves utilizadas nos artigos. Dessa forma, foi possível perceber que a área de O&M é a mais enfatizada na amostra de artigos, relacionando-se com outros termos relevantes, como o *digital twin*. As palavras-chaves que tiveram maior ênfase são termos que estão diretamente ligados ao tema da pesquisa. Além disso, outros termos também

foram listados, termos esses que estão ligados a aspectos específicos dos artigos. A Figura 4.1 apresenta de forma sucinta as informações apresentadas anteriormente.

Figura 5.1 – Informações resumidas da RBS



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Nesse contexto, é importante considerar os aspectos relacionados ao tema *Digital Twin*, visto que essa tecnologia é recente e faz-se necessária um entendimento aprofundado acerca do tema. Dessa forma, não existe uma definição específica e comum para o conceito de DT. Alguns autores elaboraram definições a partir de suas experiências e estudos com essa tecnologia. A Tabela 4.1 apresenta algumas delas.

Tabela 4.1 - Definições de *Digital Twin*

Autor	Definição
-------	-----------

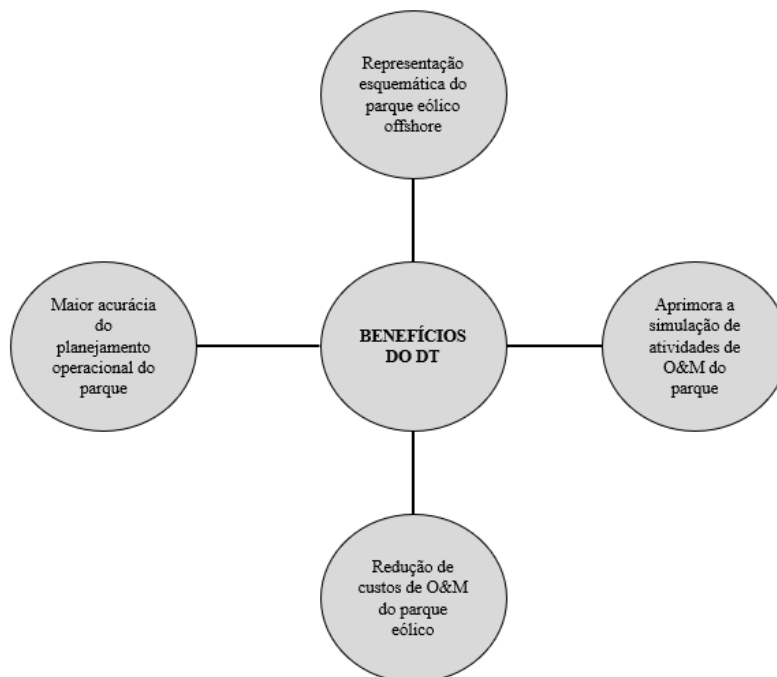


Glaessgen e Stargel (2012)	Uma simulação multifísica e multiescala integrada de um veículo ou sistema que usa os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, histórico da frota, etc., para espelhar a vida de seu gêmeo correspondente.
Verdouw <i>et al.</i> (2015)	Representação digital de um objeto com uma identificação única que pode ser confiável, é de integridade, está imediatamente disponível e pode servir ao propósito pretendido.
Boschert e Rosen (2016)	Descreve as características físicas e funcionais de um componente, produto ou sistema que inclui mais ou menos todas as informações que podem ser úteis ao longo de todo o seu ciclo de vida.
Chen X. <i>et al.</i> (2021)	Facilita uma previsão consistente e contínua do desempenho estrutural de componentes marcados individualmente, por todo ciclo de vida.
Momber <i>et al.</i> (2022)	Combina modelos matemáticos com sensor de dados adquiridos e processados de ativos físicos durante sua operação em condições do mundo real.
Mehlan, Nejad e Gao (2022)	É atualizado com dados de forma que virtualmente experimenta o mesmo ambiente que sua contraparte física.
Jorgensena <i>et al.</i> (2023)	Oferece uma estrutura definida, estendendo a funcionalidade dos modelos de simulação para a fase operacional de um ativo.
Haghshenas <i>et al.</i> (2023)	Fornecer previsibilidade, controle, monitoramento e otimização de ativos físicos, utilizando dados e simulações durante todo o ciclo de vida dos ativos.
Pujana. <i>et al.</i> (2023)	É uma representação virtual de um sistema ou ativo da vida real com o mesmo comportamento.

