



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

Mateus Antunes de Souza

Aplicação de tecnologia Digital Twin em sistemas fotovoltaicos de energia:
uma revisão sistemática da literatura

Araranguá
2024

Mateus Antunes de Souza

Aplicação de tecnologia Digital Twin em sistemas fotovoltaicos de energia:
uma revisão sistemática da literatura

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Energia do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Bremermann

Araranguá
2024

Souza, Mateus Antunes de

Aplicação de tecnologia Digital Twin em sistemas fotovoltaicos de energia : uma revisão sistemática da literatura / Mateus Antunes de Souza ; orientador, Leonardo Elizeire Bremermann, 2024.

45 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Digital Twin. 3. Sistemas Fotovoltaicos. 4. Tecnologias de Informação. I. Bremermann, Leonardo Elizeire. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

Mateus Antunes de Souza

Aplicação de tecnologia Digital Twin em sistemas fotovoltaicos de energia:
uma revisão sistemática da literatura

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Leonardo Elizeire Bremermann.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Dra. Kátia Cilene Rodrigues Madruga
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Paulo César Rodrigues de Lima Júnior
Universidade Federal do Vale do São Francisco

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.

Carla de Abreu D'aquino, Dra.
Coordenadora do Curso

Prof. Leonardo Elizeire Bremermann, Dr.
Orientador

Mateus Antunes
Autor

Araranguá, de 2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

Primeiramente, agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, e meus avós, pelo suporte incondicional durante toda a minha trajetória acadêmica. Sem o apoio de vocês, este momento não seria possível.

Agradeço também ao meu orientador, Leonardo Bremermann, por sua orientação, disponibilidade e pelos valiosos ensinamentos ao longo deste projeto. Seu acompanhamento foi essencial para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de curso, que compartilharam dessa jornada, oferecendo apoio e colaborações importantes, meu muito obrigado.

Por fim, deixo meus agradecimentos a todos os professores e profissionais envolvidos na minha formação, que contribuíram diretamente para o conhecimento adquirido ao longo do curso.

Obrigado a todos!

RESUMO

Digital Twin (DT), ou Gêmeo Digital, é uma tecnologia baseada na criação de uma réplica virtual de objetos reais, visando monitoramento e melhoramento contínuos de sistemas através de uma comunicação bidirecional que se estabelece entre os componentes digital e físico. Nas últimas décadas, com o crescimento da demanda por energias renováveis, o DT tem sido utilizado como ferramenta potencializadora da produção de energia elétrica. No caso do setor de energia solar, seu uso vem demonstrando resultados positivos à medida que a complexidade dos sistemas fotovoltaicos exige monitoramento de falhas, análises precisas e otimização de seu funcionamento. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi descrever as aplicações e o funcionamento da tecnologia DT em sistemas fotovoltaicos na última década. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura científica no Portal de Periódicos CAPES. Após a aplicação de critérios de seleção em mais de 60 artigos, foram identificados 11 artigos qualificados para análise aprofundada. Foi constatado que o DT tem ganhado espaço cada vez maior no setor de energia solar fotovoltaica. As principais funcionalidades descritas foram a capacidade de simulação ambiental, predição de rendimento, detecção de falhas e aumento de produtividade. O uso integrado de *Deep Learning* também se mostrou relevante, por se tratar de uma ferramenta que se baseia na inteligência artificial para a análise de dados e autoaprendizagem constante. A aplicação de Digital Twin em sistemas fotovoltaicos destaca-se pelo monitoramento em tempo real, simulação de cenários, manutenção preditiva e maior eficiência energética, contribuindo para a sustentabilidade, redução de custos operacionais e integração em redes inteligentes.

Palavras-chave: Digital Twin; Sistemas Fotovoltaicos; Tecnologias de Informação.

ABSTRACT

Digital Twin (DT) is a technology based on creating a virtual replica of real objects, with the aim of continuously monitoring and improving systems through two-way communication between the digital and physical components. In recent decades, with the growth in demand for renewable energies, DT has been used as a tool to boost energy production. In the case of the solar energy sector, its use has shown positive results as the complexity of photovoltaic systems requires fault monitoring, precise analysis and optimization of their operation. In this context, the aim of this study was to describe the applications and operation of DT technology in photovoltaic systems over the last decade. To this end, a systematic review of the scientific literature was carried out on CAPES Journals Portal. The search results were filtered according to selection criteria, resulting in a total of 11 articles eligible for in-depth reading and analysis. It was found that the DT has been gaining increasing ground in the photovoltaic solar energy sector. The main functionalities described were environmental simulation, performance prediction and fault detection. The integrated use of Deep Learning was also relevant, as it is a tool that uses artificial intelligence to analyze data and promote constant self-learn. The advantages of using DT in photovoltaic systems include optimizing systems, contributing to the energy transition and sustainability, and supporting decision-making.

Keywords: Digital Twin; Photovoltaic Systems; Information Technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos sistemas de acordo com o nível de integração físico-digital	14
Figura 2 - Cinco dimensões do sistema DT	15
Figura 3 - Configuração de um sistema fotovoltaico	16
Figura 4 - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica	16
Figura 5 - Elementos de um painel fotovoltaico	18
Figura 6 - Funcionamento das Células Fotovoltaicas com base no Efeito Fotovoltaico	21
Figura 7 - Etapas do Método de Revisão Sistemática	24
Figura 8 - Fluxograma da seleção dos artigos para composição da revisão	27

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Componentes dos Sistemas Fotovoltaicos	17
Quadro 2 - Critérios de elegibilidade para seleção dos estudos	26
Quadro 3 - Descrição dos artigos selecionados e síntese dos resultados obtidos	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVO GERAL	11
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	CONCEITO DE DIGITAL TWIN	12
2.2	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	15
2.2.1	Funcionamento básico, tipos de sistemas e componentes	15
2.2.2	Painéis Fotovoltaicos	18
2.2.3	Células Fotovoltaicas	20
2.3	APLICAÇÃO DE DIGITAL TWINS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	TIPO DE ESTUDO	24
3.2	FORMULAÇÃO DA PERGUNTA DE PESQUISA E CHAVE DE BUSCA	25
3.3	PLATAFORMA DE DADOS	25
3.4	CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE	26
3.5	SELEÇÃO DE ESTUDOS E EXTRAÇÃO DE DADOS	26
4	RESULTADOS	27
5	DISCUSSÃO	32
5.1	CONCEITUAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE DIGITAL TWINS (DTs)	32
5.2	MODELOS DE DTS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	32
5.2.1	Integração com tecnologias complementares	32
5.2.2	Inteligência artificial e Deep Learning (DL)	34
5.2.3	Contribuições dos DTs para a eficiência estrutural	35
5.2.4	Diagnóstico de falhas	36
6.1	BENEFÍCIOS E DESAFIOS DA APLICAÇÃO DE DTS	37
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado uma transição global para fontes renováveis de energia, como a solar e a eólica. Nesse cenário, os sistemas fotovoltaicos emergem como uma solução promissora para atender à crescente demanda energética de maneira sustentável. No entanto, desafios como a intermitência na geração, a eficiência energética e a manutenção preditiva limitam o desempenho ideal desses sistemas.

Entre as tecnologias emergentes, o Digital Twin (DT) tem se consolidado como uma solução estratégica para superar os desafios enfrentados pelos sistemas fotovoltaicos, oferecendo recursos como monitoramento contínuo, análise preditiva e otimização operacional. Reconhecido como uma das principais inovações da 'Indústria 4.0', o DT viabiliza a criação de réplicas virtuais precisas de objetos físicos, permitindo uma integração dinâmica e bidirecional entre o mundo real e o digital. Sua aplicação no setor fotovoltaico tem impulsionado ganhos significativos, incluindo o aumento da eficiência energética, a identificação de falhas em tempo real e a simulação preditiva de cenários complexos. Assim, o DT se firma como uma tecnologia indispensável para o avanço sustentável e estratégico das energias renováveis (Rocha, 2022; Andrade; GUIMARÃES, 2023; Oliveira Júnior, 2023).

A aplicação de DTs aos sistemas fotovoltaicos é um exemplo notável de como essa tecnologia pode ser utilizada para melhorar o desempenho e a eficiência em setores específicos. À medida que a demanda por energias renováveis cresce e a complexidade dos sistemas fotovoltaicos aumenta, o uso de Digital Twin oferece vantagem ao possibilitar a simulação realística e análise detalhada de variáveis críticas, contribuindo assim para a eficiência e a sustentabilidade da produção energética (Ditzel et al., 2020; JAIN et al., 2020; Martinelli, 2022; Yao et al., 2021).

Diversas experiências com DTs aplicados a sistemas fotovoltaicos têm sido descritas, buscando-se explorar as vantagens de seu uso e os resultados provenientes desta integração. No setor da energia solar, em específico, muitas publicações evidenciam seu uso na simulação ambiental para monitoramento de variáveis que interferem na produtividade energética, bem como o monitoramento de fatores intrínsecos do sistema através da comunicação bidirecional dos componentes físico e digital, que se utilizam de sensores e conectividade de

informações para gerar cálculos probabilísticos e relatórios de funcionamento (FERNÁNDEZ, 2022; OLIVEIRA JÚNIOR, 2018; MARTINELLI, 2022; SILVA; RIBEIRO, 2017; YAO et al., 2021).

