



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

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



PARÂMETROS PARA APLICAÇÃO DO GÊMEO DIGITAL EM PARQUES EÓLICOS: ANÁLISE DE CASOS

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

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

LUIS MARIO DE MEDEIROS AGUIRRE- lmmedeiros2341@gmail.com
CREATION RESEARCH GROUP - UFRN

LUCAS LEONARDO LOPES SILVA – lucas.silva.099@ufrn.edu.br
CREATION RESEARCH GROUP - UFRN

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

ÁREA: 5. ENGENHARIA DO PRODUTO

SUBÁREA: 5.3 – PLANEJAMENTO E PROJETO DO PRODUTO

RESUMO: A INTERNET DAS COISAS (IOT) PERMITE A COMUNICAÇÃO ENTRE EQUIPAMENTOS E SERES HUMANOS, POSSIBILITANDO AÇÕES EM TEMPO REAL E CONTRIBUINDO PARA UMA GESTÃO PROATIVA. OS GÊMEOS DIGITAIS SÃO RÉPLICAS VIRTUAIS DE SISTEMAS FÍSICOS QUE, AO COMBINAR DADOS EM TEMPO REAL COM MODELOS DE SIMULAÇÃO, TORNAM-SE FERRAMENTAS ESSENCIAIS PARA UMA TOMADA DE DECISÃO MAIS ASSERTIVA. A INTEGRAÇÃO DESSAS TECNOLOGIAS É A CHAVE PARA UMA GESTÃO INTELIGENTE. O ESTUDO TEVE COMO OBJETIVO IDENTIFICAR QUAIS CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS ESTÃO PRESENTES NA APLICAÇÃO DE GÊMEOS DIGITAIS PARA OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS EM PARQUE EÓLICOS. PARA ISSO, FOI REALIZADA UMA PESQUISA TEÓRICA E ANÁLISE DE TRÊS CASOS, SENDO O PRIMEIRO EM UM PARQUE EÓLICO ONSHORE E OS OUTROS DOIS EM PARQUES EÓLICOS OFFSHORE. NO CASO ONSHORE, O GÊMEO DIGITAL TEVE COMO PROPÓSITO A COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS BIM E AS-BUILT ATRAVÉS DOS DADOS OBTIDOS POR FOTOGRAFIETRIA COM DRONES. NOS CASOS OFFSHORE, O GÊMEO DIGITAL NO CASO “B” TEVE O PROPÓSITO DE MONITORAMENTO E PREVISÃO DE FALHAS, ENQUANTO NO CASO “C” FOI DE VISUALIZAÇÃO E SIMULAÇÃO. SENSORES INSTALADOS NAS TURBINAS FORAM UTILIZADOS PARA COLETAR OS DADOS EM TEMPO REAL E POSSIBILITAR AS ANÁLISES. COMO RESULTADO, FORAM ELENCADOS PARÂMETROS QUE DEVEM SER CONSIDERADOS NA APLICAÇÃO DO GÊMEO DIGITAL EM PARQUES EÓLICOS.

PALAVRAS-CHAVES: GÊMEO DIGITAL; ENERGIA EÓLICA; ONSHORE; OFFSHORE; IOT.

1. INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia tem permitido a integração de sistemas complexos em diversas áreas industriais, gerando, dessa forma, melhorias na eficiência, monitoramento e controle. Como destaque, pode-se citar a Internet das Coisas (IoT) e os gêmeos digitais, os quais estão modificando a forma pelo qual os processos industriais são conduzidos. No contexto da energia eólica, esses avanços apresentam um potencial enorme para revolucionar o setor, como já vêm fazendo (Lu; Cecil, 2020).

A Internet das Coisas permite a interconexão de dispositivos e sensores em uma rede, facilitando a coleta e análise de dados em tempo real. Através da IoT, é possível a obtenção de dados sobre performance de determinado equipamento ou processo, permitindo uma gestão mais proativa e informada (Shrouf *et al.*, 2020; Zhong *et al.*, 2021).

Os gêmeos digitais, por sua vez, representam uma evolução no monitoramento e simulação de sistemas físicos. Um gêmeo digital é uma réplica virtual de um objeto ou sistema físico, criado com o objetivo de modelar, monitorar ou prever o seu comportamento ao longo de seu ciclo de vida (Rasheed *et al.*, 2020; Jones *et al.*, 2020). Ao combinar dados em tempo real coletados pelos sensores da IoT com modelos de simulação, os gêmeos digitais se tornam uma importante ferramenta para a tomada de decisão baseada em dados.