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

De modo geral, os autores corroboram com a ideia que o DT utiliza um componente físico e suas características, onde, por meio de sensores e modelos matemáticos de programação, esse ativo pode ter uma modelo virtual, ou seja, o seu gêmeo digital, que apresenta o funcionamento das operações ao longo de todo seu ciclo de vida. Essa simulação auxilia no monitoramento dos ativos físicos, sendo fundamental para a detecção precoce de problemas. A Figura 4.2 apresenta os benefícios da aplicação do DT.

Figura 5.2 – Benefícios do gêmeo digital



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Dessa forma, fica evidente a importância da utilização do DT para o auxílio das atividades de manutenção das turbinas eólicas *offshore*.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O gêmeo digital é um tema recente e muito relevante para o setor da energia eólica *offshore*, uma vez que as tarefas de operação e manutenção em turbinas deste tipo são complexas. Dessa forma, um planejamento e gerenciamento adequados dessas atividades influencia diretamente nos custos. Assim, é válido o estudo e aprofundamento desses temas inter-relacionados, de forma a entender as atividades de manutenção para uni-las à tecnologia do gêmeo digital.

Nesse contexto, a Revisão Bibliográfica Sistemática, realizada nesse estudo analisou 54 artigos sobre o tema, a fim de extrair informações importantes. Em sua totalidade, a maioria dos artigos utilizaram o método de estudo de caso, e grande parte teórico. Assim, a primeira sugestão é implantar as teorias, a fim de que esses estudos se tornem práticos. Além disso, utilizar o método *survey*, de forma que as conclusões do artigo possam ser extrapoladas para mais situações.

Percebe-se, também, um número pequeno de artigos relacionados à manutenção de turbinas eólicas *offshore* usando o gêmeo digital, mesmo que este tenha se destacado nesse estudo. Essa consideração é feita com base na amostra analisada, um número pequeno, expondo essa lacuna que pode ser sanada.

A quantidade de publicações de artigos, quando analisados por países está correlacionado com a capacidade instalada dos parques eólicos *offshore*. Por exemplo, o Reino Unido, a China e a Dinamarca que possuem as maiores capacidades instaladas de energia eólica *offshore* no mundo, também possuem maior número de publicações no tema, o que nos leva a concluir a relevância da aplicação do Gêmeo Digital nas usinas eólicas *offshore*.

Também, fica claro que não existe um consenso geral acerca do conceito de Digital Twin, onde cada autor apresenta sua visão. Porém, os autores corroboram que o Digital Twin é composto por uma parte física, que seria o gêmeo “original”, sendo este um espelho para o seu gêmeo digital, onde, por meio de sensores e modelos matemáticos, suas características seriam copiadas e anexadas a esta simulação, permitindo, assim, o controle e monitoramento da parte física. Além disso, o detalhamento realizado, mostra os softwares e aplicativos utilizados no estudo de caso analisado, e como estes, unidos a tecnologia DT, são úteis para a previsão de parâmetros.

Para futuros estudos recomenda-se a aplicação dos métodos de pesquisa como: i) o *survey*, para identificar em uma grande amostra de turbinas eólica *offshore*, os benefícios de sua aplicação, ii) a pesquisa-ação, a fim de identificar os desafios de sua implementação nas usinas eólicas *offshore*, e iii) o experimento, para modelar a melhor representação de um gêmeo digital de um parque eólico *offshore*.

## REFERÊNCIAS

AHSAN, Dewan; PEDERSEN, Søren. The influence of stakeholder groups in operation and maintenance services of offshore wind farms: Lesson from Denmark. **Renewable Energy**, v. 125, p. 819-828, 2018.

ANDRAWUS, Jesse A.; MACKAY, Laurie. Offshore wind turbine blade coating deterioration maintenance model. **Wind Engineering**, v. 35, n. 5, p. 551-560, 2011.

AUGUSTYN, Dawid; ULRIKSEN, Martin D.; SØRENSEN, John D. Reliability updating of offshore wind substructures by use of digital twin information. **Energies**, v. 14, n. 18, p. 5859, 2021.

BAAGØE-ENGELS, Victoria; STENTOFT, Jan. Operations and maintenance issues in the offshore wind energy sector: An explorative study. **International Journal of Energy Sector Management**, v. 10, n. 2, p. 245-265, 2016.

BESNARD, François; FISCHER, Katharina; TJERNBERG, Lina Bertling. A model for the optimization of the maintenance support organization for offshore wind farms. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 4, n. 2, p. 443-450, 2012.

BEZZAOUCHA, Fatima Souad; SAHNOUN, M.'hammed; BENSLIMANE, Sidi Mohamed. Multi-component modeling and classification for failure propagation of an offshore wind turbine. **International Journal of Energy Sector Management**, v. 15, n. 2, p. 397-420, 2021.

BOSCHERT, Stefan; ROSEN, Roland. Digital twin: the simulation aspect. **Mechatronic futures: Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers**, p. 59-74, 2016.

CARROLL, James et al. Availability, operation and maintenance costs of offshore wind turbines with different drive train configurations. **Wind Energy**, v. 20, n. 2, p. 361-378, 2017.

CHEN, Xiao et al. A human-cyber-physical system toward intelligent wind turbine operation and maintenance. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 561, 2021.

CHOU, Shuo-Yan et al. Optimal maintenance planning with special emphasis on deterioration process and vessel routing for offshore wind systems. **Energy & Environment**, p. 0958305X211073799, 2022.

CIURIUC, Alexandra et al. Digital tools for floating offshore wind turbines (FOWT): A state of the art. **Energy Reports**, v. 8, p. 1207-1228, 2022.

DALGIC, Yalcin; LAZAKIS, Iraklis; TURAN, Osman. Investigation of optimum crew transfer vessel fleet for offshore wind farm maintenance operations. **Wind Engineering**, v. 39, n. 1, p. 31-52, 2015.

DAO, Cuong D. et al. Integrated condition-based maintenance modelling and optimisation for offshore wind turbines. **Wind Energy**, v. 24, n. 11, p. 1180-1198, 2021.

DAO, Cuong D.; KAZEMTABRIZI, Behzad; CRABTREE, Christopher J. Offshore wind turbine reliability and operational simulation under uncertainties. **Wind Energy**, v. 23, n. 10, p. 1919-1938, 2020.

DENYER, D., TRANFIELD, D. **Producing a systematic review**. In D. A. Buchanan & A. Bryman (Eds.), *The SAGE handbook of organizational research methods* (pp. 671–689). London: Sage Publications Ltd. 2009.

ERRANDONEA, Itxaro; BELTRÁN, Sergio; ARRIZABALAGA, Saioa. Digital Twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, v. 123, p. 103316, 2020.

ERTEK, Gürdal; KAILAS, Lakshmi. Analyzing a decade of wind turbine accident news with topic modeling. **Sustainability**, v. 13, n. 22, p. 12757, 2021.

FANG, Xin et al. Fatigue crack growth prediction method for offshore platform based on digital twin. **Ocean Engineering**, v. 244, p. 110320, 2022.

GARCIA-TERUEL, Anna et al. Life cycle assessment of floating offshore wind farms: An evaluation of operation and maintenance. **Applied Energy**, v. 307, p. 118067, 2022.

GLAESSGEN, Edward; STARGEL, David. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In: **53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA**. 2012. p. 1818.

GOCKEL, Brian *et al.* Challenges with Structural Life Forecasting Using Realistic Mission Profiles. **53Rd Aiaa/Asme/Asce/Ahs/Asc Structures, Structural Dynamics And Materials Conference<<Br>>20Th Aiaa/Asme/Ahs Adaptive Structures Conference<<Br>>14Th Aiaa**, [S.L.], p. 1-12, 23 abr. 2012. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-1813>.

GONZÁLEZ, M. O. A.; SANTISO, A. M.; MELO, D. C.; VASCONCELOS, R. M. Regulation for offshore wind power development in Brazil. **Energy Policy**, v. 145, p. 111756, 2020.

[GONZÁLEZ, M. O. A.](#); TOLEDO, J. C.; A integração do cliente no processo de desenvolvimento de produto: revisão bibliográfica sistemática e temas para pesquisa. *Produção* (São Paulo. Impresso), v. 22, p. 14-26, 2012.

GONZALO, Alfredo Peinado et al. Optimal maintenance management of offshore wind turbines by minimizing the costs. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, p. 102230, 2022.