Dentro do contexto atual de busca por modalidades energéticas sustentáveis, o uso de tecnologias como o DT destaca-se como um aliado na mitigação de desafios relacionados à integração e eficiência das fontes renováveis, especialmente no setor fotovoltaico, onde a otimização do desempenho é crítica para a transição energética. Este trabalho tem como objetivo analisar o funcionamento e as aplicações de Digital Twin (DT) em sistemas fotovoltaicos, destacando suas características e impactos no setor de fontes renováveis. Para alcançar esse objetivo, foi realizado um levantamento bibliográfico e uma revisão sistemática da literatura, atendendo aos objetivos gerais e específicos da pesquisa

1.1 OBJETIVO GERAL

Descrever, a partir da literatura científica, as aplicações e o funcionamento da tecnologia DT em sistemas fotovoltaicos na última década.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as principais funcionalidades da tecnologia DT aplicadas aos sistemas fotovoltaicos;
- Identificar as principais vantagens obtidas pelos sistemas fotovoltaicos através da tecnologia DT;
- Elencar as principais funções da DT no aprimoramento do componente físico e digital dos sistemas;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITO DE DIGITAL TWIN

Digital Twin (DT), ou Gêmeo Digital, é uma ferramenta tecnológica que vem sendo implementada em larga escala nos diversos setores de produção industrial, sobretudo por sua capacidade de otimizar serviços através de um sistema integrado bidirecional que relaciona a dimensão real de um objeto com seu modelo virtual (ANDRADE; GUIMARÃES, 2023; OLIVEIRA JÚNIOR, 2023). Ainda, pode-se considerá-lo um dos conceitos centrais da chamada “Indústria 4.0” - tida como a quarta e mais recente revolução industrial - à medida que possibilita simulação, monitoração e aperfeiçoamento dos serviços que dependem de equipamentos reais, sendo uma importante ferramenta de apoio nas tomadas de decisão (ROCHA, 2022; OLIVEIRA JÚNIOR, 2023).

Por se tratar de uma tecnologia relativamente recente, ainda não há definição única na literatura sobre o que é DT. No entanto, dada sua crescente relevância no meio técnico-científico-informacional, muitos conceitos têm sido postulados por diferentes autores que tratam do DT como objeto de estudo. De modo consensual, todos apontam para a ferramenta como um recurso tecnológico benéfico aos produtos e meios de produção. Nesse sentido, para uma melhor abordagem conceitual, serão inicialmente expostos os princípios deste modelo tecnológico para, em seguida, tratar de suas definições e características, as quais tornaram-se mais complexas ao longo do tempo.

A origem do que hoje se conhece por *Digital Twin*, remonta à proposta teórica de Michael Grieves, em 2002, sobre uma entidade digital própria, criada a partir de informações captadas de um sistema físico real, a qual simularia um produto de interesse e visaria o gerenciamento do seu ciclo de vida. Adentrando o campo prático, os primórdios das aplicações de DT limitavam-se a sistemas meramente comparativos, em que o gêmeo digital servia de referência ao produto fabricado (GRIEVES; VICKERS, 2017; MARTINELLI, 2022; SCHROEDER, 2018; BATISTA, 2023).

Somente em 2011, após quase uma década de sua proposição teórica, Grieves indicou formalmente o termo “*Digital Twin*” como denominação para estes modelos digitais, que neste período já se apresentavam mais elaborados a nível de

integração e fluxo de dados (GRIEVES, 2014; ANDRADE; GUIMARÃES, 2023). A escolha pelo termo “*Twin*” faz referência a pesquisas realizadas pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) envolvendo simulações digitais realísticas, ditas “Gêmeas”, capazes de monitorar e prever o status de voo de aeronaves reais que partiam do solo (ANDRADE; GUIMARÃES, 2023; MARTINELLI, 2022).

A partir deste período, diversos autores passaram a descrever a DT e suas aplicações em vários setores produtivos e de mercado. À medida que se apontavam as inovações que eram incorporadas ao sistema e a variedade de modelos digitais, pode-se construir um entendimento mais elaborado sobre o que é uma DT.

Em 2012, Glaessgen e Stargel (2012) propuseram o que seria a definição mais comum: sistemas com três componentes, sendo estes o produto físico, o produto virtual e a comunicação entre os mesmos, de modo a replicar a vida de seu gêmeo através de sensores e simulações probabilísticas multi-escala e multi-física. Em 2015, Rosen et al. (2015) definiu DT como um modelo muito realista do estado atual de um produto e de seu comportamento no ambiente real. Já Stefan e Roland (2016) dissertaram em 2016, que o DT poderia ser caracterizado também como a replicação digital de um componente, produto ou sistema, cujas informações físicas e funcionais tornam-se mais acessíveis e passam a ser utilizadas para análise momentânea ou futura de seu ciclo de vida.

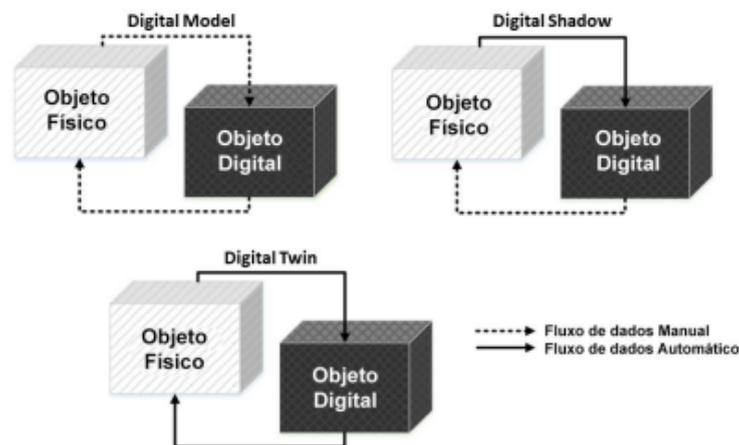
No ano de 2017, Negri, Fumagalli e Macchi (2017) exploraram a literalidade do termo “*Twin*” (gêmeo) para explicar esta tecnologia, apontando que DT é a digitalização de um gêmeo físico, em que se estabelece conexão entre espaços real e virtual, permitindo que estes interajam de modo simultâneo. Os autores apontaram, ainda, benefícios provenientes da tecnologia em questão, como predição de comportamentos a longo prazo de acordo com fatores externos, otimização dos ciclos de trabalho baseando-se em dados passados e presentes, oferta de confiabilidade ao gêmeo físico e monitoramento de possíveis deformações e falhas. Seguindo este caminho, Schleitch et al. (2017) complementaram o conceito, atribuindo à DT potencial de encurtamento do tempo de comercialização de um produto. Também Parrot (2017) fez menção a benefícios adicionais como auxílio na elaboração de protótipos e otimização das tomadas de decisões.

Partindo para definições mais recentes, Kritzinger et al. (2018) conceituaram como DT a construção digital informativa de um sistema,

compondo-se, assim, uma entidade própria vinculada a um sistema físico correspondente. Todavia, os autores descreveram que tal entidade detém alto nível de integração e fluxo de dados entre seus componentes digital e físico e que, portanto, sistemas obsoletos deveriam ser diferenciados por novos termos. Desta forma, propôs-se a classificação em sistemas *Digital Model*, *Digital Shadow* e *Digital Twin*.

Os primeiros são restritos à representação digital de um componente físico, sendo, portanto, simuladores, porém sem capacidade de estabelecer troca de dados automática entre seus componentes. Os segundos possuem o mesmo fundamento do anterior, contudo, há alimentação de dados do modelo físico para o digital, possibilitando a atualização automática do simulador. Já os últimos, referentes a DT, são os sistemas mais complexos, em que há fluxo bidirecional de dados entre ambos os modelos. A diferença entre os três conceitos de acordo com o nível de integração físico-digital dos sistemas está apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Classificação dos sistemas de acordo com o nível de integração físico-digital

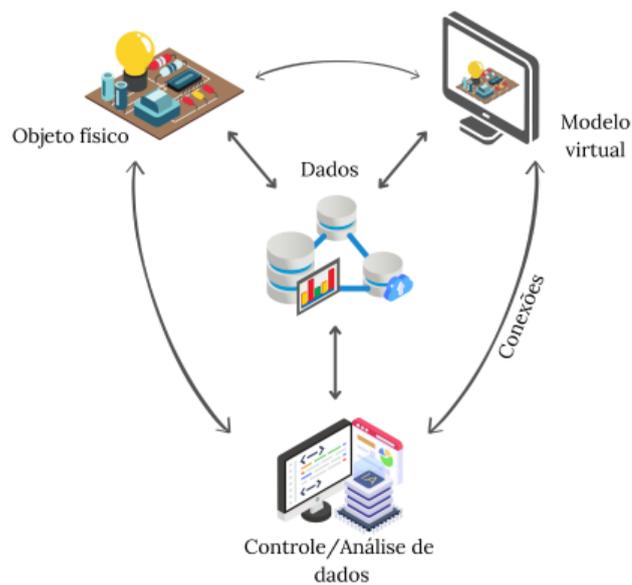


Fonte: KRITZINGER et al.(2018); adaptado por MARTINELLI (2022).

Talkhestani et al. (2019), por sua vez, destacaram, dentro do conceito de DT, a característica de autoajuste inteligente: capacidade de melhorar-se e evoluir por si próprio através da comunicação entre os sistemas físico e digital. Sob a mesma perspectiva, Falekas e Karlis (2021) defenderam a compreensão de DT expandida a cinco dimensões: física, virtual, de serviços, dados e conexões. Para estes autores,

a dimensão física é o objeto base da modelagem, a virtual é o sistema de simulação que servirá para tomada de decisão e controle da estrutura física, os serviços são as técnicas capazes de auxiliar o sistema através de tratamentos estatísticos e probabilísticos, os dados são as informações a serem tratadas e as conexões são a comunicação entre todas estas partes existentes. Na Figura 2, a seguir, pode-se visualizar uma esquematização desse modelo apresentado.

Figura 2 - Cinco dimensões do sistema DT



Fonte: FALEKAS, KARLIS (2021); adaptado por DA SILVA (2022).