A integração da IoT com os gêmeos digitais no setor de energia eólica contribui para a sustentabilidade, melhora da eficiência operacional e redução de custos. A capacidade de prever falhas e realizar manutenções preventivas reduz o tempo de inatividade das turbinas, prolonga a vida útil e colabora para maximizar a produção de energia (Wang *et al.*, 2022). Ademais, a implementação dessas tecnologias em conjunto permite uma gestão mais inteligente do parque eólico, possibilitando analisar diversas variáveis, além de realizar todos os testes necessários antes da implementação de determinado equipamento ou processo, diminuindo a possibilidade de erros.

Nesse sentido, este artigo tem como objetivo identificar quais características e parâmetros estão presentes na aplicação do gêmeo digital para otimização de recursos nos parques eólicos. O artigo está organizado em cinco seções. A segunda seção apresenta a fundamentação teórica sobre IoT, gêmeo digital e energia eólica. A terceira seção descreve o método da pesquisa. A quarta seção contempla a descrição e análise comparativa dos três casos de aplicação do gêmeo digital em parques eólicos identificando os parâmetros de aplicação. A última seção contempla as considerações finais, conclusões e recomendações.

2. GÊMEO DIGITAL E ENERGIA EÓLICA

Esta seção apresenta a análise da revisão de literatura sobre internet das coisas, gêmeo digital e energia eólica.

2.1 Internet das Coisas

A IoT (*Internet of things*) envolve a integração de tecnologias de comunicação, computação e sensoriamento para criar redes de objetos interconectados que podem coletar e compartilhar dados. A evolução da IoT tem sido impulsionada por avanços em sensores, redes de comunicação sem fio, tecnologias de armazenamento e processamento de dados, bem como pela popularização de dispositivos móveis e computação em nuvem (Gartner, 2023).

Segundo Kubota e Rosa (2022), é possível aplicar a IoT em diversos ambientes, objetivando agilizar a tomada de decisão de forma inteligente, sempre levando em consideração os dados coletados em tempo real. A IoT também permite a comunicação entre o ambiente e as redes de internet, com os objetos interagindo com os indivíduos e os processos (Vargas; Vilarinho, 2021).

2.2 Gêmeo Digital

O gêmeo digital é uma representação virtual de um ativo físico que possibilita trocar informações com outros e refletir dados em tempo real do gêmeo físico (Branlard, *et al.*, 2020). Glaessgen e Stargel (2012) afirmam que, para refletir com precisão a vida de um ativo físico, um gêmeo digital utiliza os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, etc., para criar uma simulação integrada multifísica, multiescala e probabilística.

Os gêmeos digitais podem ser utilizados de diversas formas em parques eólicos. Para modelagem, permite simular o impacto de diferentes condições no desempenho de turbinas eólicas. Para monitoramento, controle e previsibilidade das condições, o gêmeo digital é continuamente atualizado com dados em tempo real dos parques eólicos, possibilitando, dessa forma, que os operadores tomem decisões sem que haja a necessidade de presença física (Ambarita *et al.*, 2024). Esse fluxo de dados simultâneo só é possível graças aos sensores instalados no objeto físico (Mehlan, 2024).

2.3 Energia Eólica

A energia eólica é a conversão da energia cinética do vento, em mecânica e, por fim, em elétrica. A energia cinética dos ventos depende do volume de ar, da sua densidade e da sua

velocidade. Essa energia está relacionada com a variação de temperatura no planeta terra que faz o ar atmosférico movimentar-se, e esta movimentação é o vento (Bilgili; Yasar; Simsek, 2011; Letcher, 2017).

A velocidade do movimento do ar define a força do vento e, dessa forma, a quantidade da sua energia cinética. A partir dessa energia, as pás ligadas a um rotor se movimentam, o qual irá rotacionar a turbina e, assim, gerar eletricidade por meio da conversão de energia mecânica em energia elétrica (Bilgili; Yasar; Simsek, 2011; Letcher, 2017).

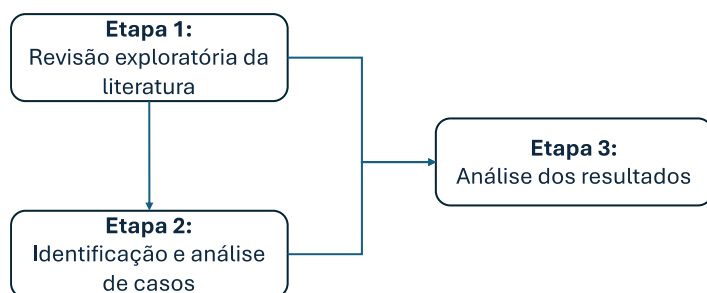
A geração de energia eólica *onshore* é a instalação e fixação de turbinas eólicas em terra, fazendo o uso constante da força dos ventos para gerar eletricidade (Vaicberg *et al.*, 2021).