GRIEVES, Michael W.. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. **International Journal Of Product Development**, [S.L.], v. 2, n. 1/2, p. 71, 2005. Inderscience Publishers. <http://dx.doi.org/10.1504/ijpd.2005.006669>.

HAGHSHENAS, Amirashkan et al. Predictive digital twin for offshore wind farms. **Energy Informatics**, v. 6, n. 1, p. 1-26, 2023.

JORGENSEN, Jack et al. Requirements for the application of the Digital Twin Paradigm to offshore wind turbine structures for uncertain fatigue analysis. **Computers in Industry**, v. 145, p. 103806, 2023.

KARYOTAKIS, A.; BUCKNALL, R. Planned intervention as a maintenance and repair strategy for offshore wind turbines. **Journal of marine engineering & technology**, v. 9, n. 1, p. 27-35, 2010.

KERRES, Bertrand; FISCHER, Katharina; MADLENER, Reinhard. Economic evaluation of maintenance strategies for wind turbines: a stochastic analysis. **Iet Renewable Power Generation**, [S.L.], v. 9, n. 7, p. 766-774, set. 2015. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0260>.

KRITZINGER, Werner *et al.* Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. **Ifac-Papersonline**, [S.L.], v. 51, n. 11, p. 1016-1022, 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.

LI, Mingxin et al. A multi-objective maintenance strategy optimization framework for offshore wind farms considering uncertainty. **Applied Energy**, v. 321, p. 119284, 2022.

LI, Xiaodong et al. A decision support system for strategic maintenance planning in offshore wind farms. **Renewable Energy**, v. 99, p. 784-799, 2016.

- LUBING, Xie et al. An opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbine based on accessibility evaluation. **Wind Engineering**, v. 44, n. 5, p. 455-468, 2020.
- MABKHOT, Mohammed M. et al. Requirements of the smart factory system: A survey and perspective. **Machines**, v. 6, n. 2, p. 23, 2018.
- MARTINI, Michele et al. Accessibility assessment for operation and maintenance of offshore wind farms in the North Sea. **Wind Energy**, v. 20, n. 4, p. 637-656, 2017.
- MEHLAN, Felix C.; NEJAD, Amir R.; GAO, Zhen. Digital twin based virtual sensor for online fatigue damage monitoring in offshore wind turbine drivetrains. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 144, n. 6, p. 060901, 2022.
- MOGHADAM, Farid K.; REBOUÇAS, Geraldo F. de S.; NEJAD, Amir R. Digital twin modeling for predictive maintenance of gearboxes in floating offshore wind turbine drivetrains. **Forschung im Ingenieurwesen**, v. 85, n. 2, p. 273-286, 2021.
- MOMBER, Andreas et al. Digitalization and the use of sensor data for the condition-monitoring of surface protection systems of steel towers of onshore wind power structures. **STAHLBAU**, 2021.
- MOMBER, Andreas W. et al. A Digital Twin concept for the prescriptive maintenance of protective coating systems on wind turbine structures. **Wind Engineering**, v. 46, n. 3, p. 949-971, 2022.
- NGUYEN, Thi Anh Tuyet; CHOU, Shuo-Yan. Maintenance strategy selection for improving cost-effectiveness of offshore wind systems. **Energy conversion and management**, v. 157, p. 86-95, 2018.
- NGUYEN, Trinh Hoang et al. A framework for data integration of offshore wind farms. **Renewable energy**, v. 60, p. 150-161, 2013.
- NIELSEN, Jannie Sønderkær; SØRENSEN, John Dalsgaard. Methods for risk-based planning of O&M of wind turbines. **Energies**, v. 7, n. 10, p. 6645-6664, 2014.
- NILSSON, Julia; BERTLING, Lina. Maintenance management of wind power systems using condition monitoring systems—life cycle cost analysis for two case studies. **IEEE Transactions on energy conversion**, v. 22, n. 1, p. 223-229, 2007.
- OLATUNJI, Obafemi O. *et al.* Overview of Digital Twin Technology in Wind Turbine Fault Diagnosis and Condition Monitoring. **2021 IEEE 12Th International Conference On Mechanical And Intelligent Manufacturing Technologies (Icmimt)**, [S.L.], p. 108952-108971, 13 maio 2021. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icmimt52186.2021.9476186>.
- PAPADOPOULOS, Petros; COIT, David W.; EZZAT, Ahmed Aziz. Seizing opportunity: maintenance optimization in offshore wind farms considering accessibility, production, and crew dispatch. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 13, n. 1, p. 111-121, 2021.
- PÉREZ, M. et al. Optimal maintenance system for offshore wind turbines. In: **International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'10). Granada (Spain), 23th to 25th March. 2010.**
- PETERSEN, Kristian R.; MADSEN, Erik Skov; BILBERG, Arne. First Lean, then modularization: improving the maintenance of offshore wind turbines. **International Journal of Energy Sector Management**, v. 10, n. 2, p. 221-244, 2016.
- PLIEGO MARUGÁN, Alberto; GARCÍA MÁRQUEZ, Fausto Pedro; PINAR PEREZ, Jesus Maria. Optimal maintenance management of offshore wind farms. **Energies**, v. 9, n. 1, p. 46, 2016.
- 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**, v. 16, n. 2, p. 861, 2023.
- QI, Qinglin; TAO, Fei. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. **IEEE Access**, [S.L.], v. 6, p. 3585-3593, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2018.2793265>.
- REN, Zhengru et al. Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 110886, 2021.

