

Ano V, v.2 2025 | submissão: 28/11/2025 | aceito: 30/11/2025 | publicação: 02/12/2025

Estudo Bibliométrico de Gêmeos Digitais no Setor Energético Solar

Bibliometric Study Of Digital Twins In The Solar Energy Sector

Lucas Emanuel Almeida Barboza– Universidade Federal de Pernambuco

Resumo

Os Gêmeos Digitais (GD) representam uma tecnologia emergente capaz de emular sistemas reais em ambientes virtuais, oferecendo soluções promissoras para o setor energético. Este trabalho apresenta uma análise bibliométrica sobre a aplicação de Gêmeos Digitais no setor de energia solar, visando identificar tendências, lacunas e principais tópicos de pesquisa. A metodologia baseou-se na coleta de dados nas bases Web of Science e Scopus, abrangendo o período de 2009 a 2024, seguida pelo processamento de correlação de termos através do *software* VOSviewer. Os resultados indicam que o tema é recente e em crescimento, com foco predominante no gerenciamento de sistemas, otimização de performance e uso intensivo de *Machine Learning* para previsão de recursos solares e potência. Conclui-se que a pesquisa na área está intrinsecamente ligada à modernização das usinas e eficiência operacional, apontando para um vasto campo de investigações futuras.

Palavras-chave: Gêmeos Digitais. Energia Solar. Bibliometria. VOSviewer. Otimização.

Abstract

Digital Twins (DT) represent an emerging technology capable of emulating real systems in virtual environments, offering promising solutions for the energy sector. This paper presents a bibliometric analysis of Digital Twins applications in the solar energy sector, aiming to identify trends, gaps, and main research topics. The methodology relied on data collection from Web of Science and Scopus databases, covering the period from 2009 to 2024, followed by term correlation processing using VOSviewer software. Results indicate that the topic is recent and growing, with a predominant focus on system management, performance optimization, and intensive use of Machine Learning for solar resource and power forecasting. It is concluded that research in the area is intrinsically linked to plant modernization and operational efficiency, pointing to a vast field for future investigations.

Keywords: Digital Twins. Solar Energy. Bibliometrics. VOSviewer. Optimization.

1. INTRODUÇÃO

Os Gêmeos Digitais (GD) são um conjunto de modelos adaptativos que emulam o comportamento de um sistema real em um ambiente virtual, utilizando medições de sensores para acompanhar o ciclo de vida dos equipamentos (SEMERARO et al., 2021). A partir do GD, análises eficazes e mais economicamente viáveis podem ser realizadas em áreas como aperfeiçoamento do sistema, detecção de falhas e planejamento de manutenções.

Os gêmeos digitais são uma das atuais tecnologias de maior impacto (SLEITI et al., 2022) e são uma tendência em aplicações de alta complexidade (YAO et al., 2023). O setor energético figura entre uma das principais áreas de aplicação dos gêmeos digitais (TAO et al., 2022), no qual serão fundamentais na modernização das usinas, resultando em redução de custos operacionais e melhoramento de gestão (GHENAI et al., 2022).

Tendo em vista a relevância do tema para o setor energético e que as publicações sobre o assunto são bastante recentes, um levantamento das principais áreas correlatas é uma estratégia importante para fomentar a pesquisa. Isso permite entender melhor quais tópicos estão mais

Ano V, v.2 2025 | submissão: 28/11/2025 | aceito: 30/11/2025 | publicação: 02/12/2025

relacionados ao tema. Nesse sentido, este trabalho se propõe a ser uma análise bibliométrica sobre gêmeos digitais no contexto do setor energético solar.

A bibliometria é uma técnica de pesquisa que utiliza métodos estatísticos para analisar e medir a literatura publicada (BROADUS, 1987). Ela é relevante porque permite quantificar o impacto e a relevância de um campo de pesquisa, identificar tendências emergentes, e entender a estrutura e a dinâmica do campo (MINGERS e LEYDESDORFF, 2015). No caso deste trabalho, a bibliometria será importante para identificar e analisar as principais tendências e tópicos na literatura sobre gêmeos digitais no setor energético solar.