A energia eólica *offshore* se localiza nos oceanos e possui menos fatores geográficos que causam turbulência nos ventos, quando comparado com a *onshore* (Dalgic *et al.*, 2015; Dalgic; Lazakis; Turan, 2013; Fan *et al.*, 2019; Lian *et al.*, 2019; Ursavas, 2017; Verma; Vedvik; Gao, 2019). Dessa maneira, os ventos *offshore* possuem uma maior velocidade e maior constância, possibilitando a utilização de turbinas com maior potência nominal, sendo assim, mais eficiente (Bingol, 2018; Chartron, 2018, 2019; Fan *et al.*, 2019; Irawan; Jones; Ouelhadj, 2017; Lian *et al.*, 2019; Sarker; Faiz, 2017; Öztürk *et al.*, 2017). E, devido a essa menor variação na velocidade do vento, a vida útil das turbinas aumenta (Arshad; O’Kelly, 2013).

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

A pesquisa é caracterizada como exploratória uma vez que o foco foi identificar e explorar a aplicação do gêmeo digital em parques eólicos por meio da revisão da literatura e análise de casos (Demo, 2010). O procedimento da pesquisa ocorreu em três etapas, conforme Figura 1.

FIGURA 1 – Procedimento da pesquisa.

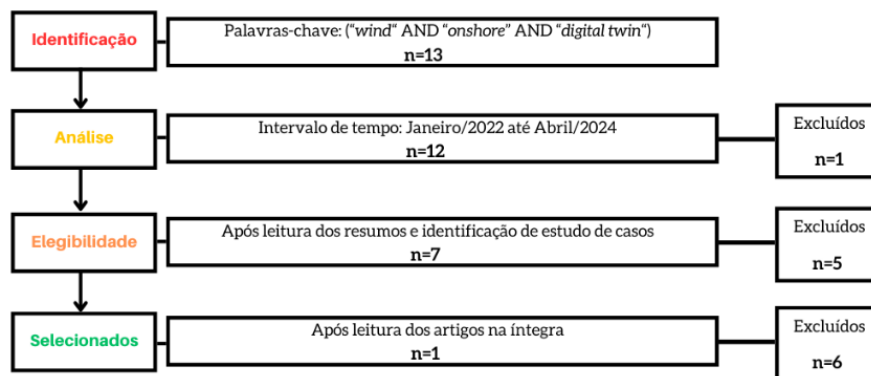


Fonte: Elaboração própria (2024).

A primeira etapa contemplou a revisão exploratória da literatura sobre definições, características e tipologias nos temas de “gêmeo digital” e “parques eólicos” em dissertações, teses e artigos científicos. Após, foi definida a problemática da pesquisa “quais características e parâmetros estão presentes na aplicação do gêmeo digital para otimização de recursos nos parques eólicos?”.

Na segunda etapa foi realizada o levantamento de artigos na base de dados “Scopus”. O procedimento de busca se dividiu em duas fases, sendo a primeira com o objetivo de encontrar artigos com aplicação de gêmeos digital em para parque eólicos *onshore* e a segunda para aplicação de gêmeos digitais em parque eólicos *offshore* e cada fase teve 4 partes: identificação, que se refere as palavras-chaves utilizadas, bem como os operadores lógicos utilizados; análise, levando em consideração o período de publicação do artigo, sendo necessário ter sido publicado entre janeiro de 2022 a abril de 2024; elegibilidade, onde foi feita a leitura do resumo de cada artigo, além de identificar aqueles que relatavam estudos de casos acerca da aplicação do gêmeo digital; e, por fim, os selecionados, que foram os artigos analisados neste estudo.

FIGURA 2a – Fase 1: aplicação de gêmeo digitais em parques eólicos *onshore*.

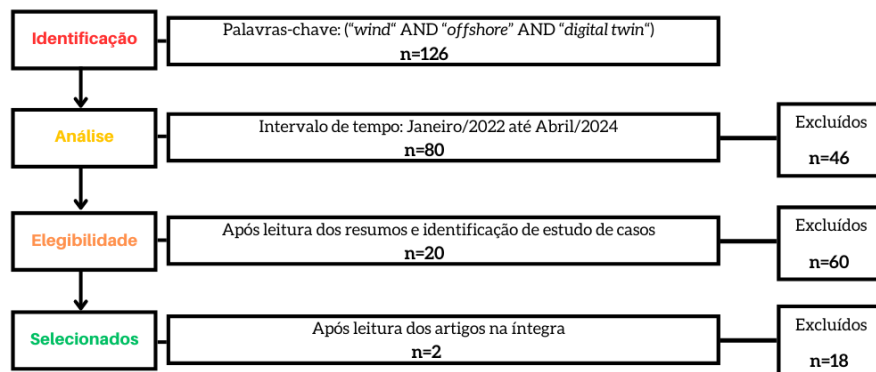


Fonte: Elaboração própria (2024).