- ROSEN, Roland *et al.* About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. **Ifac-Papersonline**, [S.L.], v. 48, n. 3, p. 567-572, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>.
- SALARI, Mahdi Ebrahimi; COLEMAN, Joseph; TOAL, Daniel. Analysis of direct interconnection technique for offshore airborne wind energy systems under normal and fault conditions. **Renewable Energy**, v. 131, p. 284-296, 2019.
- SARKER, Bhaba R.; FAIZ, Tasnim Ibn. Minimizing maintenance cost for offshore wind turbines following multi-level opportunistic preventive strategy. **Renewable energy**, v. 85, p. 104-113, 2016.
- SCHEU, Matti *et al.* Maintenance strategies for large offshore wind farms. **Energy Procedia**, v. 24, p. 281-288, 2012.
- SHAFIEE, Mahmood. Maintenance logistics organization for offshore wind energy: Current progress and future perspectives. **Renewable energy**, v. 77, p. 182-193, 2015.
- SINHA, Yashwant *et al.* A SMART software package for maintenance optimisation of offshore wind turbines. **Wind engineering**, v. 37, n. 6, p. 569-577, 2013.
- SINHA, Yashwant; STEEL, John A. A Prognostic Decision Model for Offshore Wind Turbines Maintenance. **Wind Engineering**, v. 39, n. 5, p. 569-578, 2015.
- SØRENSEN, John Dalsgaard. Framework for risk-based planning of operation and maintenance for offshore wind turbines. **Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology**, v. 12, n. 5, p. 493-506, 2009.
- VERDOUW, C. N. *et al.* A control model for object virtualization in supply chain management. **Computers in industry**, v. 68, p. 116-131, 2015.
- WALKER, Jake *et al.* Digital twins of the mooring line tension for floating offshore wind turbines to improve monitoring, lifespan, and safety. **Journal of Ocean Engineering and Marine Energy**, p. 1-16, 2022.
- WANG, Mengmeng *et al.* Recent progress on reliability analysis of offshore wind turbine support structures considering digital twin solutions. **Ocean Engineering**, v. 232, p. 109168, 2021.
- XIE, Lubing *et al.* Maintenance optimization of offshore wind turbines based on an opportunistic maintenance strategy. **Energies**, v. 12, n. 14, p. 2650, 2019.
- YANG, Li *et al.* Operations & maintenance optimization of wind turbines integrating wind and aging information. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 12, n. 1, p. 211-221, 2020.
- YU, Vincent F. *et al.* Optimal maintenance policy for offshore wind systems. **Energies**, v. 14, n. 19, p. 6082, 2021.
- ZHANG, Bingying; ZHANG, Zijun. A robust model for scheduling power productions of multiple offshore wind farms using one-to-many maintenance services. **IET Renewable Power Generation**, v. 15, n. 13, p. 2997-3013, 2021.
- ZHANG, Bingying; ZHANG, Zijun. A two-stage model for asynchronously scheduling offshore wind farm maintenance tasks and power productions. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 130, p. 107013, 2021.