2. MARCO TEÓRICO

No setor de energia solar, o tema dos Gêmeos Digitais é bastante recente e apresenta diversas ramificações de pesquisa. A literatura atual demonstra que a maioria das investigações aborda o desenvolvimento de GD para subsistemas específicos.

Artetxe et al. (2023), Gui et al. (2023) e Ullah et al. (2023) focam seus estudos em inversores, enquanto Khaled et al. (2020) dedicam-se aos módulos fotovoltaicos. Além dos componentes isolados, há uma forte vertente voltada para o gerenciamento e controle da planta como um todo, conforme explorado por diversos autores (GUO et al., 2023; HUANG et al., 2023; LI et al., 2023; TUOMIRANTA et al., 2021; YOU et al., 2022; YUAN e XIE, 2023).

Outra área de destaque é a análise de performance, investigada por Hong e Pula (2023) e Natgunanathan et al. (2023). Existem ainda outras aplicações diversas que compõem o estado da arte atual (CHENG et al., 2023; RAZO et al., 2020; SEHRAWAT et al., 2023), demonstrando a versatilidade da tecnologia na área fotovoltaica.

3. MATERIAL E MÉTODO

Para a realização deste estudo bibliométrico, foram utilizadas as informações das bases de dados do Scopus e do Web of Science como fontes primárias de dados.

Inicialmente, as bases foram consultadas utilizando a query de busca: “Digital Twin AND (Solar Energy OR Solar PV OR Solar Power)”. O objetivo foi encontrar títulos que possuíssem tais palavras-chave no título ou no resumo. Essa abordagem garante que o foco seja em artigos cujo tema principal seja gêmeos digitais no setor energético solar, evitando artigos que mencionem GD apenas brevemente em outro contexto do setor solar.

Ano V, v.2 2025 | submissão: 28/11/2025 | aceito: 30/11/2025 | publicação: 02/12/2025

Posteriormente, os dados extraídos serviram como entrada para o software VOSviewer, utilizado para organizar, visualizar redes bibliométricas e entender quais tendências de pesquisa estão mais correlatas ao tema dos gêmeos digitais no setor energético solar.

Uma análise qualitativa complementar dos principais problemas estudados pelos títulos das bases de dados foi realizada utilizando a ferramenta GPT-4 para examinar os resumos dos títulos encontrados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da consulta são apresentados na Tabela 1. É notável que a literatura sobre o tema começou a surgir em 2009 em ambas as bases de dados, o que evidencia o quão recente é a abordagem do conceito. A quantidade de títulos encontrados é similar nas duas bases, com 162 títulos na Web of Science e 141 na Scopus. Além disso, o total de citações por base para os títulos encontrados durante o período de estudo é em torno de 1000, com 1018 citações na Web of Science e 892 na Scopus.

Tabela 1. Resultados da Consulta nas Bases de Dados.

Base de Dados	Período de Ocorrência dos Títulos	Citações	Total de Títulos Encontrados
<i>Web of Science</i>	2009 - 2024	1018	162
<i>Scopus</i>	2009 - 2024	892	141

Fonte: Os autores.

Em seguida, os resultados das consultas às bases de dados foram utilizados como entrada para a análise de termos correlatos conduzida pelo software VOSViewer. Na base de dados da Web of Science, foram identificados 967 termos, enquanto na Scopus, foram encontrados 1532 termos. Desses, o VOSViewer selecionou 12 termos da Web of Science e 16 termos da Scopus para análise.

Esses termos selecionados atendem ao critério de relevância, considerando a correlação entre eles e a frequência mínima de ocorrências simultâneas no título e no resumo dos artigos. Os limites mínimos de ocorrência estabelecidos foram de 8 para a análise da Web of Science e de 12 para a Scopus.

As Figuras 1 e 2 apresentam os mapas dos termos correlatos gerado pelo VOSViewer, onde cada cor representa um agrupamento de termos e o tamanho do círculo a magnitude da correlação.

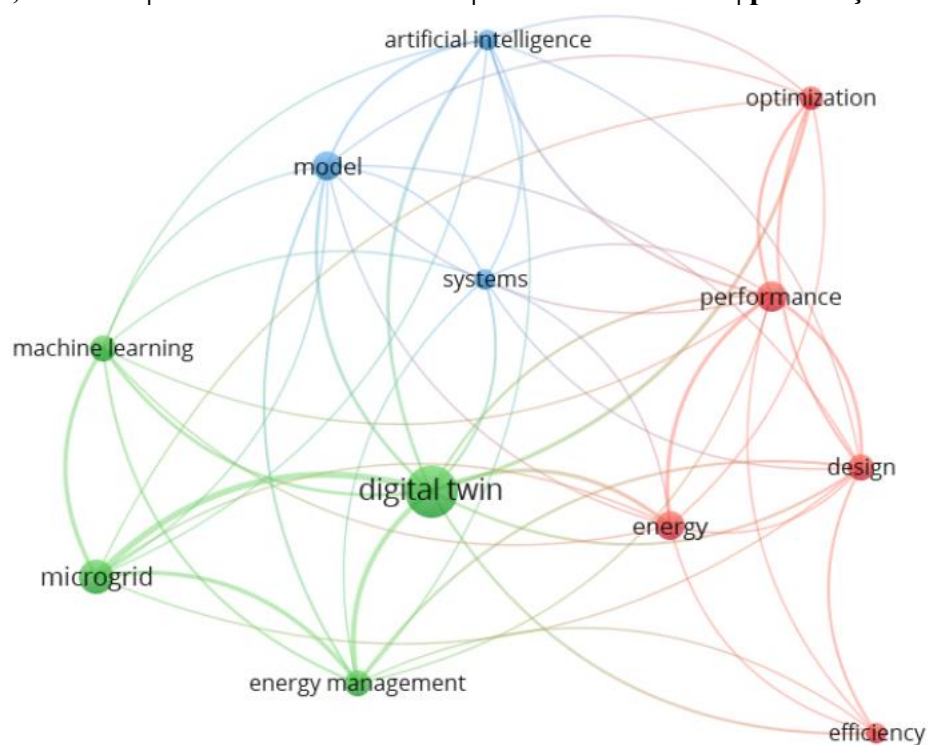


Figura 1. Mapa de Correlação de Termos encontrado a partir da consulta de títulos pela Web of Science, utilizando uma ocorrência mínima de palavras-chave de 8.

Na Figura 1, é perceptível, pelo tamanho dos círculos, que os termos microgrid, performance, model e machine learning são extremamente correlacionados ao estudo de gêmeos digitais no setor de energia solar. Isso sugere que o desenvolvimento dos GD envolve a utilização de diversos modelos, inclusive de machine learning, visando aprimorar o desempenho do sistema.

Uma observação interessante é que os termos agrupados em vermelho sugerem que os gêmeos digitais têm sido aplicados nos sistemas de energia solar com o objetivo de melhorar o desempenho energético (performance), a partir de diversas otimizações que promovem eficiência (optimization e efficiency), e isso está sendo feito desde a fase de desenho do projeto (design).

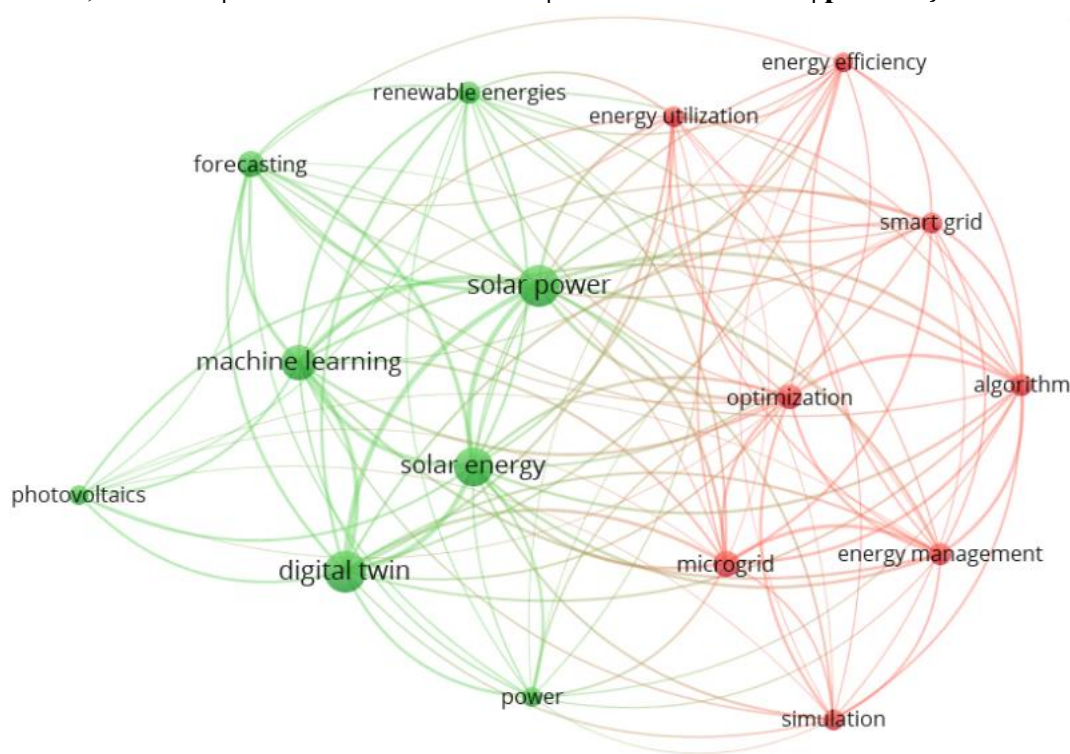


Figura 2. Mapa de Correlação de Termos encontrado a partir da consulta de títulos pela Scopus, utilizando uma ocorrência mínima de palavras-chave de 12.

Por outro lado, na Figura 2, excluindo-se os termos esperados *solar power* e *solar energy*, os termos *machine learning*, *forecasting*, *optimization* e *energy management* também sugerem a utilização de modelos para aprimorar o gerenciamento do sistema. Além disso, uma conclusão que pode ser extraída do agrupamento verde é que as áreas de previsão e *machine learning* são extremamente relevantes para a área de gêmeos digitais no setor de energia solar, inclusive fotovoltaica.

Por fim, os resultados da análise qualitativa dos resumos via GPT-4 para a Web of Science são apresentados na Tabela 2. Os temas predominantes estão associados à aplicação de Gêmeos Digitais para aprimorar o gerenciamento dos sistemas solares, com um enfoque particular em modelos de previsão do recurso solar e da potência gerada.

Ano V, v.2 2025 | submissão: 28/11/2025 | aceito: 30/11/2025 | publicação: 02/12/2025

Tabela 2. Principais problemas analisados nos títulos da Web of Science.

Problema	Descrição
Gestão de Recursos de Energia Distribuída	Abordagem para entender e gerenciar a natureza dinâmica das plantas de energia solar fotovoltaica devido à variabilidade e incerteza geradas pelas condições climáticas.
Otimização de Operações de Plantas Fotovoltaicas	Utilização de métodos de inteligência artificial para criar modelos de previsão de curto prazo para otimizar as operações e controles de plantas fotovoltaicas.
Melhoria da Eficiência Operacional	Desenvolvimento de algoritmos de aprendizado de máquina para melhorar a operação e eficiência das plantas fotovoltaicas e detectar precocemente possíveis falhas nos componentes.
Maximização do Ponto de Máxima Potência (MPPT)	Implementação de controle baseado em aprendizado por reforço para aumentar a velocidade e eficiência dos controladores MPPT em sistemas de energia solar.

Fonte: Os autores.

Por sua vez, a Tabela 3 revela os problemas mais estudados na Scopus. Assim como na Web of Science, observa-se uma ênfase no uso de Gêmeos Digitais para a previsão do recurso e da potência, com um adicional na análise da carga de consumo.

Tabela 3. Principais problemas analisados nos títulos da Scopus.

Problema	Descrição
Previsão de Carga	Desenvolvimento de modelos de previsão de carga a curto prazo para redes inteligentes baseadas em energia solar, com foco na quantificação da incerteza e maximização da modelagem do intervalo de previsão.
Otimização de Desempenho	Uso de algoritmos de otimização, como o <i>White Shark Optimizer</i> , para melhorar o desempenho dos modelos de previsão.
Análise de Recurso Solar	Identificação dos dados meteorológicos mais relevantes para a previsão da geração de energia fotovoltaica.
Melhoria da Precisão de Previsão	Combinação de redes neurais convolucionais paralelas e redes de memória de longo e curto prazo bidirecionais para prever a geração de energia fotovoltaica e usar dados em tempo real para correção.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho realizou um estudo bibliométrico sobre gêmeos digitais no setor de energia solar, utilizando informações extraídas dos títulos das bases de dados Web of Science e Scopus. Foi observado que a presença de títulos relacionados a este tema nas bases de dados estudadas é um fenômeno recente, iniciando-se em 2009, o que destaca a novidade e a relevância emergente deste

Ano V, v.2 2025 | submissão: 28/11/2025 | aceito: 30/11/2025 | publicação: 02/12/2025

campo de estudo. Isso também indica uma necessidade de pesquisas adicionais, já que existem muitos temas que ainda precisam ser estudados.

Vale ressaltar que o estudo bibliométrico apresentado também forneceu mapas de termos correlatos, que servem como um guia para identificar os tópicos mais relevantes quando se trata de GD no contexto da energia solar. A partir desses mapas, foi possível discernir que as principais aplicações estão focadas principalmente no gerenciamento dos sistemas, visando uma otimização energética. Para isso, diversos modelos são utilizados, sendo os modelos de *machine learning* os mais destacados.

É importante destacar também que, utilizando o GPT-4, foi realizada uma análise dos principais problemas estudados nos títulos da Web of Science e Scopus. Os principais problemas, de uma forma geral, estavam relacionados a uma otimização do gerenciamento do sistema, com foco nas previsões do recurso solar, da potência gerada e da carga. Para isso, utilizando principalmente modelos de otimização e de *machine learning*.

Essas descobertas sugerem que a implementação de gêmeos digitais no setor de energia solar está intrinsecamente ligada ao uso de técnicas avançadas de modelagem e otimização. Isso ressalta a importância da pesquisa contínua e do desenvolvimento de novas abordagens e tecnologias nesta área emergente e de rápido crescimento. A análise bibliométrica realizada neste trabalho, portanto, fornece uma base para futuras investigações neste promissor campo de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ARTETXE, E.; URALDE, J.; BARAMBONES, O.; CALVO, I.; MARTIN, I. Maximum Power Point Tracker Controller for Solar Photovoltaic Based on Reinforcement Learning Agent with a Digital Twin. **Mathematics**, v. 11, 2023. DOI: 10.3390/math11092166.

BROADUS, R. N. Toward a definition of “bibliometrics.” **Scientometrics**, v. 12, p. 373–379, 1987. DOI: 10.1007/BF02016680.

CHENG, T.; ZHU, X.; YANG, F.; WANG, W. Machine learning enabled learning-based optimization algorithm in digital twin simulator for management of smart islanded solar-based microgrids. **Solar Energy**, v. 250, p. 241–247, 2023. DOI: 10.1016/j.solener.2022.12.040.

GHENAI, C.; HUSEIN, L. A.; AL NAHLAWI, M.; HAMID, A. K.; BETTAYEB, M. Recent trends of digital twin technologies in the energy sector: A comprehensive review. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 54, 2022. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102837.

GUI, Y. et al. Automatic voltage regulation application for PV inverters in low-voltage distribution grids – A digital twin approach. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 149, 109022, 2023. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109022.

GUO, Z. et al. Intelligent Digital Twin Modelling for Hybrid PV-SOFC Power Generation System. **Energies**, v. 16, 2023. DOI: 10.3390/en16062806.



Ano V, v.2 2025 | submissão: 28/11/2025 | aceito: 30/11/2025 | publicação: 02/12/2025

HONG, Y. Y.; PULA, R. A. Diagnosis of PV faults using digital twin and convolutional mixer with LoRa notification system. **Energy Reports**, v. 9, p. 1963–1976, 2023. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.01.011.

HUANG, J.; KOROTEEV, D. D.; RYNKOVSKAYA, M. Machine learning-based demand response in PV-based smart home considering energy management in digital twin. **Solar Energy**, v. 252, p. 8–19, 2023. DOI: 10.1016/j.solener.2023.01.044.

KHALED, N.; PATTEL, B.; SIDDIQUI, A. Digital twin model creation of solar panels. In: *Digital Twin Development and Deployment on the Cloud*. Elsevier, 2020. p. 137–162. DOI: 10.1016/b978-0-12-821631-6.00006-2.

LI, Y.; TAO, Q.; GONG, Y. Digital twin simulation for integration of blockchain and internet of things for optimal smart management of PV-based connected microgrids. **Solar Energy**, v. 251, p. 306–314, 2023. DOI: 10.1016/j.solener.2023.01.013.

MINGERS, J.; LEYDESDORFF, L. A review of theory and practice in scientometrics. **European Journal of Operational Research**, v. 246, p. 1–19, 2015. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.04.002.

NATGUNANATHAN, I. et al. Deakin Microgrid Digital Twin and Analysis of AI Models for Power Generation Prediction. **Energy Conversion and Management: X**, 100370, 2023. DOI: 10.1016/j.ecmx.2023.100370.

RAZO, D. E. G. et al. A genetic algorithm approach as a self-learning and optimization tool for PV power simulation and digital twinning. **Energies**, v. 13, 2020. DOI: 10.3390/en13246712.

SEHRAWAT, N.; VASHISHT, S.; SINGH, A. Solar irradiance forecasting models using machine learning techniques and digital twin: A case study with comparison. **International Journal of Intelligent Networks**, v. 4, p. 90–102, 2023. DOI: 10.1016/j.ijin.2023.04.001.

SEMERARO, C.; LEZOCHE, M.; PANETTO, H.; DASSISTI, M. Digital twin paradigm: A systematic literature review. **Computers in Industry**, v. 130, 2021. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103469.

SLEITI, A. K.; KAPAT, J. S.; VESELY, L. Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems. **Energy Reports**, v. 8, p. 3704–3726, 2022. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.02.305.

TAO, F.; XIAO, B.; QI, Q.; CHENG, J.; JI, P. Digital twin modeling. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 64, p. 372–389, 2022. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.06.015.

TUOMIRANTA, A. et al. Auto-Parametrizing the Digital Twin of Photovoltaic Power Systems. In: *38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2021. p. 1022–1027. DOI: 10.4229/EUPVSEC20212021-5DO.1.4.

ULLAH, S. M. S. et al. Techno-economic impacts of Volt-VAR control on the high penetration of solar PV interconnection. **Cleaner Energy Systems**, v. 5, 100067, 2023. DOI: 10.1016/j.cles.2023.100067.

YAO, J. F. et al. Systematic review of digital twin technology and applications. **Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art**, v. 6, 2023. DOI: 10.1186/s42492-023-00137-4.



Ano V, v.2 2025 | submissão: 28/11/2025 | aceito: 30/11/2025 | publicação: 02/12/2025

YOU, M. et al. Digital twins based day-ahead integrated energy system scheduling under load and renewable energy uncertainties. **Applied Energy**, v. 305, 2022. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117899.

YUAN, G.; XIE, F. Digital Twin-Based economic assessment of solar energy in smart microgrids using reinforcement learning technique. **Solar Energy**, v. 250, p. 398–408, 2023. DOI: 10.1016/j.solener.2022.12.031.