Ao final da fase 1, apenas um artigo foi selecionado, conforme aponta a Figura 2a. Este artigo, chamado de “Artigo A”, foi o “*A digital twin for monitoring the construction of a Wind farm*”, o qual aborda a utilização de gêmeo digitais para modelagem de parque eólico *onshore* e foi publicado no ano de 2023.

Em seguida, iniciou-se a fase 2, que pode ser visualizada a partir da Figura 2b. A mesma base de dados foi utilizada, entretanto, dessa vez, o objetivo foi encontrar artigos com a utilização de gêmeos digitais em parques eólicos “*offshore*”.

FIGURA 2b – Fase 2: aplicação de gêmeo digitais em parques eólicos *offshore*.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Ao executar a parte 2 por completo, os artigos B e C foram selecionados, sendo eles, respectivamente “*Industrial digital twin in offshore wind farms*” e “*Digital twin-driven dynamic repositioning of floating offshore wind farms*”. O artigo B foi publicado em 2024 e trata da aplicação de um gêmeo digital com propósito de previsão e monitoramento, enquanto o artigo C foi publicado no ano de 2023 e traz a perspectiva de utilização de gêmeo digital para simulação e visualização.

A terceira etapa teve como foco a análise comparativa da análise dos três artigos. Após o estabelecimento dos parâmetros de comparação, foram analisados os casos e identificadas características utilizadas na aplicação do gêmeo digital em parques eólicos, visando encontrar similaridades e diferenças nos estudos analisados.

4. ANÁLISE DOS CASOS

Visando abranger mais de uma aplicação da área da energia eólica, escolheu-se três artigos para que pudessem ser analisados. O artigo A, intitulado como “*A digital twin for monitoring the construction of a Wind farm*”, teve como objetivo comparar um modelo BIM (*Building Information Modeling*), que é analisado a partir da fase de projeto que contém as especificações de construção e modelo *as-built*, que representam a construção real em diferentes momentos (Bohórquez *et al.*, 2023). É importante ressaltar que esse estudo foi aplicado em um parque eólico *onshore*.

O artigo B tem o título “*Industrial digital twin in offshore wind farms*”, o qual apresenta um estudo de caso de uma implementação de gêmeos digitais preditivos em parques eólicos *offshore* (Ambarita *et al.*, 2024).

Por fim, o artigo C “*Digital twin-driven dynamic repositioning of floating offshore wind farms*” é um estudo de caso de um parque eólico *offshore* com 15 turbinas dispostas em um layout 3x5. A proposta deste gêmeo digital é realizar simulações para identificar a posição das turbinas da fileira do meio que maximize a energia gerada (Kandemir; Liu; Hasan, 2023).

4.1 Caso A

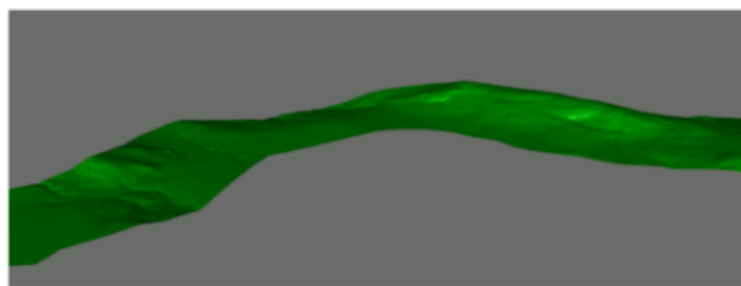
O artigo A teve o seu local de aplicação *onshore*, pois o parque eólico analisado está em solo. O propósito principal do gêmeo digital foi de modelagem, tendo em vista a comparação entre o modelo BIM e o *as-built* e, assim, entendendo as mudanças que foram feitas durante a execução do projeto. Os dados foram obtidos através da técnica de fotogrametria. Para isso, utilizou-se de voos de drone. O resultado pode ser visto nas figuras 3a e 3b.

FIGURA 3a – Fotogrametria de todo o parque eólico.



Fonte: Bohórquez *et al.* (2023).

FIGURA 3b – Fotogrametria de todo o parque eólico.



Fonte: Bohórquez *et al.* (2023).

Com os dados obtidos, os autores utilizaram o *software* Civil 3D AutoDesk para a montagem do modelo. O tipo de visualização foi 3D e a plataforma de visualização e simulação utilizada foi a Unreal Engine, que foi selecionada pelos autores do artigo A com a intenção de simular a interação com o videogame, facilitando a usabilidade por parte do usuário. Com ela, foi possível fazer a comparação visual entre os modelos BIM e *as-built*,

sobrepondo um ao outro e observando as variações, conforme Figura 4. Isso foi benéfico, pois é possível acompanhar as alterações não desejadas e, caso queira, solicitar as correções de imediato, sem que haja a necessidade de esperar o final da construção.

