

Jornadas de Automática

Diseño de Gemelo Digital de instalación fotovoltaica con herramientas gratuitas

Castellano, D.^{a,*}, Satué, M.G.^a, Castaño, F.^a, Rubio, F.R.^a

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, 41092, Sevilla, España

To cite this article: Castellano, D., Satué, M.G., Castaño, F., Rubio, F.R. 2024. Photovoltaic installation Digital Twin design with free tools. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10908>

Resumen

El artículo presenta una primera aproximación a la creación de un gemelo digital de una planta fotovoltaica real. Para ello se utilizarán programas populares como Unity, que es un motor gráfico 3D para diseño de videojuegos, y Python, un lenguaje de programación versátil con multitud de librerías científicas disponibles. Estas dos herramientas gratuitas permiten diseñar un simulador/supervisor que incorpore funcionalidades no tan comunes, como por ejemplo la disminución de rendimiento por sombreado parcial o total de los paneles fotovoltaicos usando métodos de visión por computador en imágenes sintéticas obtenidas del modelo tridimensional de la planta.

Palabras clave: Modelado de Sistemas de Energía, Aplicación de electrónica de potencia, Simulación en tiempo real, Control y operación óptima de sistemas de energía, Control de fuentes de energía renovables

Photovoltaic installation Digital Twin design with free tools

Abstract

The article presents a first approach to the creation of a digital twin of a real photovoltaic plant. For this, trendy programs will be used such as Unity, which is a 3D graphics engine for video game design, and Python, a versatile programming language with a multitude of scientific libraries available. These two free tools will allow to design a simulator/supervisor that incorporates not so common functionalities, such as the decrease in performance due to partial or total shading of the photovoltaic panels by using computer vision methods in synthetic images obtained from the three-dimensional model of the plant.

Keywords: Modeling and simulation of power systems, Application of power electronics, Real time simulation and dispatching, Optimal operation and control of power systems, Control of renewable energy resources

1. Introducción

La generación eléctrica en los últimos años está marcada por un proceso continuo de descarbonización en el que las energías renovables juegan un papel destacado. Por ello, durante los últimos años ha aumentado la potencia instalada renovable a pasos agigantados, hasta llegar al punto de tener en España una potencia fotovoltaica total instalada de 26 MW, lo que supone un 20 % de la potencia total instalada (Red-Eléctrica, 2024). Todo ello en un movimiento necesario en contra del cambio climático, aprovechando las condiciones favorables que se tienen en el país.

El efecto fotovoltaico en el que se basan las placas solares transforma la energía solar incidente en éstas en energía eléctrica de corriente continua que posteriormente se convertirá en corriente alterna en los correspondientes dispositivos de electrónica de potencia para finalmente ser inyectada en la red eléctrica de baja tensión. Recientemente está cobrando importancia la utilización de baterías eléctricas con el objetivo de almacenar energía eléctrica para su uso posterior en circunstancias en las que se consiga algún tipo de beneficio económico (por las tarifas eléctricas variables) y/o de eficiencia energética (adaptación a las curvas de consumo de los usuarios). Por

*Autor para correspondencia: dcastellano1@us.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

tanto, existe la necesidad de optimizar la gestión de energía fotovoltaica, ya que actualmente es una parte fundamental de la generación eléctrica.

Los gemelos digitales están empezando a ser cada vez más usados en numerosos campos y van captando más atención de investigadores, de modo que se han propuesto ciertas metodologías para su implementación y diseño (Aivaliotis et al., 2019; Tao et al., 2022). En (Chicaiza et al., 2024) se pone el foco en el uso de los gemelos digitales en el ámbito de la Automática. Entre aplicaciones de gestión de energía solar cabe citar los trabajos recientes como (Machado et al., 2023; Castilla et al., 2024; Kavousi-Fard et al., 2024).

Este artículo presenta una primera aproximación a la implementación de un gemelo digital de la planta fotovoltaica situada en el edificio de laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. El gemelo digital permitirá simular el comportamiento de una planta fotovoltaica completa, es decir, de cada una de las placas solares, inversores de corriente y baterías. La información obtenida con el gemelo digital será clave para una gestión más eficiente de la instalación en su conjunto. El gemelo digital hace uso de un motor gráfico en 3D que permite, además de visualizar la propia planta y diversa información, simular las sombras que puede proyectar el entorno sobre los paneles solares así como la intensidad de la luz, puntos a tener muy en cuenta en este tipo de instalaciones por las disminuciones de potencia generada que pueden producir. Las sombras y los valores instantáneos de irradiancia solar en los paneles se calculan con el vector solar proporcionado por las ecuaciones solares PSA (Blanco-Muriel et al., 2001).

Las características principales del gemelo digital en fase de implementación son:

- modelo de placas solares parametrizable (curvas IV),
- modelo simplificado de inversores de corriente,
- modelo 3D de la instalación y su entorno,
- proyección de sombras sobre las placas solares,
- eficiencia corregida según el ángulo de incidencia de la luz y el área sombreada,
- comunicación TCP con programas y equipos externos a Unity para adquisición de datos de sensores, potencias eléctricas instantáneas, estado de carga de las baterías, etc.

En (de Prada et al., 2022) se establecen los cuatro elementos fundamentales que caracterizan a los gemelos digitales: modelos y métodos de actualización de los mismos, captura de datos tanto para almacenamiento de históricos como para actualización de modelos, herramientas para toma de decisiones y por último visualización e interacción en tiempo real. Este trabajo, aún en estado nascente, ya tiene operativos varios de los elementos fundamentales (modelos, visualización en tiempo real y predicción (permite adelantar el tiempo)) y prevé la conexión con un PLC (norma IEC61499) y los inversores de corriente para adquirir toda la información que permita ajustar *on-line* los distintos modelos que componen la planta simulada con el objetivo de mejorar la exactitud del gemelo digital y por tanto de las predicciones. Estas predicciones permitirán la optimización del uso de las baterías, (decidir en qué momentos se deben cargar o descargar), e incluso de otros elementos consumidores de energía eléctrica conectados

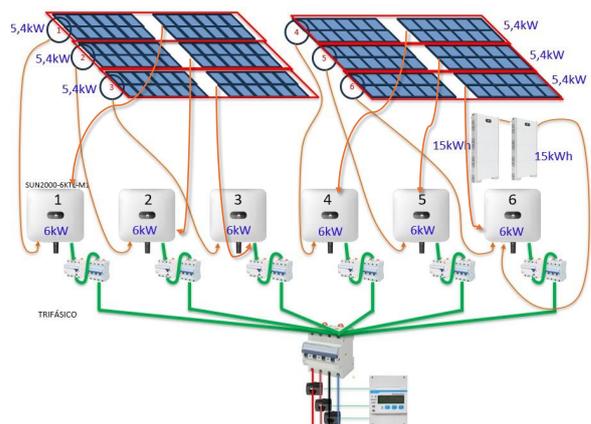
a la red en la que vierte la planta, como por ejemplo máquinas de aire acondicionado.

2. Descripción del sistema real

La planta fotovoltaica (véase la Figura 1) consiste de 12 *strings* (agrupaciones de placas solares conectadas en serie), cada uno de ellos compuesto por 6 placas fotovoltaicas del modelo ESPCH450 de la marca ERA Solar, 6 inversores modelo HUAWEI SUN-2000-6KTL-M1 con 6 kW de potencia pico y dos baterías HUAWEI LUNA de 15 kWh cada una, con las que se almacena el excedente de energía que no se inyecta a la red eléctrica del edificio abastecido. La disposición de los componentes en la instalación fotovoltaica se ilustra en la Figura 1(b). Se cuenta también con un centro de control dotado de un PLC M262 dPac de la marca Schneider Electric, con el que en el futuro se tomarán decisiones sobre las baterías anteriormente comentadas.



(a)



(b)

Figura 1: 1(a)Planta solar fotovoltaica instalada en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. 1(b) Diagrama eléctrico de la planta.

3. Gemelo Digital

Un gemelo digital es un modelo virtual que refleja con gran exactitud el comportamiento real de la planta solar. El

objetivo es realizar en un futuro simulaciones y poder adelantarse a las condiciones solares de la planta solar en un momento determinado, obteniendo datos difícilmente estimables de otra forma, como pueden ser las sombras parciales en algunos paneles que suponen una disminución de la potencia eléctrica producida por la planta.

3.1. Visualización de la planta solar en el entorno virtual

Una primera actuación consiste en construir un modelo 3D de la planta fotovoltaica y su entorno a partir de los planos del edificio y la localización de los elementos que conforman la planta. Con esto se dispondrá de una representación gráfica de la planta solar en el entorno virtual Unity (véase la Figura 2), diseñado originalmente para la creación de videojuegos que utiliza el lenguaje de programación C#.

Unity se basa en un ejecutivo cíclico en el que con una serie de *scripts* se manejan los objetos creados dentro del mundo virtual. Estos *scripts* se ejecutarán cada *frame*, actualizándose el entorno virtual y sus objetos. Desde los mismos *scripts* se puede hacer referencia a la orientación, localización y materiales, entre otras cosas, de todos los componentes de la *escena*. Además este software permite el manejo de múltiples cámaras, lo cual se utilizará para la toma de imágenes de los módulos fotovoltaicos para su posterior análisis de sombreado como se explica más adelante.

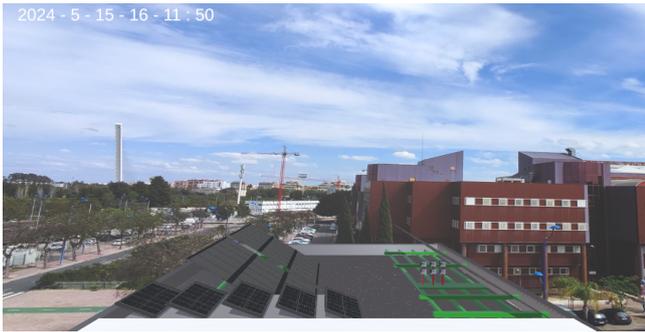


Figura 2: Planta solar en el entorno virtual Unity.

En esta etapa se dispone de un mundo estático, con la instalación geoméricamente definida, pero poco útil, más allá de disponer de diferentes vistas de la planta. Posteriormente, se introduce, como un elemento dinámico del simulador, la animación del movimiento del Sol. Este se simula como una luz direccional que llega del infinito y apunta hacia la planta. La animación principal se produce manipulando el objeto *luz direccional*, que precisa de la realización de transformaciones de rotación para simular la luz solar incidente.

Para la obtención de la dirección del objeto *luz direccional* se ha utilizado el algoritmo de las ecuaciones solares PSA (Plataforma Solar de Almería), originalmente escritas en C++ y transcritas a C# para su correcto funcionamiento en el entorno elegido. Las ecuaciones solares PSA proporcionan el ángulo Azimut, el cual se mide desde el norte geográfico, y el ángulo Cenit dadas la localización geográfica, la fecha y la hora. En el entorno Unity se trata con dos sistemas de coordenadas: uno global, y uno local solidario al objeto *luz direccional* (la luz se emite en dirección del eje local Z). Para obtener el vector solar en el sistema global de Unity hay que realizar

ciertas rotaciones que se detallan en la Figura 3(a) (el sistema de coordenadas de Unity es levógiro).

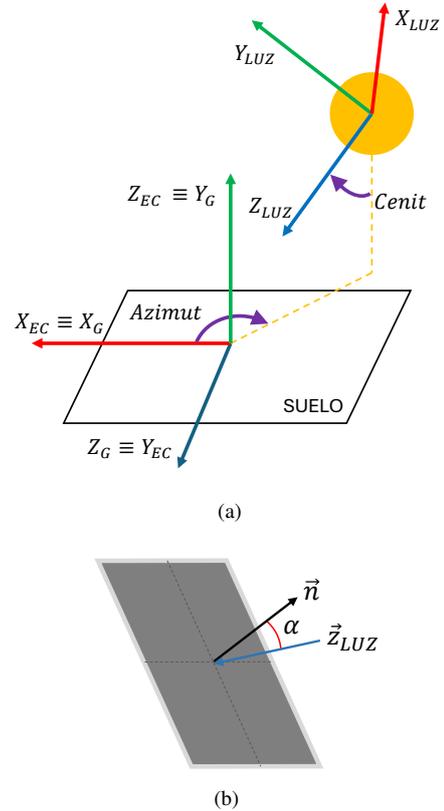


Figura 3: 3(a) Sistemas de referencia global (G), de las ecuaciones solares (EC) y de la luz direccional (LUZ). 3(b) Proyección del vector \vec{z}_{LUZ} en el plano de los captadores.

Partiendo del valor de irradiancia normal directa, se aplica una corrección geométrica basada en un producto escalar entre el vector dirección del objeto *luz direccional*, y la normal de una placa solar (véase Figura 3(b)), obteniéndose así el valor de irradiancia efectiva (G) que reciben las placas solares.

3.2. Modelo de las placas solares

Uno de los componentes con más importancia dentro de las instalaciones fotovoltaicas son las placas fotovoltaicas.

Para la generación de las curvas I-V se han de solucionar las ecuaciones implícitas de la célula fotovoltaica. El modelo utilizado es el modelo exponencial simple, siendo el circuito eléctrico de una célula el que se representa en la Figura 4, cuyos parámetros se ajustan inicialmente a partir de los datos y curvas proporcionadas por el fabricante de las placas fotovoltaicas (véase Tabla 1).

La corriente que se produce en una célula fotovoltaica siguiendo el diagrama de la Figura 4, es I, esta corriente se calcula con (1).

$$I = I_{ph} - I_d - I_{R_{sh}} \tag{1}$$

donde I_{ph} es la corriente fotogenerada, I_d la corriente que circula por el diodo y $I_{R_{sh}}$, la corriente que circula por la resistencia paralelo. Se obtienen cada una de las intensidades, mediante parámetros de diseño siendo sus ecuaciones las que se detallan en (2).

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{stc}} (A \cdot J_{sc} + \alpha_{J_{sc}} (T - T_{sc})) \quad (2)$$

$$I_d = I_o (e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1) \quad (3)$$

$$I_{R_{sh}} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (4)$$

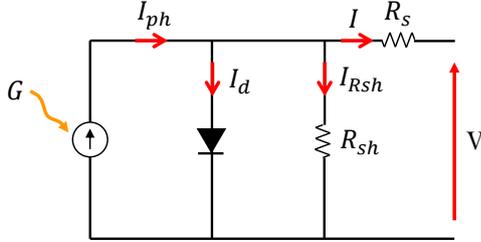


Figura 4: Circuito eléctrico equivalente de una célula fotovoltaica.

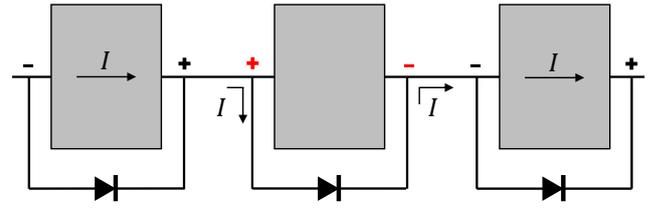


Figura 5: Funcionamiento de los diodos de paso.

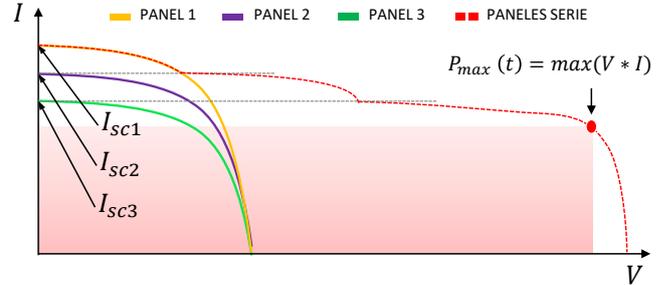


Figura 6: Suma de tensiones en paneles conectados en serie.

Tabla 1: Características eléctricas de panel fotovoltaico ESPCH450.

P_{max} (W)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)
450	49.3	11.6	41.5	10.85

Por lo tanto, para el modelo de panel simulado ESPCH450 de la marca ERA Solar, con las características de la Tabla 1, se sigue un proceso iterativo en el que se obtienen las diferentes curvas I-V, siendo la ecuación equivalente para un panel fotovoltaico de células conectadas en serie (5).

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{V + R_s I}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (5)$$

Estas ecuaciones no solo dependen de la corriente y tensión sino también de la temperatura y del nivel de irradiancia G .

Como los módulos de un mismo *string* están conectados en serie y la cantidad de sombra recibida en cada uno de ellos es diferente entre sí, se genera una Look-Up Table (LUT) en la que la tensión de cada módulo fotovoltaico será $f(I, T, G)$. Para poder realizar esta suma de tensiones hay que tener en cuenta que las placas fotovoltaicas cuentan con diodos en antiparalelo (véase Figura 5). