

(07-010) - Different scenarios for the digital twin model applied to a photovoltaic system

Dimitrova Angelova, Dorotea ¹; Carmona Fernández, Diego ¹; Jaramillo Morán, Miguel Ángel ¹; Calderón Godoy, Manuel ¹; González, Juan Félix ¹

¹ Universidad de Extremadura

The development of the Digital Twin (DT) design model applied to a photovoltaic (PV) installation is presented. The mathematical model of the DT is defined, the data acquisition procedure as input to the DT, such data are the temperature and irradiance to which the real PV installation is exposed. The PV power generated from the real installation is compared with the PV power generated by the DT. The platform is defined to carry out the DT and to make the comparison of the real PV installation response and that of the DT. With the result of this comparison, different application scenarios of this design are proposed and developed. The proposed scenarios are: management of renewable energy generated and consumed by the installation, production optimization, prediction of generated power, detection and classification of failures in the PV installation. This study shows the benefits of applying the DT approach to a PV installation to maximize the efficiency and profitability of photovoltaic renewable energy.

Keywords: "photovoltaic installation"; "simulation scenarios"; "digital twin"

Diferentes escenarios para el modelo de gemelo digital aplicado a una instalación fotovoltaica

Se presenta el desarrollo del modelo del diseño de Digital Twin (DT) aplicado a una instalación fotovoltaica (PV). Se define el modelo matemático del DT, el procedimiento de adquisición de datos como entrada al DT, dichos datos son la temperatura e irradiancia a la que está expuesta la instalación PV real. La potencia fotovoltaica generada de la instalación real se compara con la potencia fotovoltaica generada por el DT. Se define la plataforma para llevar a cabo el DT y para hacer la comparación de la respuesta real de la instalación PV y la del DT. Con el resultado de esta comparación se plantean y desarrollan distintos escenarios de aplicación de dicho diseño. Los escenarios propuestos son, gestión de energía renovable generada y consumida de la instalación, optimización de la producción, predicción de potencia generada, detección y clasificación de fallos en la instalación PV. Con este estudio se pone de manifiesto los beneficios de aplicar el enfoque de DT a una instalación PV para maximizar la eficiencia y la rentabilidad de la energía renovable fotovoltaica.

Palabras clave: "instalación fotovoltaica"; "escenarios de simulación"; "gemelo digital"

Correspondencia: Juan Félix González González, jfelixgg@unex.es

Agradecimientos: We acknowledge the economic support to "Proyecto TED2021-132326B-I00, Proyectos Estratégicos Orientados a la «Transición Ecológica y a la Transición Digital», financiado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/ PRTR"



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La capacidad renovable instalada en todo el mundo tendrá que pasar de los 3.382 GW de 2022 a 11.174 GW para 2030, en este contexto el 90% de la capacidad de energía renovable añadida se corresponde a la energía solar fotovoltaica (PV) y a la eólica. Según el informe de International Renewable Energy Agency (IRENA) (Renewable Energy Agency & Renewables Alliance, n.d.).

De ahí, la importancia de seguir investigando en nuevos enfoques que impliquen la digitalización de las instalaciones PV para su gestión y monitorización, pudiendo así sacar el máximo rendimiento de dichas instalaciones (Di Silvestre et al., 2018). Además, es imprescindible analizar el comportamiento de los consumidores, su patrón de consumo de energía, para poder tomar medidas que permitan la gestión del equilibrio de la generación y el consumo de energía (Onile et al., 2021).

Hay muchos factores que pueden afectar al funcionamiento y, por lo tanto, a la generación de energía de la instalación PV. Dichos factores pueden ser: entre otros: la suciedad acumulada en los paneles, la temperatura ambiente, la irradiancia, sombras parciales o totales, roturas de las celdas solares o los diodos de bypass, fallos en el cableado, degradación inducida por potencial (PID), etc. (Yang et al., 2010).