FIGURA 4 – Visualização no *software* Unreal Engine.

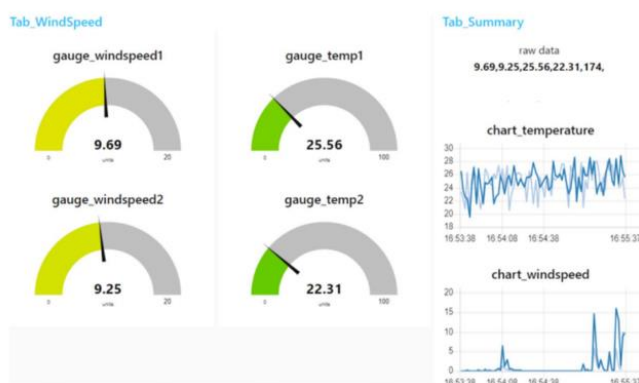


Fonte: Bohórquez *et al.* (2023).

4.2 Caso B

O artigo B possui o local de aplicação como *offshore*, pois está localizado no mar norte da Noruega. O propósito desse gêmeo digital foi de previsão e monitoramento, pois as turbinas já foram desenvolvidas e estão instaladas no oceano e, nelas, estão instalados câmeras e sensores para coletar dados importantes (velocidade e direção do vento, etc) para fazer o monitoramento à distância das turbinas eólicas. Além disso, esses dados coletados também foram utilizados para tentar gerar modelos para tentar prever e, consequentemente, prevenir possíveis falhas. A plataforma de simulação utilizada pelos autores do artigo B foi a “Unity 3D”, a qual possibilita uma visualização em 2D e 3D e que podem ser vistos nas figuras 5a e 5b. Para enviar os dados dos sensores até o *software* de simulação, utilizou-se do protocolo de comunicação OPC UA e o Node-RED para criação dos *dashboards*.

FIGURA 5a – Visualização 2D (*dashboards*).



Fonte: Ambarita *et al.* (2024).

FIGURA 5b – Visualização 3D no software Unity 3D.



Fonte: Ambarita *et al.* (2024).

FIGURA 5c – Realidade aumentada.



Fonte: Ambarita *et al.* (2024).

A visualização 2D (Figura 5a) trata de *dashboards* com os indicadores e gráficos do que está sendo monitorado em tempo real. Através dessa forma de visualização, o acompanhamento de todos os dados se torna mais fácil e dinâmico, tendo em vista a concentração em uma única página e celeridade de atualização, graças aos sensores implantados nas turbinas eólicas. Além disso, através do *plugin* PTC Vuforia, foi possível a utilização de realidade aumentada (Figura 5c), visando melhorar e aumentar a interação e capacidades do usuário. Portanto, o *software* recebe os dados coletados pelos sensores in loco e realiza as simulações desejadas.

4.3 Caso C

O artigo C também possui local de aplicação *offshore* e foi desenvolvido pela Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia. Este gêmeo digital tem como propósito a visualização da disposição 3x5 do parque eólico, além de realizar simulações, movendo as turbinas eólicas da fileira central para encontrar o layout que minimize o “*wake effect*” e, consequentemente, maximize a energia gerada. A velocidade e direção do vento são utilizadas

como entradas para o gêmeo digital. Esses dados são obtidos através de um sistema de sensores localizados no “gêmeo físico” e são enviados para um servidor através do protocolo de comunicação OPC UA. Com os dados no servidor, o autor possibilita o envio diretamente para a plataforma de visualização e simulação 3D, Unity 3D, ou transferir primeiramente para o “Node-RED” para criação de um dashboard em 2D. A Figura 6 mostra a visualização de forma conjunta em 3D e do *dashboard* de monitoramento.

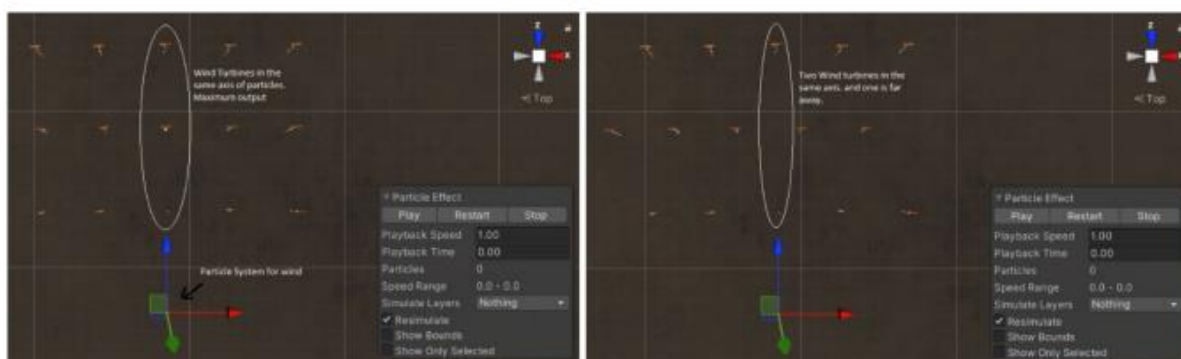
FIGURA 6 – Visualização 2D e 3D do software Unity 3D.