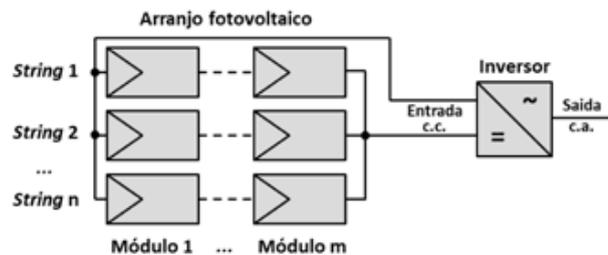
2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.2.1 Funcionamento básico, tipos de sistemas e componentes

Os sistemas fotovoltaicos operam através da conversão de energia solar em energia elétrica, sendo possível destinar o potencial energético gerado a redes elétricas ou ainda armazená-lo em baterias. Enquanto estrutura física, são painéis compostos por módulos fotovoltaicos, estruturas baseadas em eletrônica de potência e que possuem as células fotovoltaicas como unidade funcional da conversão de energia. Nestes sistemas, os módulos ligam-se em série de modo a

formar *strings* e cada uma destas liga-se em paralelo entre si, a partir de então é produzida uma corrente elétrica que será convertida pelo inversor de corrente contínua à alternada (DA SILVA, 2022; BATISTA, 2023). A organização descrita está representada na Figura 3, a seguir.

Figura 3 - Configuração de um sistema fotovoltaico



Fonte: SOLARIZE, 2023.

A corrente elétrica do circuito estabelecido será proporcional à voltagem criada pelos componentes em questão. O destino da corrente, por sua vez, dependerá do tipo de sistema fotovoltaico envolvido, existindo dois tipos principais: os sistemas conectados à rede e os sistemas autônomos. Nos primeiros, a corrente contínua produzida é convertida em alternada e integra-se à rede de energia elétrica, sendo compatível com ela em tensão e frequência. Desta forma, diz-se que esses sistemas contam com o suporte da rede elétrica tanto para prover energia em momentos de déficit de geração, quanto para oferecê-la nos casos de superávit. Tal intercâmbio é possível devido a um aparelho contador que quantifica a energia demandada em ambos os sentidos (SILVA; RIBEIRO, 2017; FERNÁNDEZ, 2022). Na Figura 4 está ilustrado esse tipo de sistema.

Figura 4 - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica



Fonte: FERNÁNDEZ, 2022

Os sistemas autônomos, por sua vez, necessitam obrigatoriamente de um regulador capaz de armazenar a energia excedente em baterias, para que possa então ser utilizada durante os momentos de produção energética insuficiente (SILVA; RIBEIRO, 2017; FERNÁNDEZ, 2022). Todavia, os sistemas conectados à rede detêm certa preferência no mercado em relação aos autônomos. Dentre as vantagens destacadas para o primeiro estão a grande produtividade, a dispensabilidade de baterias barateando custos de compra e manutenção, o desligamento automático no caso de falta de energia e a oferta integral de eletricidade junto ao ponto de consumo, sendo considerada, portanto, uma forma de geração distribuída (URBANETZ, 2010; SOARES, 2023).

É visto, portanto, que os sistemas fotovoltaicos podem se diferenciar por seus componentes, sendo importante citá-los à critério de comparação, bem como para a melhor compreensão de seu funcionamento. No Quadro 1, a seguir, estão elencados e descritos os principais componentes dos sistemas fotovoltaicos, com exceção dos Painéis fotovoltaicos, que serão mais bem retratados na sessão seguinte.

Quadro 1 - Componentes dos Sistemas Fotovoltaicos

Componente	Descrição
Bateria	Se dispõe em paralelo nos sistemas autônomos e são responsáveis pelo armazenamento de parte da energia gerada, para que possa ser aproveitada nos momentos em que a produção energética a partir da irradiação solar seja insuficiente.
Regulador ou Controladores de carga	Elemento de conexão entre as células solares e

	a bateria. Capazes de medir a voltagem das baterias para que alcancem sua carga máxima e, também, de desconectá-las do painel quando a carga é atingida, evitando que se danifiquem.
Inversor	Responsável por converter a corrente contínua, gerada pelos painéis fotovoltaicos, em corrente alternada de amplitude compatível com as redes e/ou aparelhos eletrônicos a serem conectados.
Contador	Dispositivo eletrônico que mede a energia demandada à rede elétrica quando a produção a partir dos painéis não for suficiente. Também mede a energia cedida à rede elétrica quando há excedente de produção.

Fonte: NEOSOLAR, 2024.

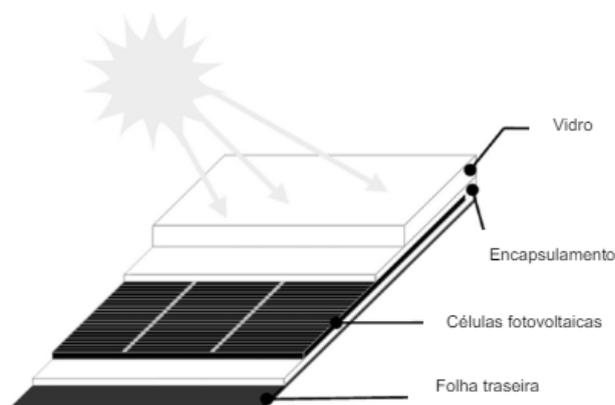
2.2.2 Painéis Fotovoltaicos

O painel, placa ou módulo fotovoltaico é o elemento central dos sistemas de produção de energia a partir da irradiação solar. Sua composição se dá, basicamente, pelo conjunto de células fotovoltaicas associadas, as quais fazem a conversão de energia solar em energia elétrica de fato, e pelos materiais que protegem as células de fatores externos como umidade, sujeira e contato físico, sendo eles: o vidro de proteção, o encapsulante, a lâmina de polímero traseira e a moldura do painel (NDIAYE et al., 2013; OLIVEIRA JÚNIOR, 2018).

O vidro de proteção orienta-se estrategicamente em direção aos raios solares e encarrega-se de transmitir a radiação recebida. O encapsulante é um material transparente contendo filme de EVA (acetato-vinilo de etileno), disposto após o vidro e encarregado de proteger as células solares e suas conexões de raios ultravioletas, altas temperaturas e umidade. A lâmina de polímero, por sua vez, é um material plástico que atua como folha traseira protetora e isolante elétrica, contribuindo assim com a estabilidade do sistema. A moldura do painel, por fim, é utilizada para dar firmeza ao painel e evitar que se deforme quando exposto às forças externas, já que as células são bastante frágeis (FERNÁNDEZ, 2022; OLIVEIRA JÚNIOR, 2018).

A disposição de alguns dos elementos citados pode ser vista na Figura 5, a seguir.

Figura 5 - Elementos de um painel fotovoltaico



Fonte: MARTINELLI, 2022.

Se avaliado isoladamente, um módulo fotovoltaico único apresenta baixa capacidade de produção de energia. Sendo assim, para atingir valores esperados de tensão e potência, faz-se necessária a associação de vários módulos, os quais conectados em série compõem as chamadas *strings*, determinando-se, assim, a tensão de operação do sistema. As *strings* também se conectam entre si e a partir deste conjunto associado em paralelo origina-se a corrente contínua do circuito (SOARES, 2023).

Por se tratar de uma aparelhagem que funciona, basicamente, com incidência de radiação solar sobre células fotovoltaicas, a intensidade deste fator influencia de forma diretamente proporcional na geração de energia a partir das placas. Nesse sentido, existem diversos fatores que podem diminuir ou ainda prejudicar a eficiência da geração de energia envolvida, dentro os quais pode-se citar: temperatura das placas, inclinação das placas, nuvens e deposição de sedimentos (MARTINELLI, 2022).

Em relação à temperatura dos painéis, sabe-se que quanto mais altas, maior será a queda na tensão gerada, havendo aumento discreto na corrente elétrica, por consequência. Todavia, esse aumento não é capaz de suprir as perdas causadas pela queda de tensão (OLIVEIRA JÚNIOR, 2018). Então, a recomendação é que se respeite a faixa de temperatura indicada pelo fabricante da placa, pois há evidências de que seu rendimento é alterado quando operam fora destes limites (SMETS et al., 2016).

Quanto à inclinação das placas, deve-se sempre ser ajustada de modo a obter a maior eficiência possível de absorção de radiação. Partindo do princípio de que a irradiação solar é composta por ondas eletromagnéticas paralelas que chegam à Terra em diferentes angulações devido à forma esférica do planeta, a correta inclinação das placas deve ser sempre calculada, para que a captação dos raios solares seja máxima.

Já as nuvens podem ser consideradas uma variável não controlada, pois são dependentes de fatores meteorológicos. Sua interferência se dá pelo bloqueio que exercem à radiação solar ao incidir sobre a atmosfera terrestre, através de reflexão e refração. Assim, quanto maior a quantidade de nuvens na atmosfera, menor a incidência da radiação solar sobre os painéis (VILLALVA; GAZOLI, 2012; MARTINELLI, 2022).

Por último, a deposição de sedimentos sobre as superfícies das placas também interfere na eficiência energética fotovoltaica, uma vez que o acúmulo de sujeira também restringe o grau de incidência da radiação. Este fator é extremamente variável, à medida que se comporta de diferentes maneiras a depender da geografia local, além de que os diferentes tipos de partículas envolvidos exercem influência igualmente distintas (COMERIO et al., 2020; MARTINELLI, 2022).

Todas essas variáveis são importantes para o balanço da eficiência energética dos sistemas fotovoltaicos, podendo influenciar significativamente o potencial de geração de energia. Por isso, planejamento frente às interferências ambientais e monitoração das condições externas aos módulos é essencial. É nesse sentido que as tecnologias digitais podem adentrar ao contexto, potencializando o aproveitamento energético destes complexos sistemas e servindo de apoio para decisões futuras.