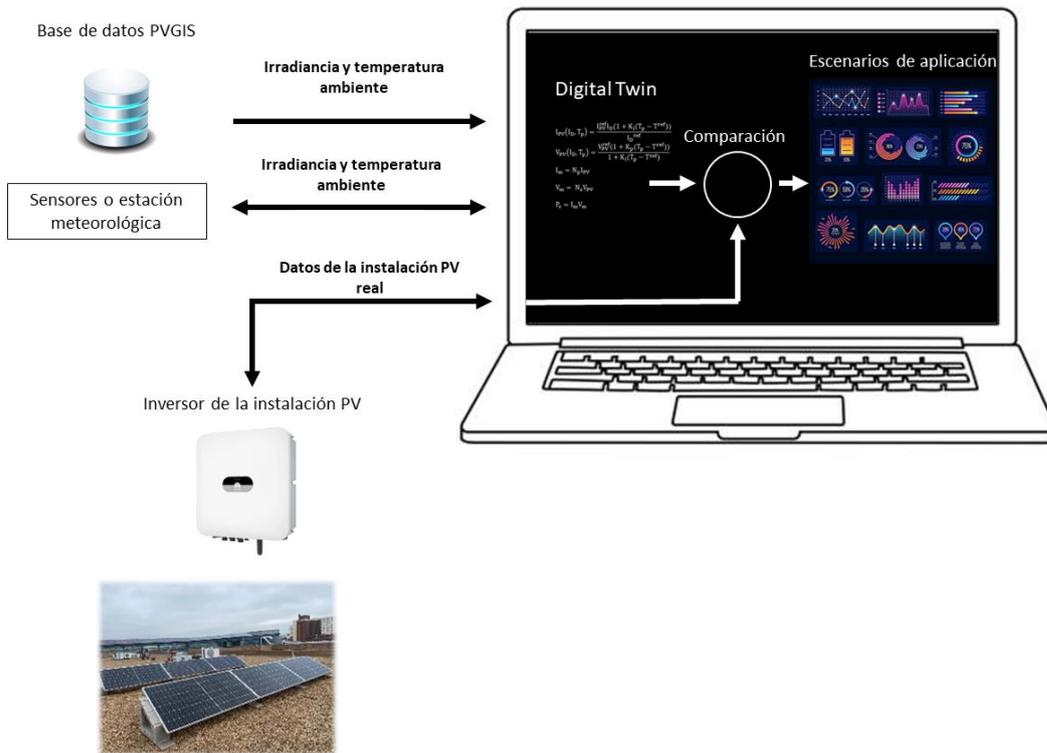
En este escenario, en las últimas décadas las tecnologías experimentaron un gran avance en el uso del enfoque de Digital Twin (DT), permitiendo en tiempo real, la supervisión, control y gestión de los sistemas eléctricos (Onile et al., 2021). El Internet of Things (IoT) permite que, a través de la sensorización de objetos reales, se puedan recopilar y compartir datos del mundo real al mundo digital gracias a la conectividad de redes (Institute of Electrical and Electronics Engineers, n.d.; Stark et al., 2017).

Utilizar Gemelos Digitales en la gestión y supervisión de operaciones supone evitar pérdidas anuales de 1.000 millones de dólares en activos desplegados, según la empresa General Electric (Saracco, 2019). Se estima que el valor de la industria mundial de Gemelos Digitales incrementará su valor de 6.500 millones de dólares en 2021 a 125.700 millones de dólares en 2030 (Yana Arnautova, 2023). En su aplicación a instalaciones PV, la adquisición de datos propios de la instalación y de las variables de las condiciones exteriores que la afectan, se puede llevar a cabo mediante con datos históricos de PVGIS con valores de irradiancia y temperatura media en un periodo de tiempo establecido (Yalçın et al., 2023), analizadores de datos, medidores de potencia, estaciones meteorológicas, piranómetros, sensores de temperatura, etc. De forma que la tecnología de DT aplicada a instalaciones fotovoltaicas permite la correcta monitorización y gestión de la energía.

En este trabajo se define el modelo de DT basado en ecuaciones matemáticas, así como las variables de las que depende la producción fotovoltaica y se valida dicho modelo en entorno

real. Se determinan los datos y la forma de adquisición de los datos necesarios del mundo real, ya que la salida del DT debe estar referida a las mismas variables que definen de forma significativa el sistema real (Glaessgen & Stargel, n.d.). Para la prueba en entorno real se compara la potencia PV de la instalación ubicada en la cubierta de la Escuela de Ingenierías Industriales (Universidad de Extremadura) montada para este fin y la potencia del DT ante los mismos factores externos.

Figura 1. Esquema de aplicación de la tecnología de Digital Twin en instalaciones PV.



2. Objetivos

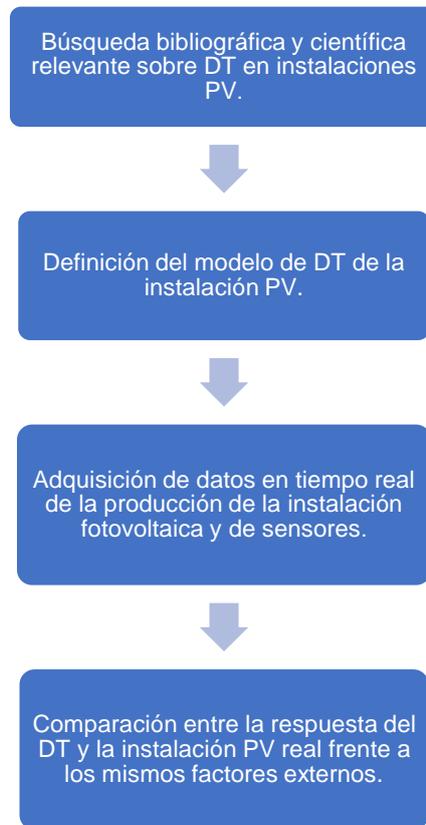
El objetivo de este trabajo es validar el modelo de Digital Twin de una instalación PV conectada a red basado en modelo matemático. De forma que dicho modelo servirá de base, para poder conseguir la supervisión, control y gestión de la energía generada y consumida, de la instalación PV de la Escuela Ingenierías Industriales de Badajoz, mediante el uso de la tecnología de Digital Twin. Para ello, en este trabajo se parte de una exhaustiva búsqueda bibliográfica de otro trabajo anterior (Dimitrova Angelova et al., 2024) sobre aplicaciones de DT a instalaciones fotovoltaicas. Además, se analizan y se evalúan las variables que afectan a la producción PV, así como el proceso de comunicación y adquisición de datos.

3. Metodología

Primero se parte de la búsqueda bibliográfica científica relevante sobre DT aplicados a instalaciones fotovoltaicas de otro trabajo previo (Dimitrova Angelova et al., 2024) y se define el modelo matemático del DT. Después, se recopilan datos de los sensores que proporcionan las variables de entrada al DT del exterior (mundo real) y/u otra información necesaria. Y, por último, se realiza la validación del modelo de DT, comparando la respuesta del DT y la

instalación PV real, en la Figura 2 se puede ver un esquema de la metodología seguida en este trabajo.

Figura 2: Esquema de la metodología seguida en este trabajo.



Para poder seguir con la investigación de aplicación de la tecnología de DT a las instalaciones fotovoltaicas llevada a cabo en (Dimitrova Angelova et al., 2024) y poder llevar a la práctica el diseño teórico de aplicación de DT descrito en este artículo, se ha proyectado una instalación fotovoltaica de 2,79 kWp (Figura 3). Dicha instalación se encuentra ubicada en la cubierta de la Escuela de Ingenierías Industriales (Universidad de Extremadura), suministrando actualmente de energía renovable al laboratorio de Termodinámica (Proyectos).

Figura 3. Foto de la instalación PV real ubicada en la cubierta de la Escuela de Ingenierías Industriales (Universidad de Extremadura).



Se trata de una instalación con capacidad para autoconsumo, vertido a red y almacenamiento de energía en baterías. La instalación tiene una inclinación de 30° al sur y está formada por seis paneles monocristalinos JA SOLAR JAM72S20 de 465 Wp dispuesto en serie y un inversor HUAWEI SUN2000-5KTL-M1 trifásico de 2,79 kW.

El sensor utilizado para recibir datos de irradiancia es el piranómetro de Kipp & Zonen, de la serie CMP, concretamente el CMP 11 (Figura 4). Los datos de temperatura ambiente se han tomado del sistema de gestión de bases de datos derivado de MySQL de código abierto, MariaDB.

Figura 4: Piranómetro de Kipp & Zonen serie CMP 11 con una inclinación de 30° al sur ubicado en la cubierta de la Escuela de Ingenierías Industriales de Badajoz.



4. Resultados

El enfoque de DT aplicado a la gestión de energía se ha estudiado en varios trabajos (Al-Isawi et al., 2023; Yuan & Xie, 2023). El inversor proporciona información del flujo de energía en el laboratorio de Termodinámica (Proyectos), por lo tanto, según el tipo de tarifa contratada se puede saber en tiempo real, la energía fotovoltaica generada y consumida en el laboratorio, así como la energía consumida y vendida a la red eléctrica en cada periodo de dicha tarifa incluyendo el coste final para el usuario. Para poder llevar a la práctica dicho estudio primero se debe validar el modelo de DT escogido. En este trabajo se compara la respuesta del Gemelo Digital y la respuesta de la instalación fotovoltaica real frente a factores externos tales como temperatura e irradiancia para un día nublado y un día soleado.

4.1 Comunicación y adquisición de datos

La energía generada por la instalación fotovoltaica depende, de entre otros muchos factores, de la radiación solar y la temperatura ambiente a la que están expuestos los módulos fotovoltaicos (Vera-Dávila et al., 2018). El DT tiene que recibir los mismos datos de las variables del exterior que afectan al sistema real (Khaled et al., 2020). Por lo tanto, se necesita una estación meteorológica o sensores de irradiancia y temperatura que envíen datos de las condiciones meteorológicas

La comunicación y la adquisición de datos del exterior, se puede realizar utilizando históricos de datos de la base de PVGIS de valores de irradiancia y temperatura, utilizando sensores de temperatura e irradiancia, estación meteorológica, etc. En el caso de la instalación PV de la cubierta de la Escuela de Ingenierías Industriales de Badajoz se descargan en una hoja de Excel los datos de irradiancia y temperatura del piranómetro CMP 11 y la base de datos MariaDB.

Para la adquisición de datos de la instalación PV real se utiliza la aplicación de Huawei (FusionSolar), para descargar en otra hoja Excel los datos de producción de la instalación PV en una hoja Excel para un periodo de tiempo determinado.

4.2 Modelo matemático del DT

El concepto de Digital Twin se lleva usando desde hace décadas, el primero en utilizar el concepto o enfoque de DT fue el programa espacial Apolo de la NASA (Liu et al., 2021). El gemelo digital representa una emulación digital de un sistema físico que, analíticamente, calcula los valores medibles de las distintas salidas del sistema físico en tiempo real, pudiendo estar basado en modelos, en datos o en una combinación de ambos (Glaessgen & Stargel, n.d.).

En la literatura se pueden encontrar diferentes artículos que estudian y simulan el comportamiento de la curva I-V utilizando el modelo de un diodo simple para estudiar la célula fotovoltaica o basándose en los datos de la hoja de característica del panel, con el fin de proporcionar un modelo que se ajuste más al comportamiento real del panel fotovoltaico ante las diferentes condiciones de temperatura e irradiancia.

En los resultados de (Vera-Dávila et al., 2018) se obtuvo que la simulación del modelado matemático se ajusta más a la realidad en comparación con el caso de la simulación utilizando el bloque PV array de MATLAB/Simulink Simscape Electrical. El modelo matemático del panel PV desarrollado en (Ayaz et al., 2014) muestra mejores resultados para los módulos de silicio monocristalino y de capa fina, que para los módulos fotovoltaicos de silicio policristalino. Otro estudio como en el caso de (Bellini et al., n.d.), ofrece con los datos de la hoja de características del panel PV, un modelo matemático mejorado basado en dichos datos sin utilizar métodos numéricos para resolver las ecuaciones.

Otros estudios utilizan el enfoque de DT aplicado a instalaciones fotovoltaicas, en los que se han utilizado ecuaciones matemáticas para modelar el comportamiento de la instalación PV, se pueden ver en (Artetxe et al., 2023; Delussu et al., 2022). En dichos estudios las ecuaciones que utilizan se basan en el modelo del diodo simple para representar el comportamiento eléctrico de la célula fotovoltaica. Y de ahí se obtiene un modelo del comportamiento del panel, formado por células fotovoltaicas conectadas en serie y, posteriormente, de todos los paneles conectados en serie y paralelo. Otros estudios que igualmente utilizan el enfoque DT ya comentado, utilizan un modelado matemático de la instalación PV menos complejo, pero obteniendo buenos resultados en sus estudios, como es el caso de (Hong & Pula, 2023; Jain et al., 2020; Yuan & Xie, 2023).

Por ello, en este artículo se opta por utilizar modelo del DT será el modelo matemático utilizado en (Jain et al., 2020). Debido a que no se requieren métodos numéricos complejos para su resolución y en la comparación de los resultados del modelo matemático con los valores reales y el error del modelo matemático está por debajo del 5%. A continuación, se detalla dicho modelo matemático.

La ecuación (1) modela el comportamiento de la corriente del panel fotovoltaico en el punto de máxima potencia (MPP) en función de la irradiancia solar incidente sobre la superficie inclinada del panel y de la temperatura del panel. I_D^{ref} y T^{ref} ($I_D^{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ y $T^{ref} = 25^\circ\text{C}$), representan la irradiancia y la temperatura de referencia, respectivamente. K_i es el coeficiente de variación de la corriente con la temperatura. En la ecuación (2) se presenta la tensión del panel en el MPP en función de I_D y T_p , donde K_p es el coeficiente de variación de la potencia con la temperatura de según (Jain et al., 2020). I_{pV}^{ref} y V_{pV}^{ref} es la corriente y tensión del panel PV del datasheet en el punto de MPP en las condiciones de referencia 1000 W/m^2 y 25°C .

La potencia de salida de la instalación PV (P_s) se puede ver en la ecuación (5), donde N_p , N_s , I_m y V_m son el número de módulos en paralelo, el número de módulos en serie, la corriente de salida y la tensión de salida del grupo, en la ecuación (3) y (4), respectivamente (Artetxe et al., 2023).

$$I_{PV}(I_D, T_p) = \frac{I_{PV}^{ref} I_D (1 + K_i (T_p - T^{ref}))}{I_D^{ref}} \quad (1)$$

$$V_{PV}(I_D, T_p) = \frac{V_{PV}^{ref} (1 + K_p (T_p - T^{ref}))}{1 + K_i (T_p - T^{ref})} \quad (2)$$

$$I_m = N_p I_{PV} \quad (3)$$

$$V_m = N_s V_{PV} \quad (4)$$

$$P_s = I_m V_m \quad (5)$$

4.3 Salida de datos del DT

La salida del DT debe estar referida a las mismas variables que definen de forma significativa el sistema real, en tiempo real (Glaessgen & Stargel, n.d.), por lo tanto, dichas salidas serán la corriente, tensión y la potencia fotovoltaica en CC de la instalación PV ubicada en la cubierta de la Escuela de Ingenierías Industriales. En este trabajo la comparación de la salida del DT y del sistema real, se centra en la potencia PV generada en CC.

4.4 Comparación de la respuesta del DT y el sistema PV real

Toda la información sobre el flujo de energía del laboratorio de termodinámica se encuentra disponible en los registros del inversor de la instalación PV y se muestran al usuario en la aplicación que facilita su fabricante. Accediendo a los datos de dichos registros (Global IT Research Institute et al., n.d.) se obtiene información de corriente, tensión y potencia fotovoltaica tanto en CC como en AC, así como la energía que se genera y se consume de la instalación fotovoltaica, la energía que se consume en total en todo el laboratorio y la que se vende a la red, etc.

Actualmente se dispone de datos cada media hora desde el 23 de febrero al 20 de marzo y cada veinte minutos desde el 21 marzo al 7 de abril de 2024.

En la Figura 5 se puede ver la comparación de la respuesta del DT y de la instalación PV real, es decir, la comparación de la generación de potencia PV en CC y el modelo matemático del DT se ajusta bastante bien a la producción real de la instalación PV real.

Figura 5: Comparación de la respuesta del DT y el sistema PV real en un día soleado (7/03/2024).



Figura 6: Datos de irradiancia del recopilados del piranómetro CMP 11.



5. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado que el modelo de Digital Twin basado en ecuaciones matemáticas se ajusta bastante bien a la producción PV real. La comparación entre la respuesta del gemelo digital y la instalación fotovoltaica real frente a factores externos tales como temperatura e irradiancia permite identificar posibles errores, como sombras parciales o acumulación de polvo. La información obtenida del gemelo digital orienta decisiones estratégicas, permitiendo evaluar distintos escenarios como detección y clasificación de fallos en la instalación PV, el autoconsumo total, el uso de la batería o el consumo de energía de la red, considerando el tipo de día y el tramo horario para optimizar la eficiencia y rentabilidad del sistema. La implementación de Digital Twin facilita la toma de decisiones informadas sobre el consumo de energía, maximizando la eficiencia y rentabilidad de las instalaciones fotovoltaicas.

6. Referencias

- Al-Isawi, O. A., Amirah, L. H., Al-Mufti, O. A., & Ghenai, C. (2023). Digital Twinning and LSTM-based Forecasting Model of Solar PV Power Output. *2023 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2023*. <https://doi.org/10.1109/ASET56582.2023.10180431>
- Artetxe, E., Uralde, J., Barambones, O., Calvo, I., & Martin, I. (2023). Maximum Power Point Tracker Controller for Solar Photovoltaic Based on Reinforcement Learning Agent with a Digital Twin. *Mathematics*, *11*(9). <https://doi.org/10.3390/math11092166>
- Ayaz, R., Nakir, I., & Tanrioven, M. (2014). An improved matlab-simulink model of pv module considering ambient conditions. *International Journal of Photoenergy*, *2014*. <https://doi.org/10.1155/2014/315893>
- Bellini, A., Bifaretti, S., Iacovone, V., & Cornaro, C. (n.d.). *Simplified Model of a Photovoltaic Module*.
- Delussu, F., Manzione, D., Meo, R., Ottino, G., & Asare, M. (2022). Experiments and Comparison of Digital Twinning of Photovoltaic Panels by Machine Learning Models and a Cyber-Physical Model in Modelica. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *18*(6), 4018–4028. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3108688>
- Di Silvestre, M. L., Favuzza, S., Riva Sanseverino, E., & Zizzo, G. (2018). How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 93, pp. 483–498). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>
- Dimitrova Angelova, D., Carmona Fernández, D., Calderón Godoy, M., Antonio, J., Moreno, Á., & Félix González González, J. (2024). *A Review on Digital Twins and Its Application in the Modeling of Photovoltaic Installations*. <https://doi.org/10.20944/preprints202401.1585.v1>
- Glaessgen, E. H., & Stargel, D. S. (n.d.). *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles*.
- Global IT Research Institute, IEEE Communications Society, & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (n.d.). *The 21st International Conference on Advanced Communications Technology: "ICT for 4th Industrial Revolution!": ICACT 2019: Phoenix Park, Pyeongchang, Korea (South), Feb. 17 ~ 20, 2019: proceeding & journal*.
- Hong, Y. Y., & Pula, R. A. (2023). Diagnosis of PV faults using digital twin and convolutional mixer with LoRa notification system. *Energy Reports*, *9*, 1963–1976. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.011>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (n.d.). *Recent and Prospective Developments in Power System Control Centers*.
- Jain, P., Poon, J., Singh, J. P., Spanos, C., Sanders, S. R., & Panda, S. K. (2020). A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *35*(1), 940–956. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2911594>
- Khaled, N., Pattel, B., & Siddiqui, A. (2020). Digital twin model creation of solar panels. In *Digital Twin Development and Deployment on the Cloud* (pp. 137–162). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821631-6.00006-2>
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, *58*, 346–361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>

- Onile, A. E., Machlev, R., Petlenkov, E., Levron, Y., & Belikov, J. (2021). Uses of the digital twins concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management: A review. In *Energy Reports* (Vol. 7, pp. 997–1015). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.090>
- Renewable Energy Agency, I., & Renewables Alliance, G. (n.d.). *Global Renewables Alliance TRIPLING RENEWABLE POWER AND DOUBLING ENERGY EFFICIENCY BY 2030 CRUCIAL STEPS TOWARDS 1.5°C 3 2 0 0*. www.globalrenewablesalliance.org/
- Saracco, R. (2019). Digital Twins: Bridging Physical Space and Cyberspace. In *Computer* (Vol. 52, Issue 12, pp. 58–64). IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/MC.2019.2942803>
- Stark, R., Kind, S., & Neumeyer, S. (2017). Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66(1), 169–172. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045>
- Vera-Dávila, A. G., Delgado-Ariza, J. C., & Sepúlveda-Mora, S. B. (2018). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(2), 343–356. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972>
- Wang, Y., Qi, Y., Li, J., Huan, L., Li, Y., Xie, B., & Wang, Y. (2023). The Wind and Photovoltaic Power Forecasting Method Based on Digital Twins. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/app13148374>
- Yalçın, T., Paradell Solà, P., Stefanidou-Voziki, P., Domínguez-García, J. L., & Demirdelen, T. (2023). Exploiting Digitalization of Solar PV Plants Using Machine Learning: Digital Twin Concept for Operation. *Energies*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/en16135044>
- Yana Arnautova. (2023, March 15). *If You Build Products, You Should Be Using Digital Twins*. <https://www.globallogic.com/insights/blogs/if-you-build-products-you-should-be-using-digital-twins/>
- Yang, S., Xiang, D., Bryant, A., Mawby, P., Ran, L., & Tavner, P. (2010). Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review. In *IEEE Transactions on Power Electronics* (Vol. 25, Issue 11, pp. 2734–2752). <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2049377>
- Yuan, G., & Xie, F. (2023). Digital Twin-Based economic assessment of solar energy in smart microgrids using reinforcement learning technique. *Solar Energy*, 250, 398–408. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.031>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible



El uso de Gemelos Digitales en instalaciones de energía fotovoltaica puede tener un impacto positivo en varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas. En cuanto energía asequible y no contaminante e industria, innovación e infraestructuras. Estos avances son esenciales para abordar los desafíos energéticos y medioambientales a nivel global y local.