Fonte: Kandemir; Liu; Hasan (2023).

Para a configuração de posicionamento das turbinas eólicas no software, os autores usaram a configuração “em linha” e a “zigue-zague”, conforme Figura 7a. Essa configuração é feita na área de simulação do software Unity 3D. Para saber para onde mover as turbinas da fileira do meio na configuração “zigue-zague”, os autores usaram soluções nomeadas de “controle reativo” e “controle ótimo”.

FIGURA 7a – Configuração do parque eólico em linha (esquerda) e zigue-zague (direita).



Fonte: Kandemir; Liu; Hasan (2023).

FIGURA 7b – Solução de controle reativo (esquerda) e controle ótimo (direita).



Fonte: Kandemir; Liu; Hasan (2023).

Como resultado final, faz-se a simulação nos três tipos de configuração (em linha; zigue-zague controle reativo; e zigue-zague controle ótimo) e é possível verificar, através da tela de visualização do software, a geração de energia de cada turbina eólica, bem como o total produzido pelo parque eólico em cada configuração, conforme Figura 7b.

4.4 Análise cruzada dos casos

Para a análise dos casos foram utilizados parâmetros identificados na etapa 1 do estudo e serviu para comparar e analisar os artigos. Foram eles: local de aplicação, visando indicar se o caso foi aplicado no *onshore* ou *offshore*; o propósito do gêmeo digital; a fonte de captação de dados, ou seja, a forma que os dados necessários foram obtidos; o *software* utilizado para desenho com suas respectivas dimensões; o *plugin* utilizado; o protocolo de comunicação; a plataforma de visualização e simulação, ou seja, a plataforma utilizada para que o usuário observe, faça as alterações desejadas e, conseqüentemente, as simulações; e, por fim, o tipo de visualização. A Tabela 1 apresenta a síntese dos parâmetros dos estudos.

TABELA 1 – Parâmetros elencados.

Parâmetro	Artigo		
	A	B	C
Local de aplicação	Onshore	Offshore	Offshore
Propósito do gêmeo digital	Modelagem	Previsão/Monitoramento	Visualização e Simulação
Fonte de captação de dados	Voos de drone (fotogrametria)	Sensores e câmeras	Sensores
Software utilizado para desenho do modelo	Civil 3D AutoDesk	-	-
Plugin	DataSmith	PTC Vuforia	-
Protocolo de comunicação	-	OPC UA	OPC UA
Plataforma de visualização e simulação	Unreal Engine	Unity 3D	Unity 3D
Tipo de visualização	3D	3D, 2D e Realidade aumentada	3D e 2D

Fonte: Elaboração própria (2024).

A partir da Tabela 1, é possível perceber que a fonte de captação de dados nos artigos B e C foram os sensores, enquanto no artigo A foi através da técnica de fotogrametria. Isso acontece devido ao propósito do gêmeo digital, pois, para um processo de modelagem, é extremamente necessário que as informações acerca da área do parque eólico sejam extremamente fidedignas e detalhadas. Este fato pode ser confirmado a partir da análise do parâmetro “Software utilizado para desenho do modelo”. O artigo A foi o único em que os autores fizeram desenho do modelo a partir de um software específico de CAD, enquanto nos outros dois artigos os autores fizeram a “montagem” do parque eólico diretamente na plataforma de visualização e simulação.

É visto que apenas o artigo C não utilizou *plugin*, o que pode limitar a utilização do gêmeo digital. No artigo B, foi o *plugin* que possibilitou a visualização através de realidade aumentada, enquanto no artigo A, o *plugin* traz elementos adicionais para a plataforma de simulação que foram desenvolvidos em programas de design. Ambas as plataformas de visualização e simulação utilizadas pelos autores também são conhecidas pelo desenvolvimento de jogos. Nesse sentido, as duas são capazes de realizar simulações, porém a Unity 3D conta com maiores recursos, o que justifica a maior utilização dessa plataforma.

Enquanto o artigo A possui apenas visualização 3D através da plataforma Unreal Engine, o artigo C possui, além da visualização em 3D, uma visualização 2D de um *dashboard* de indicadores, assim como o artigo B. Isso aconteceu devido ao protocolo de

comunicação “OPC UA” utilizado nesses dois casos, o qual envia os dados coletados pelos sensores para o “Node-RED” e, dele, é enviado para a Unity 3D. Isso ocorre devido ao propósito dos gêmeos digitais nos casos B e C, os quais necessitam de um monitoramento em tempo real e contam com os sensores instalados nas turbinas, diferentemente do caso A, em que o gêmeo digital é para modelagem.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente artigo sintetiza as informações acerca dos casos, além de demonstrar a relevância e importância da integração de gêmeos digitais e princípios da Internet das Coisas no setor de energia eólica, tanto em parques *onshore* quanto em *offshore*. Os casos analisados mostram que a aplicação dessas tecnologias em conjunto proporciona diversos benefícios operacionais.

No artigo A, o qual foi aplicado em um parque eólico *onshore*, a utilização dos gêmeos digitais permitiu uma modelagem detalhada e precisa do parque eólico, facilitando a comparação entre os modelos BIM e *as-built*. A técnica de fotogrametria, realizada por voos de drone, foi essencial para a obtenção de dados precisos para serem inseridos no *software* Civil 3D AutoDesk. Através da utilização do *plugin* DataSmith, foi possível trazer elementos adicionais para a plataforma Unreal Engine que foram desenvolvidos em programas de design - aqui é possível identificar uma clara utilização dos princípios da IoT.

Por outro lado, o artigo B teve uma aplicação no ambiente *offshore* e o propósito deste gêmeo digital foi de previsão e monitoramento das turbinas eólicas. Sensores e câmeras instaladas nas turbinas foram utilizadas para coletar dados em tempo real, os quais eram enviados e, simultaneamente, os indicadores nos *dashboards* (visualização 2D), eram atualizados - outra aplicação dos princípios da IoT. Além disso, através do *plugin* utilizado foi possível criar uma realidade aumentada do parque eólico, o que deixa a aplicação ainda mais completa. Isso contribui para tomadas de decisões mais rápidas e mais assertivas.

Por último, o artigo C trouxe um gêmeo digital que teve um propósito de visualização e simulação também em um ambiente *offshore*. Através dos sensores, os dados são coletados e enviados para o servidor e direcionados para a plataforma Unity 3D, podendo visualizar em 2D e 3D. Neste caso, ao fazer as simulações com as turbinas eólicas em posições diferentes, é possível visualizar o benefício da utilização de gêmeos digitais, tendo a comprovação da posição de cada turbina que maximiza a geração de energia pelo parque eólico.

Nos três casos analisados, é visto que, através da implementação de gêmeos digitais e princípios da IoT, a gestão em parques eólicos se torna mais inteligente e eficaz. Apesar de propósitos diferentes de gêmeos digitais, em todos os casos é visto que a capacidade de realizar simulações e testes antes da implementação de novos equipamentos ou processos minimiza a possibilidade de erros.

A tabela de parâmetros desenvolvida contribui para verificar quais características estão presentes na concepção de um gêmeo digital. Além disso, também indica que os parâmetros “propósito do gêmeo digital” e “tipo de visualização” são os mais importantes dentre os elencados. O propósito do gêmeo digital influencia diretamente na definição do método para captação dos dados, na utilização de um software para desenho do modelo e na definição da plataforma de simulação e visualização. Já o tipo de visualização influencia os parâmetros de *plugin*, protocolo de comunicação e na definição da plataforma de simulação e visualização.

Portanto, a utilização dessas tecnologias de forma integrada é de extrema importância para o crescimento e avanço do setor de energia eólica. Nesse sentido, espera-se que a análise apresentada neste artigo contribua com a disseminação de informações relevantes acerca dos benefícios e aplicabilidade dos gêmeos digitais e princípios da IoT para a otimização de recursos em parques eólicos *onshore* e *offshore*.

Para futuros estudos, recomenda-se a ampliação das pesquisas sobre gêmeo digital e IoT em parques eólicos *offshore*, tendo em vista a previsão de grande crescimento desse nicho nos próximos anos. Nesse sentido, sugere-se a inclusão, no estudo, de temas importantes no contexto atual, como a inteligência artificial e o aprendizado de máquina, visando identificar melhorias que essas novas tecnologias podem acrescentar aos gêmeos digitais. Ademais, também é importante realizar estudos comparativos entre diferentes *softwares* de visualização e simulação, objetivando identificar quais oferecem maior precisão e eficiência.

REFERÊNCIAS

AMBARITA, E. E.; KARLSEN, A.; SCIBILIA, F.; HASAN, A. **Industrial digital twins in offshore wind farms**. Energy Informatics, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1-32, 6 fev. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s42162-024-00306-6>.

ARSHAD, M.; O’KELLY, B. C. **Offshore wind-turbine structures: A review**. 2013. Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy. Anais. 2013.

BILGILI, M.; YASAR, A.; SIMSEK, E. **Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 2, p. 905–915, 2011.

BINGOL, F. **Feasibility of large scale wind turbines for offshore gas platform installation.** AIMS Energy, v. 6, n. 6, p. 967–978, 2018.

BRANLARD E., GIARDINA D., DANA S. *et al* (2020) **Augmented Kalman filter with a reduced mechanical model to estimate tower loads on a land-based wind turbine: a step towards digital-twin simulations.** Wind Energy Sci 5(3):1155–1167.

CHARTRON, S. **Evaluating and Improving Logistics Costs During Offshore Wind Turbine Construction.** International Journal of Transportation Engineering and Technology, v. 4, n. 4, p. 65–74, 2018.

CHARTRON, S. **Improving logistics scheduling and operations to support offshore wind construction phase.** Logistics Research, v. 12, n. 1, 2019.

DALGIC, Y.; LAZAKIS, I.; TURAN, O. **Vessel charter rate estimation for offshore wind O&M activities.** Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources, 2013.

DALGIC, Y. *et al.* **Optimum CTV fleet selection for offshore wind farm O&M activities.** 2015. Safety and Reliability: Methodology and Applications - Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2014. Anais. 2015.

FAN, D. *et al.* **A hybrid heuristic optimization of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms.** Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 62, n. September, p. 103949, 2019.

GARTNER. **Top 10 Strategic Technology Trends for 2023.** 2023. Disponível em: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2023-01-10-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2023>. Acesso em: 10 maio 2024.

GLAESSGEN E.; STARGEL D. **The digital twin paradigm for future NASA and US air force vehicles.** 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference, Hawaii, USA. NASA. 2012.

IRAWAN, C. A.; JONES, D.; OUELHADJ, D. **Bi-objective optimisation model for installation scheduling in offshore wind farms.** Computers and Operations Research, v. 78, p. 393–407, 2017.

JONES, D. *et al.* **Characterising the Digital Twin: A systematic literature review.** CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 29, 36-52. 2020.

KANDEMIR, E.; LIU, J.; HASAN, A. **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>

LIAN, J. *et al.* **Coupled motion characteristics of offshore wind turbines during the integrated transportation process.** Energies, v. 12, n. 10, 2019.

LU, Y.; CECIL, J. **Digital Twin and IoT-Based Manufacturing: A Review.** Virtual and Physical Prototyping, 15(1), 105-122. 2020. DOI: 10.1080/17452759.2020.1718617.

MEHLAN, F. **Digital Twins for Fault Prognosis in Offshore Wind Turbine Drivetrains**. 2024. 229 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Marinha, Norwegian University Of Science And Technology, 2024.

BOHÓRQUEZ, A.O. *et al.* **A Digital Twin for Monitoring the Construction of a Wind Farm**. Infrastructures, Ávila, v. 8, n. 1, p. 10-24, 6 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/infrastructures8010010>.

RASHEED, A.; SAN, O.; KVAMSDAL, T. **Digital Twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective**. 2020.

SARKER, B. R.; FAIZ, T. I. **Minimizing transportation and installation costs for turbines in offshore wind farms**. Renewable Energy, v. 101, p. 667–679, 2017.

SHROUF, F.; ORDIERES, J.; MIRAGLIOTTA, G. **Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approaches in production based on IoT technologies**. Procedia Manufacturing, 42, 16-21. 2020.

ÖZTÜRK, D. T. *et al.* **Robust Rolling Horizon Optimisation Model for Offshore Wind Farm Installation Logistics**. Glasgow, 2017.

URSAVAS, E. **A benders decomposition approach for solving the offshore wind farm installation planning at the North Sea**. European Journal of Operational Research, v. 258, n. 2, p. 703–714, 2017.

VAICBERG, H. *et al.* **Energia Eólica offshore: um overview do cenário global e o contexto brasileiro**. Revista de Direito e Negócios Internacionais da Maritime Law Academy-International Law and Business Review, Rio de Janeiro, v.1, n.1, p.114-143, 202, 2021. Acesso em: 25 de mai. 2024.

VARGAS, S.; VILARINHO, M. **Análise do cenário de pesquisa sobre Ética e Indústria 4.0 na Engenharia de Produção brasileira: bibliometria nos anais do ENEGEP e SIMPEP (2011-2020)**. ENEGEP. Foz do Iguaçu, p. 1-14. out. 2021. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_WIC_363_1875_42701.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

VERMA, A. S.; VEDVIK, N. P.; GAO, Z. **A comprehensive numerical investigation of the impact behaviour of an offshore wind turbine blade due to impact loads during installation**. Ocean Engineering, v. 172, n. October 2018, p. 127–145, 2019.

WANG, Y.; MA, H.; ZHANG, J. **Predictive maintenance of wind turbines based on digital twin technology**. Renewable Energy, 188, 81-91. 2022

ZHONG, R. Y.; XU, X.; Klotz, E.; Newman, S. T. **Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review**. Engineering, 7(7), 10-25. 2021.