2.2.3 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas, como já citado anteriormente, representam as unidades fundamentais dos sistemas fotovoltaicos, pois são as estruturas de fato responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica. Seu mecanismo baseia-se na física do efeito fotovoltaico, descrito por Edmond Becquerel, em 1839,

como o aparecimento de uma diferença de potencial elétrica entre os extremos de um material semiconductor, a partir da absorção da luz (CRESESB, 2006).

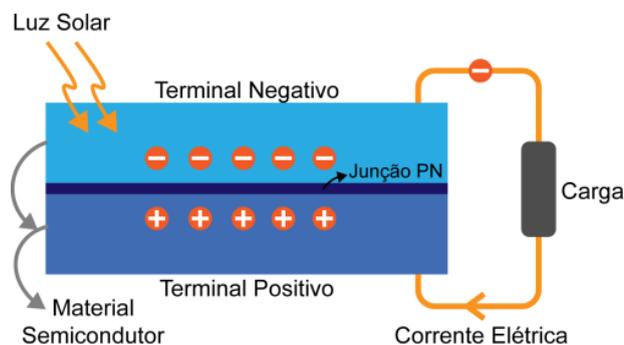
O material mais comumente utilizado para esse fim é à base de silício. Tal elemento, assim como outros de propriedades semicondutoras, conduz bem correntes elétricas e possui resistividade inversamente proporcional à elevação da temperatura. Por conta disso, apresenta bandas de energia que permitem o trânsito de elétrons entre si: aquela composta por elétrons é chamada de banda de valência, enquanto a vazia é dita banda de condução.

No caso do silício, os átomos apresentam quatro elétrons na camada de valência e isso os dá vantagem de se ligar a átomos vizinhos formando redes cristalinas. Ao adicionar outros elementos de propriedades específicas a esta rede, produz-se uma movimentação de elétrons capaz de gerar uma diferença de potencial no sistema. Por consequência, cria-se um campo elétrico.

Ao silício, costuma-se adicionar fósforo e boro, elementos com cinco e três elétrons de ligação, respectivamente, que necessitam de pouca energia térmica para estabelecer suas conexões. Nesse sistema, o fósforo comporta-se como doador de elétrons (*dopante n*), pois seu quinto elétron sobranete é fracamente ligado ao núcleo atômico e se desloca com facilidade, formando a banda de condução. O boro, por sua vez, possui uma lacuna em sua camada de valência e alta permissibilidade para que um elétron ocupe este espaço, assim, comporta-se como bom receptor de elétrons (*dopante p*) e compõe a banda de valência. Portanto, ao introduzir boro e fósforo em extremidades opostas do silício puro, será formada a junção *pn*. (CRESESB, 2006; MATAVELLI, 2013; SILVA; ARAÚJO, 2022).

Diante disso, compreende-se o princípio de funcionamento das células a partir do efeito fotovoltaico. Isso porque os fótons incidentes, provenientes da radiação solar, colidem com átomos dos materiais semicondutores e fazem com que os elétrons sejam deslocados dentro de um ambiente com campo elétrico pré-estabelecido. Estes elétrons livres são então capturados e aproveitados na forma de corrente dentro de cada célula. Por fim, as unidades de células são conectadas em série e têm suas tensões somadas, passando a operar em conjunto dentro de um módulo fotovoltaico (MATAVELLI, 2013). A Figura 6 esquematiza o funcionamento das células fotovoltaicas, que foi descrito acima.

Figura 6 - Funcionamento das Células Fotovoltaicas com base no Efeito Fotovoltaico



Fonte: MORAES (2020)

2.3 APLICAÇÃO DE DIGITAL TWINS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A aplicação de tecnologias digitais no setor de produção de energia é um bom exemplo do que se conhece hoje por “Indústria 4.0”. Tal conceito foi cunhado no ano de 2011, sendo também chamado de “Quarta Revolução Industrial”, pois assim como as revoluções anteriores, diz respeito à modernização e à otimização dos processos produtivos com base em inovações tecnológicas. No caso desta quarta revolução, a grande inovação pauta-se no uso de ferramentas tecnológicas informacionais capazes de promover a personalização dos produtos de acordo com as necessidades do mercado (DITZEL et al., 2020; SAKURAI, 2018; FRONTONI et al., 2018).

Rübmann et al. (2015) listaram alguns exemplos de tecnologias pertencentes a essa conjuntura, como por exemplo, realidade aumentada, *big data*, robôs, sistemas integrados, computação em nuvem e simulações. O Digital Twin, nesse contexto, é uma das possibilidades de operacionalização das tecnologias citadas, uma vez que oferece modelos de produtos virtuais com capacidade de simulação, integração e processamento de dados. Com isso, põem-se como ferramentas úteis ao planejamento e gerenciamento de ações no setor produtivo, oferecendo redução de custos, detecção de falhas e previsão de demandas (DITZEL et al., 2020).

Experiências com Digital Twin aplicados em Sistemas Fotovoltaicos têm sido descritas e apontam as vantagens potenciais de seu uso. A importância desta

tecnologia, neste setor em específico, está atrelada ao crescimento desta modalidade de geração de energia renovável, havendo maior necessidade de otimização de sua performance (MARTINELLI, 2022). Também, estes sistemas necessitam de constante monitorização e manutenção de falhas para operar corretamente, sendo que falhas de ligação à terra, falhas entre linhas e falhas de arco aberto, entre outras, são alguns dos exemplos que podem comprometer a sua eficiência (BATISTA, 2023).

Um bom exemplo foi exposto por Jain et al. (2020), os quais desenvolveram um sistema de monitorização de falhas que afetavam a geração de energia de um sistema fotovoltaico, através de Digital Twin. A tecnologia aplicada era capaz de detectar e classificar com precisão os tipos de falhas, com base na diferença entre as medições estimadas pelo sistema digital e os dados reais captados. Estruturalmente, a monitorização do sistema foi feita por meio de dois inversores ligados em série a uma fonte de tensão, capazes de gerar um vetor não nulo a partir de um erro residual. Para os autores, a aplicação desta tecnologia não apenas auxilia na detecção rápida e precisa de falhas, como também permite a previsão de falhas incipientes.

Outro modelo de Digital Twin foi apresentado por Yao et al. (2021). Nele, desenvolveu-se um programa que realizava análises meteorológicas (níveis de irradiação, velocidade e direção de ventos, umidade e pressão sobre as placas) e, a partir das variáveis obtidas, podia determinar o potencial de produção fotovoltaica sob determinadas condições. Além disso, o conjunto de informações computadas no componente digital criou uma base capaz de estudar a propagação de erros de previsão meteorológica que afetavam as projeções de produção de energia dos sistemas reais conectados.

Diversas outras experiências, inclusive brasileiras, têm sido relatadas na literatura, utilizando-se tanto de modelos de Digital Twin, como de Digital Shadow e Digital Model para estabelecer previsões de desempenho, otimizar o funcionamento das células e painéis fotovoltaicos e monitorar possíveis falhas que comprometam a geração de energia (OLIVEIRA JÚNIOR, 2018; MARTINELLI, 2022; SILVA; RIBEIRO, 2017; FERNÁNDEZ, 2022). Demais utilidades promovidas pelo incremento destas tecnologias digitais aos sistemas fotovoltaicos serão discutidas ao longo das sessões seguintes.

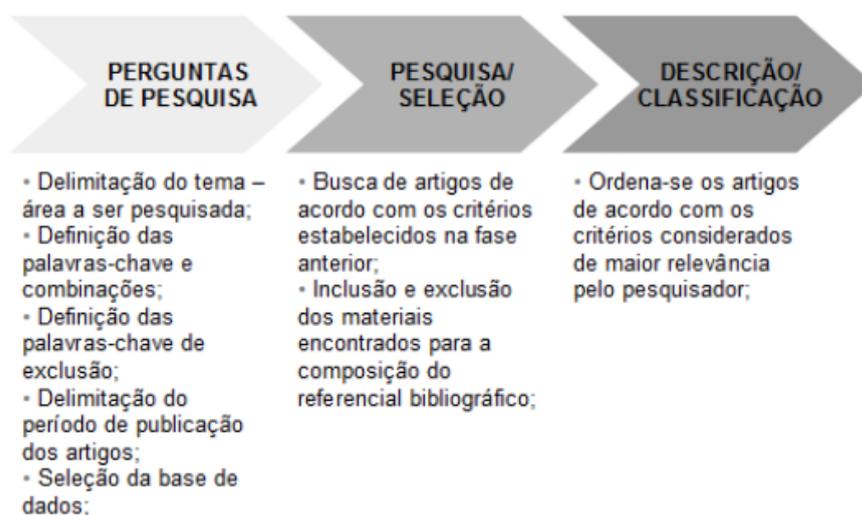
3 METODOLOGIA

3.1 TIPO DE ESTUDO

Para atingir o objetivo da pesquisa, optou-se por realizar uma revisão sistemática da literatura. Tal método visa identificar, selecionar e sintetizar os principais achados de uma determinada temática abordada pelo meio científico, através de etapas sistematizadas de pesquisa (ARMITAGE; KEEBLE-ALLEN, 2008). Quanto à caracterização desse estudo, trata-se de uma abordagem exploratória e descritiva, de caráter qualitativo, com base secundária em artigos publicados em periódicos científicos.

Para dar base à revisão sistemática, utilizou-se a proposta metodológica de Gohr et al. (2013), que define a sequência de passos para execução do trabalho em três etapas: 1) Perguntas de pesquisa; 2) Pesquisa/Seleção de artigos; 3) Descrição/Classificação de artigos selecionados. Essas etapas estão expostas e detalhadas na Figura 7, a seguir.

Figura 7 - Etapas do Método de Revisão Sistemática



Fonte: Gohr et al. (2013)

Na sequência, serão explicitadas as etapas desenvolvidas conforme metodologia proposta.

3.2 FORMULAÇÃO DA PERGUNTA DE PESQUISA E CHAVE DE BUSCA

A pergunta formulada para a condução da pesquisa foi: “Quais as aplicações atuais da tecnologia Digital Twin em Sistemas Fotovoltaicos?”.

A partir dessa pergunta pode-se restringir a temática de interesse e, em seguida, fez-se necessária a definição das palavras-chave, que servem como identificadores do assunto a ser pesquisado. Para combinar as palavras-chave utilizaram-se os operadores booleanos “OR” e “AND”, que estabelecem relação de alternativa e vínculo entre os identificadores, respectivamente (Gohr et al., 2013), e por fim, construiu-se a chave de busca da pesquisa, que resultou em: “(Digital Twin OR Virtual Twin) AND (Photovoltaic System OR Photovoltaic Solar Energy)”.

Optou-se por palavras-chave no idioma inglês para ampliar os resultados da busca, uma vez que é o idioma internacional adotado pela maioria dos periódicos científicos.

3.3 PLATAFORMA DE DADOS

Ainda na primeira etapa proposta por Gohr et al. (2013), há a necessidade de se eleger uma plataforma/base de dados coerente para a condução da pesquisa.

No caso desta, optou-se pela plataforma Portal de Periódicos CAPES, uma biblioteca virtual que contempla em um único buscador diversas bases de dados que são referência no ramo de tecnologia, como Web of Science, Scopus e SciELO. Além de incluir atualmente 396 bases científicas, reúne um acervo de 38 mil periódicos com texto completo, bem como livros, dissertações, normas técnicas e estatísticas (CAPES, 2024).

3.4 CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE

Com o intuito de filtrar os resultados obtidos na plataforma de busca, estabeleceu-se critérios de inclusão e exclusão para o estudo, a serem utilizados na etapa consecutiva de pesquisa/seleção.

De modo geral, buscou-se por artigos, publicados há no máximo dez anos, em idioma português ou inglês e que abordassem o tema de interesse da pesquisa, com relevância e rigor metodológico. Todos os critérios de elegibilidade aplicados nesta etapa estão organizados no Quadro 2, a seguir.

Quadro 2 - Critérios de elegibilidade para seleção dos estudos

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
Artigo publicado em periódico científico	Dissertações, teses, editoriais, relatórios, livros ou qualquer formato de publicação não correspondente a artigo científico.
Documento em formato aberto à leitura	Artigo com acesso restringido
Idioma português ou inglês	Idioma não correspondente a português ou inglês
Ano de publicação a partir de 2014	Publicações anteriores ao ano de 2014
Resultados coerentes aos objetivos da pesquisa	Resultados que fogem ou tangenciam o objetivo da pesquisa

Fonte: elaborado pelo autor (2024).

3.5 SELEÇÃO DE ESTUDOS E EXTRAÇÃO DE DADOS

Adentrando à segunda etapa da metodologia de Gohr et al. (2013), foi realizado o levantamento e seleção dos resultados obtidos. É nesta etapa que se dará a redução na quantidade de material encontrado, até que se defina a amostra final a ser consultada para a pesquisa.

Primeiramente, realizou-se uma filtragem inicial a partir dos critérios de elegibilidade: publicação recente, acesso aberto e idioma português ou inglês. Tendo excluído os artigos não adequados, seguiu-se para a segunda etapa da triagem, com a leitura dos títulos e resumos dos artigos aplicando o critério de adequação aos objetivos da pesquisa. Por fim, os artigos selecionados foram acessados e lidos na íntegra.

A análise de conteúdo e extração de dados, que possibilita classificar e descrever os resultados dos artigos (terceira etapa da metodologia adotada) se deu através de uma síntese qualitativa e crítica dos principais achados de cada estudo. Organizou-se, então, os resultados em uma tabela, conforme título, autoria e ano de publicação.

Todo o detalhamento destas etapas de seleção e síntese dos resultados será apresentado nas seções de Resultados e Discussão.

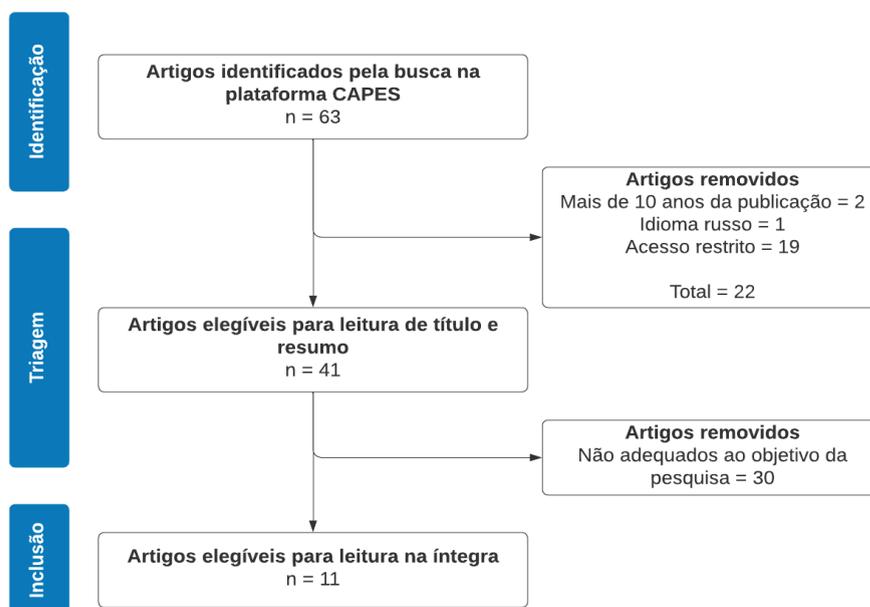
4 RESULTADOS

A busca realizada na Plataforma CAPES resultou inicialmente em um total de 63 artigos. Para garantir a relevância e qualidade dos trabalhos, foram aplicados critérios de elegibilidade que resultaram em uma triagem detalhada. Inicialmente, dois artigos publicados há mais de dez anos foram excluídos por não atenderem ao critério temporal definido. Além disso, um artigo escrito em idioma russo foi desconsiderado devido à barreira linguística, e outros 19 artigos foram excluídos por apresentarem acesso restrito apenas para assinantes, inviabilizando a análise.

Com isso, restaram 41 artigos elegíveis para a próxima etapa, que envolveu a leitura dos títulos e resumos. Nessa fase, 30 artigos foram descartados por não apresentarem alinhamento suficiente com o objetivo da pesquisa, mesmo tangenciando o tema central. Assim, ao final do processo de triagem, 11 artigos foram selecionados para leitura e análise na íntegra. Esses artigos compõem o núcleo dos resultados apresentados nesta pesquisa.

A Figura 8, a seguir, demonstra através de um fluxograma as etapas descritas acima.

Figura 8 - Fluxograma da seleção dos artigos para composição da revisão



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A caracterização geral dos 11 artigos selecionados para a pesquisa revelou aspectos significativos sobre o estado atual das investigações em Digital Twins (DTs) aplicados a sistemas fotovoltaicos. Todos os trabalhos estavam redigidos em inglês, o que evidencia a predominância desse idioma como principal veículo de comunicação científica. O intervalo de publicação dos artigos abrangeu os anos de 2019 a 2023, com uma concentração notável de publicações recentes. Entre os 11 artigos, sete foram publicados em 2023, o que representa aproximadamente 64% do total. Essa predominância de estudos recentes reforça a atualidade e o dinamismo do tema.

Após a leitura completa dos artigos, foi realizada a síntese de seus principais resultados e conclusões, com foco na descrição das aplicações e no funcionamento dos Digital Twins (DTs) em sistemas fotovoltaicos. Os artigos analisados indicam que os DTs são utilizados principalmente para monitoramento em tempo real, otimização de desempenho e manutenção preditiva.

A descrição dos artigos conforme autoria, ano de publicação e título, bem como a síntese dos resultados obtidos, foram organizadas no Quadro 3, a seguir.

Quadro 3 - Descrição dos artigos selecionados e síntese dos resultados obtidos

Nº	Autoria	Ano	Título	Objetivo	Resultados
1	Zhao et al.	2021	Digital-Twin-Based Evaluation of Nearly Zero-Energy Building for Existing Buildings Based on Scan-to-BIM	Avaliar como DTs podem melhorar a eficiência e sustentabilidade energética de edifícios com necessidade quase nulas de energia (nZEBs) existentes.	Através de DTs que simulam esquemas de retrofit (revitalização de edifícios antigos), demonstrou-se que o ângulo de instalação dos módulos fotovoltaicos impacta no consumo de energia predial e na geração de energia. Foi possível, através da tecnologia, calcular os ângulos ideais para geração máxima e consumo mínimo de energia solar fotovoltaica de um edifício, obtendo-se um aumento de 24,13% na geração de energia e diminuindo consideravelmente a emissão de dióxido de carbono.
2	Leopold, Braun e Pinheiro.	2023	An Interoperable Digital Twin To Simulate Spatio-Temporal Photovoltaic Power Output And Grid Congestion At Neighbourhood And City Levels In Luxembourg	Investigar como um DT geográfico, integrado a softwares gratuitos, pode contribuir para o aumento da produção de energia fotovoltaica em centros urbanos de Luxemburgo.	Integrou-se um DT a Simuladores 3D de espaços urbanos. Os resultados evidenciam que a tecnologia permite analisar, visualizar e otimizar a colocação de painéis fotovoltaicos em edifícios. Foram citados vários atributos dos DTs: simulação em alta resolução, processamento espacial, ferramentas de seleção interativas, reprodução de características ambientais como sombreamento, orientação e inclinação e visualização em tempo real dos sistemas. São também diversos os beneficiários: planejadores urbanos, desenvolvedores de tecnologias, cidadãos, investidores e comunidade de energia em geral.
3	Bocullo et al.	2023	A Digital Twin Approach to City Block Renovation Using RES Technologies	Avaliar soluções com base em energias renováveis para o processo de renovação de um quarteirão utilizando DT.	Propôs-se um modelo de DT focado em simulação, que projetou a combinação de sistemas solares fotovoltaicos com sistemas de aquecimento solar, calculando-se o potencial de geração e oferta de energia no local. O DT forneceu um modelo 3D detalhado do quarteirão, simulou o consumo e a produção de energia e permitiu uma estimativa precisa da incidência solar e sombreamento da área. Assim, contribuiu para avaliação do potencial de produção de energia fotovoltaica no local. Os resultados mostraram-se positivos, fornecendo soluções que reduzem o consumo de energia no setor de construção.

4	Arafet e Berlanga	2021	Digital Twins in Solar Farms: An Approach through Time Series and Deep Learning	Obter o DT de um Parque Solar Fotovoltaico com uso de deep-learning (DL) para detecção de anomalias no sistema físico.	Foi desenvolvido um DT com o uso de sensores que faziam análise de séries temporais de um sistema fotovoltaico real. Posteriormente, aplicou-se ao DT técnicas de DL (redes integradas capazes de autoaprendizagem não supervisionada) utilizadas para detecção de anomalias. Os resultados mostram um erro de reconstrução em torno de 0,1. Portanto, demonstrou-se que o DT pode reproduzir o comportamento do sistema físico, bem como detectar anomalias de modo eficiente.
5	Hong e Pula	2023	Diagnosis of PV faults using digital twin and convolutional mixer with LoRa notification system	Desenvolver um método de diagnósticos de falhas fotovoltaicas por meio do uso de DT, DL e um sistema de transmissão de longo alcance (LoRa).	O trabalho desenvolveu um método de diagnóstico de falhas fotovoltaicas em três etapas: (1) Detecção utilizando DT, (2) classificação utilizando ConvMixer (tipo de sistema DL) e (3) notificação usando LoRa. Demonstrou-se que a replicação do objeto físico através de DT é eficaz na detecção de falhas. Ainda, o método de classificação das falhas com ConvMixer alcançou uma precisão de 97% nos testes e necessitou de menor tempo de treinamento, superando outros métodos clássicos de DL.
6	Yang e Wang	2023	Prediction of photovoltaic power generation based on LSTM and transfer learning digital twin	Desenvolver um modelo de DT voltado à previsão da produção de energia solar fotovoltaica, utilizando uma rede de memória de curto e longo prazo (LSTM) e aprendizagem por transferência.	O DT contribuiu significativamente para a previsão de geração de energia fotovoltaica de modo preciso. O modelo de DT baseado em LSTM (um tipo de DL) e aprendizagem por transferência permitiu o aproveitamento de dados históricos e o monitoramento em tempo real das entidades físicas. Essa abordagem não apenas melhorou a precisão da previsão, como também economizou tempo durante o processo de treinamento do modelo, em comparação a outros modelos tradicionais.
7	Carr et al.	2023	Thermal model in digital twin of vertical PV system helps to explain unexpected yield gains	Investigar como os DTs podem contribuir para a compreensão e para a tomada de decisão em sistemas fotovoltaicos verticais instalados em um local de P&D na Holanda.	Aplicou-se a tecnologia DT a um local de P&D com nove fileiras de oito painéis fotovoltaicos bifaciais. Através de simulações, medições ambientais e fotovoltaicas e comparação entre sistemas físico e virtual, concluiu-se que o DT aumentou a compreensão do sistema fotovoltaico vertical e apoiou a tomada de decisões futuras, sendo capaz, inclusive, de detectar desvios por danos acidentais ou degradação gradual do sistema.

8	Clausen et al.	2022	Can we benefit from game engines to develop digital twins for planning the deployment of photovoltaics?	Avaliar a capacidade dos recursos integrados do mecanismo de jogos de suportar o desenvolvimento de DTs para sistemas fotovoltaicos	O estudo concentrou-se na representação visual do ambiente de implantação dos painéis fotovoltaicos, que interferem diretamente em seu funcionamento. O resultado mostrou que os mecanismos de projeção do ambiente podem ser usados para estimar a produção fotovoltaica. Também mostrou que a aplicação de um programa específico (Unreal Engine 5) que simula comportamentos do mundo real é promissora se dados precisos forem usados na modelagem.
9	Artetxe et al.	2023	Maximum Power Point Tracker Controller for Solar Photovoltaic Based on Reinforcement Learning Agent with a Digital Twin	Comparar o desempenho de sistemas fotovoltaicos tradicionais com o de um modelo proposto que contém um controlador de ponto de potência máxima baseado em aprendizado por reforço e DT.	Os resultados mostram uma melhoria de 10,45% na potência total do sistema e um tempo de acomodação 24,54 vezes mais rápido nas simulações do modelo proposto. Também nos testes em tempo real, obteve-se uma melhoria de 51,45% na potência total e um tempo de estabilização 4 vezes maior em comparação com os sistemas que utilizam controladores tradicionais. Além disso, o DT permitiu o treinamento em simulação, o que acelera o processo e permite operar independentemente das condições climáticas.
10	Yalçın et al.	2023	Exploiting Digitalization of Solar PV Plants Using Machine Learning: Digital Twin Concept for Operation	Propor um conceito de DT focado em operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, utilizando inteligência artificial e algoritmos de aprendizado de máquina.	O DT associado a técnicas de aprendizado de máquina otimizou o processo de geração de energia. Obteve-se um modelo capaz de simular o comportamento ideal de uma planta solar fotovoltaica e eficaz em detectar o mau funcionamento de diferentes componentes do sistema. Como dividiu-se o modelo em vários componentes, foi possível identificar e localizar os problemas com precisão, facilitando a correção de falhas e a tomada de decisões.
11	Jain et al.	2019	A Digital Twin Approach for Fault Diagnosis in Distributed Photovoltaic Systems	Apresentar uma abordagem de DT para diagnóstico de falhas de sistemas fotovoltaicos.	O DT foi programado para realizar a detecção de falhas mensurando o vetor residual de erro (diferença entre a saída de energia estimada e medida). Os resultados mostraram a detecção e identificação de dez tipos de falhas diferentes, sendo que o processo se deu de modo mais rápido, preciso e sensível do que nos sistemas reais comparados.

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

5 DISCUSSÃO

5.1 CONCEITUAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE DIGITAL TWINS (DTs)

A revisão permitiu elencar diferentes modelos de funcionamento da tecnologia DT que vêm sendo aplicados aos sistemas fotovoltaicos de energia. Destaca-se, na maior parte dos artigos, seu uso como ferramenta de simulação de diferentes níveis de complexidade, das mais simples, baseadas em mecanismos de jogos virtuais, às mais robustas, integradas a sistemas geográficos e a inteligência artificial. Quanto a isso, é importante frisar o difícil consenso acerca da conceituação dos DTs, justamente por abrangerem uma variedade de modelos, *softwares* e aplicações.

Clausen et al. (2022) mencionam como a falta de uma terminologia e classificação universal dos DTs dificulta sua compreensão e correta conceituação, havendo equívocos na literatura de atribuição de DT a outros tipos de tecnologias já existentes. Os autores evidenciam que a tecnologia em questão é multimodal, sendo pautada na capacidade de visualização, monitoramento, previsão e controle de objetos físicos, requerendo, portanto, conectividade e uso de sensores. Assim, outras ferramentas com menos atributos, e por vezes unimodais, não se enquadram como DT. Nesse sentido, faz-se razoável a diferenciação proposta por Kritzinger et al. (2018), que classifica os sistemas com menor grau de integração e complexidade em *Digital Model* (capazes de promover apenas a visualização do componente real) e *Digital Shadow* (capazes de promover visualização e monitoramento, porém com oferta de dados unidirecionalmente do componente físico para o virtual).

5.2 MODELOS DE DTS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

5.2.1 Integração com tecnologias complementares

Dentre os artigos revisados, foram apresentados variados modelos de *Digital Twin* adequados às definições de Clausen et al. (2022) e Kritzinger et al. (2018), com elevado grau de integração dos sistemas e comunicação bidirecional dos componentes envolvidos. Um bom exemplo foi trazido por Hong e Pula (2023),

que desenvolveram um modelo de DT capaz não somente de simular um sistema solar fotovoltaico, como também de detectar suas eventuais anomalias ou falhas em componentes e corrigi-las. O método proposto utilizou-se de simuladores digitais em tempo real denominados Opal-RT e MATLAB/Simulink, os quais realizavam a integração dos componentes e estabeleciam comparação entre suas potências elétricas que eram medidas simultaneamente. Qualquer mudança constatada no sistema físico era enviada ao sistema digital, sincronizando-os, e as correções das falhas eram então demandadas ao sistema físico. A comunicação, neste DT em questão, foi estabelecida através de LoRa (do inglês *Long Range*), um tipo de transmissão de dados sem fio, com longo alcance, que tem boa durabilidade e baixo custo.

Outro ponto comum aos artigos foi a integração de DTs a diferentes programas que permitiam a melhoria de seu potencial de simulação. No caso da aplicação em sistemas fotovoltaicos de energia, a integração a simuladores ambientais foi recorrente e demonstrou resultados positivos, principalmente em áreas urbanas (ZHAO et al., 2021; LEOPOLD; BRAUN; PINHEIRO, 2023; BOCULLO et al., 2023). Isso porque o rendimento energético desses tipos de sistemas depende diretamente de fatores meteorológicos, condições físicas e disposição de entes circundantes, os quais vêm a interferir no grau de irradiação, sombreamento e na dissipação de partículas sobre as placas, por exemplo.

No modelo proposto por Zhao et al. (2021), utilizou-se de BIM (Modelagem da Informação da Construção, do inglês *Building Information Modeling*) para aprimorar a simulação DT de um edifício em que se pretendia aumentar o aproveitamento fotovoltaico. A tecnologia BIM permitiu a replicação em 3D de características funcionais e físicas da construção, contribuindo com a avaliação da infraestrutura, custos e sustentabilidade envolvida em todo ciclo de vida do projeto. A partir da integração de DT com BIM foi possível calcular a disposição e angulação ideal das placas solares, aumentando a produção total de energia do edifício.

Leopold, Braun e Pinheiro (2023) e Bocullo et al. (2023), por sua vez, aumentaram a abrangência do espaço urbano avaliado, aplicando DTs a distritos e bairros inteiros. Para isso, utilizaram da integração com softwares e tecnologias geoespaciais gratuitas, que fornecem dados detalhados sobre um determinado local. Nos dois estudos aqui citados foram utilizados GIS (sistemas de informações geográficas, do inglês *Geographic Information Systems*) e a plataforma CityGML,

programa de dados baseado em XML que facilita a visualização, armazenamento e modelagem de cidades.

5.2.2 Inteligência artificial e Deep Learning (DL)

Outro aspecto relevante identificado nesta revisão foi a aplicação de técnicas de Deep Learning (DL), ou Aprendizagem Profunda, como estratégia de impulsionamento de resultados dos DTs. O DL opera através de algoritmos e consiste em “redes neurais de máquinas” capazes de auto-aprendizagem dos parâmetros ideais de funcionamento, enquadrando-se como um tipo de inteligência artificial (IA) (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016). Quando aplicado aos sistemas fotovoltaicos de geração de energia, sua principal funcionalidade apontada por Arafet e Berlanga (2021), Hong e Pula (2023) e Yang e Wang (2023), foi a detecção de falhas, possibilitada pelo abastecimento de informações lineares e não lineares que seus algoritmos ofertam aos DTs. Criam, assim, um ambiente de autoaprendizagem inteligente que resulta na evolução constante dos DTs.

Dentre os exemplos de DL apresentados pelos estudos estão os *Autoencoders*, ferramentas capazes de construir uma representação dimensional ideal dos sistemas em que estão conectados, através do monitoramento de informações atuais e do aprendizado de dados históricos (ARAFET; BERLANGA, 2021). Outro modelo utilizado foi o ConvMixer, uma proposta moderna de DL que se baseia na vetorização de componentes (no caso do estudo, painéis fotovoltaicos) e no processamento de múltiplas informações a partir de poucas variáveis treináveis, sendo capaz de aprendizado adaptável a condições de mudança constante (HONG; PULA, 2023). Também foram utilizadas as redes LSTM (Memória de curto e longo prazo, do inglês *Long Short-Term Memory*), tipo de DL adequada ao processamento e previsão de dados sequenciais, como, por exemplo, séries temporais na geração de energia fotovoltaica. Este tipo de DL foi descrito pelos autores como um modelo capaz de modelar sistemas de naturezas complexas e variáveis, contemplando, portanto, os sistemas solares fotovoltaicos uma vez que sofrem interferências diversas, advindas tanto de seu âmbito externo quanto interno (YANG; WANG, 2023).

Diante de tantas menções à contribuição dos DTs para o monitoramento e previsão de fatores externos provenientes do ambiente (ZHAO et al., 2021; ARAFET;

BERLANGA, 2021; CLAUSEN et al., 2022; CARR et al., 2023; HONG; PULA, 2023; YANG; WANG, 2023; LEOPOLD; BRAUN; PINHEIRO, 2023; BOCULLO et al., 2023), fica clara a aplicabilidade desta tecnologia como ferramenta de otimização da produção fotovoltaica. Porém, suas vantagens não se restringem ao controle de fatores externos, sendo também aplicáveis na esfera estrutural e interna dos sistemas. Nesse sentido, alguns exemplos encontrados pela revisão foram o melhoramento de componentes físicos (painéis e redes elétricas conectadas) por meio de cálculos de angulação (ZHAO et al., 2021) e potência máxima de funcionamento (ARTETXE et al., 2023), bem como o suporte à produção energética eficiente através da detecção de anomalias e falhas internas (JAIN et al., 2019; ARAFET; BERLANGA, 2021; CARR et al., 2023; HONG; PULA, 2023; YALÇIN et al., 2023).

Zhao et al. (2021) focaram seu trabalho na simulação do comportamento ideal de módulos fotovoltaicos em edifícios com necessidade quase nula de energia e obtiveram resultados animadores com o uso de inteligência proveniente de DT. Através de projeções digitais, foram capazes de calcular a otimização da geração de energia dos módulos fotovoltaicos em função de seus ângulos de instalação no edifício, permitindo a testagem de diversos cenários em ambiente virtual. Tal aplicação demonstra a capacidade dos DTs de promoverem melhorias ao comportamento dos componentes físicos com maior praticidade e menores custos, além de atuarem em favor da sustentabilidade ao servirem de apoio a sistemas renováveis de energia.

5.2.3 Contribuições dos DTs para a eficiência estrutural

Também Artetxe et al. (2023) demonstraram benefícios do uso de DT no aprimoramento de entidades físicas dos sistemas fotovoltaicos. Em seu estudo, fez-se uso de DT e DL para a obtenção de um modelo eficiente de controlador de potência máxima dos módulos, o qual baseou-se em estimativas de irradiância e temperatura. Os resultados foram bastante positivos, tanto na etapa de simulação quanto na etapa de testagem em sistemas físicos, demonstrando melhoria de 10,45% e 51,4%%, respectivamente, na potência total dos módulos fotovoltaicos reais avaliados, quando comparados a outros sistemas tradicionais. Diante disso,

evidencia-se também a confiabilidade dos DTs, tendo sido capazes, neste caso, de reproduzir as estimativas de seus componentes digitais em ambiente real.

5.2.4 Diagnóstico de falhas

Mas o grande destaque da aplicação de DTs em sistemas fotovoltaicos de energia se deu no âmbito do diagnóstico de falhas internas. Para se cumprir este objetivo, o método mais utilizado pelos estudos foi o de cálculo da diferença entre as saídas de energia estimadas nos DT e medidas nos sistemas físicos. A partir desta comparação eram gerados vetores residuais de erro, que serviam de apoio para a identificação precoce e pontual das anomalias (JAIN et al., 2019; ARAFET; BERLANGA, 2021; HONG; PULA, 2023).

Arafet e Berlanga (2021) comentam que ao analisar o tempo e a frequência da detecção de falhas através de seu modelo de DT, obtiveram-se melhorias nas duas variáveis com redução das perdas energéticas e dos erros de reconstrução. Porém, também afirmaram que o modelo ficou mais suscetível a oscilações não anômalas, sugerindo, então, mais testes em ambientes com condições especiais para que o DT consiga aprender situações mais específicas que podem repercutir em erros. Nesse sentido, o uso de DL e de simulações seriadas em ambiente digital controlado foram citados como soluções interessantes, sendo citados também por Hong e Pula (2023) e Artexte et al. (2023).

Yalçin et al. (2023), por sua vez, propuseram um modelo diferenciado de diagnóstico de falhas, focando na compartimentação do sistema fotovoltaico em pequenos modelos interligados. A ideia partiu da tese de que os desvios apontados pelos DTs são sensíveis, mas nem sempre específicos. Portanto, dividindo-se o sistema em pedaços de um todo é possível localizar com maior precisão a origem do problema, facilitando assim a tomada de decisões. No entanto, afirmam que tal método é mais complexo e necessita de muitos dados para a composição digital dos sistemas e para a monitorização das correntes elétricas. Dessa forma, a instalação de sensores adicionais requisitados pode elevar os custos do projeto.

Jain et al. (2019) também apresentaram uma abordagem de DT para diagnóstico de falhas em tempo real de sistemas fotovoltaicos. Os autores descreveram a detecção de dez tipos diferentes de falhas após os testes realizados

em um painel fotovoltaico, incluindo falhas incipientes. Os resultados obtidos foram bastante positivos, com redução do tempo de detecção e identificação dos problemas, demonstrando sensibilidade maior que outras abordagens existentes. Uma das grandes vantagens do modelo de detecção de falhas explorado pelos autores foi a adaptabilidade a diferentes arquiteturas de instalações fotovoltaicas, além de ser aplicável também em outros sistemas de conversão de energia, como por exemplo em uma bateria.

Carr et al. (2023) resumem bem as vantagens da aplicação de DT a sistemas fotovoltaicos no quesito detecção de falhas. Segundo os autores, os gêmeos são frequentemente usados para apoiar operações e manutenção de parques solares em grande escala, isso porque consistem em uma “cópia” em formato digital das entidades físicas, incluindo painéis, estação meteorológica, eletrônica de potência, sensores e arredores. A possibilidade de previsão de comportamento através dos DTs leva, portanto, a uma melhor compreensão do sistema real, tanto para a estimação da geração de energia quanto para a detecção de desvios, danos acidentais e degradações graduais.

5.3 BENEFÍCIOS E DESAFIOS DA APLICAÇÃO DE DTS

Convém, por fim, elencar as vantagens mais citadas pelos estudos revisados sobre a aplicação de DTs a sistemas solares fotovoltaicos. São elas: 1) o aperfeiçoamento desses sistemas de energia, tornando-os mais velozes, eficazes, precisos e inteligentes; 2) a contribuição indireta com a transição energética e a promoção da sustentabilidade, uma vez que o investimento em fontes renováveis de energia contribui para sua propulsão e, conseqüentemente, para a diminuição da emissão de gases estufa; 3) o apoio à tomada de decisão em pequena e grande escala, podendo ser utilizado dentro de usinas de micro e minigeração, assim como em grandes usinas solares, demonstrando a extensa adaptabilidade deste tipo de tecnologia e de seu potencial transformador nos mais diferentes cenários.

Deste modo, fica explícito que os DTs possuem inúmeras funcionalidades e aplicações em sistemas solares fotovoltaicos. Em síntese, os achados de destaque neste estudo foram o seu uso voltado ao monitoramento de condições ambientais e à detecção de falhas internas e externas. Em ambos os casos, a utilização concomitante de outras tecnologias foi determinante para a obtenção de

resultados precisos e confiáveis, como no caso de programas de monitoramento ambiental, simuladores digitais e uso de redes neurais baseadas em aprendizado profundo de máquinas. Isso demonstra a conectividade de funções a que as tecnologias, de modo geral, estão submetidas.

Desta forma, fica mais clara a complexidade dos DTs, o que justifica também a dificuldade de sua conceituação e de implementação, já que se trata de uma tecnologia recente com conformações diversas e integrações variadas a outros sistemas. Pode-se, sobretudo, entender os DTs como uma rede integrada de tecnologias funcionando com o fim de simulação inteligente, visando o melhoramento constante dos componentes real e digital de seu objeto de interesse. Ainda assim, há muito a se explorar e investigar sobre seu potencial no aperfeiçoamento e impulsionamento de fontes energéticas renováveis através de evidências científicas, como no caso deste estudo, com o propósito de evidenciar o uso de tecnologias que contribuem para a sustentabilidade e impulsionam a transição energética.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme os resultados obtidos pela revisão sistemática da literatura, o DT é uma ferramenta tecnológica inovadora que tem sido recentemente empregada no meio de produção fotovoltaica de energia, com aplicabilidades diversas e modelos de funcionamento que variam entre si. Destacaram-se as aplicações no aprimoramento dos sistemas energéticos aos quais estavam conectados, otimizando seu funcionamento através de cálculos probabilísticos de maior rendimento, projeções ambientais, além de previsão, classificação e detecção de falhas. Também se mostrou relevante o uso de programas de *Deep Learning* como tecnologia integrada capaz de potencializar seus resultados, os quais baseiam-se em algoritmos de inteligência artificial que auxiliam no aprendizado profundo de máquinas, promovendo uma automelhoria constante dos sistemas energéticos fotovoltaicos e, assim, contribuindo para o incentivo ao uso de energias renováveis.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir, são apresentadas propostas de temas que visam aprofundar o estudo sobre a aplicação da tecnologia Digital Twin (DT) em sistemas de energia renovável, com enfoque na energia fotovoltaica.

- Modelagem e Simulação de Manutenção Preditiva em Sistemas Fotovoltaicos usando Digital Twin.

Objetivo: Desenvolver modelos de manutenção preditiva baseados no Digital Twin para otimizar a previsão e correção de falhas em sistemas fotovoltaicos.

Justificativa: A manutenção preditiva, habilitada pela tecnologia DT, enfrenta desafios devido à variabilidade operacional e ambiental dos sistemas fotovoltaicos. A modelagem e simulação desses cenários permitiriam uma análise aprofundada da durabilidade e do comportamento do sistema, proporcionando uma gestão de manutenção mais eficiente.

- Aplicação de Digital Twin em Outras Fontes de Energia Renovável (e.g., Eólica, Hidrelétrica).

Objetivo: Avaliar a aplicabilidade do Digital Twin em fontes de energia renovável alternativas à solar, como energia eólica e hidrelétrica, investigando os benefícios e desafios específicos.

Justificativa: Expandir a aplicação do DT para outras fontes de energia renovável oferece a oportunidade de identificar práticas ideais de operação e manutenção, além de uma análise comparativa dos benefícios técnicos e econômicos da tecnologia em contextos distintos.

- Impacto do Digital Twin na Otimização Energética de Redes Inteligentes (Smart Grids).

Objetivo: Investigar a aplicação do DT na otimização de redes inteligentes (smart grids), visando melhorias na eficiência energética e redução de perdas.

Justificativa: As redes inteligentes demandam tecnologias avançadas que suportem a gestão de energia em tempo real. O DT, ao integrar-se com smart grids, pode prover melhorias substanciais em monitoramento, otimização e confiabilidade na distribuição energética.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, P. A. F. L.; GUIMARÃES, I. F. G. DESAFIOS NO USO DO DIGITAL TWIN NA CONSTRUÇÃO PRÉ-FABRICADA – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA. **REVISTA FOCO**, v. 16, n. 8, p. e2830, 15 ago. 2023.

ARMITAGE, A.; KEEBLE-ALLEN, D. Undertaking a structured literature review or structuring a literature review: tales from the field. **Electronic Journal of Business Research Methods**, v. 6, n. 2, p. 103-114, 2008.

BATISTA, D. M. S. **Modelação de sistemas fotovoltaicos**. 2023. Tese de Mestrado. Engenharia da Energia e Ambiente - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2023.

CAPES. Portal de Periódicos CAPES. **Sobre quem somos**. Disponível em: <<https://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php/sobre/quem-somos.html>> . Acesso em: 03 mai. 2013.

COMERIO, A. et al. Performance of photovoltaic generators under superficial dust deposition on their modules derived from anthropogenic activities. **Acta Scientiarum - Technology**, v. 43, p. 1–13, 2020.

CRESESB. **Energia Solar: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_solar.htm>. Acesso em: 29 Abr. 2024

DITZEL, L. F. S. et al. DIGITAL TWIN NA MANUFATURA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA / DIGITAL TWIN IN MANUFACTURE: A SYSTEMATIC REVIEW OF LITERATURE. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 66183–66197, 2020.

FERNÁNDEZ, G. et al. **Gemelo digital de una planta solar fotovoltaica**. [s.l.]. e_BUAH. Biblioteca digital Universidad de Alcalá, 2022.

FRONTONI, E. et al. Cyber Physical Systems for Industry 4.0: Towards Real Time Virtual Reality in Smart Manufacturing. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 10851 LNCS, p. 422–434, 2018.

GLAESSGEN, E.; STARGEL, D. **The digital twin paradigm for future NASA and U.s. air force vehicles**. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural

Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. **Anais...** Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep learning**. MIT press, 2016.

GRIEVES, M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. **White paper**, 1(2014), 1-7, 2014

JAIN, P. et al. A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic systems. **IEEE transactions on power electronics**, v. 35, n. 1, p. 940–956, 2020.

KRITZINGER, W. et al. Sihn. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. **IFAC-PapersOnLine**, v.51, pp. 1016–1022, 11 jan. de 2018.

MARTINELLI, T. F. **Sistema de aprendizado dinâmico de módulos fotovoltaicos baseado em digital twin**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Elétrica - Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

MORAES, C. **Célula Fotovoltaica: Tudo que Você Precisa Saber**. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>>. Acesso em: 8 maio. 2024.

NDIAYE, A. et al. Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. **Solar Energy**, v. 96, p. 140–151, 2013.

NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. **Procedia manufacturing**, 2017

NEOSOLAR. **Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes**. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>>. Acesso em: 25 abr. 2024.

OLIVEIRA JÚNIOR, P. D. DE et al. **Sistema de monitoramento para detecção de falhas em placas fotovoltaicas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Eletrônica e de telecomunicações - Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2018.

OLIVEIRA JUNIOR, A. A. DE. **A importância dos softwares de simulação dentro da Indústria 4.0: uma análise da inserção do Digital Twin nos contextos industriais**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia de Produção - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

PARROT, A.; WARSHAW, L. Industry 4.0 and the Digital Twin. [s.l.], **Delloite University Press**, 2017.

ROCHA, L. J. DA. **O Conceito de Digital Twin como Ferramenta de Apoio à Operação de Veículos Ferroviários**. 2022. 66f. Tese de Mestrado em Multimédia. Especialização em Tecnologias Interativas e Jogos Digitais – Universidade do Porto, Porto, 2022.

RÜBMANN, M. ET AL. Future of Productivity and Growth in Manufacturing. **Boston Consulting**, Abril, 2015. Disponível em: <https://web-assets.bcg.com/img-src/Industry_40_Future_of_Productivity_April_2015_tcm9-61694.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2024.

SAKURAI, R.; ZUCHI, J. D. AS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS ATÉ A INDÚSTRIA 4.0. **Revista Interface Tecnológica**, v. 15, n. 2, p. 480-491, 2018.

SMETS, A. et al. **Solar energy: the physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems**. v.12. England: Cambridge, UIT, 2016.

SOARES, B. E. A. **Planejamento de manutenção em sistemas fotovoltaicos conectados à rede: um estudo voltado para as usinas da UFRN**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SILVA, A. P. M.; RIBEIRO, L. E. **Sensoriamento remoto de potência para o sistema fotovoltaico conectado à rede do escritório verde da UTFPR**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SOLARIZE. **Manual de Energia Solar**. Publicado em 15 mar. 2019. Disponível em: <<https://www.solarize.com.br/site-content/11-blog/288-manual-de-energia-solar-288>>. Acesso em: 29 abr. 2024.

TALKHESTANI, B. A. et al. An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-physical production system. **at - Automatisierungstechnik**, v. 67, n. 9, p. 762–782, 2019

URBANETZ, J.; CASAGRANDE, E. **Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR**. In: VIII CBPE–Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Curitiba 2012.

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: [s.n.].

WATANABE, A. **MODELAGEM DE UMA PLANTA VIRTUAL DE PRODUÇÃO DE PCBs VIA DIGITAL TWIN DENTRO DO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0.** 2019. 92 f. Programa de pós-graduação–IFSC, Florianópolis, 2019.

YAO, T. et al. A photovoltaic power output dataset: Multi-source photovoltaic power output dataset with Python toolkit. **Solar energy (Phoenix, Ariz.)**, v. 230, p. 122–130, 2021.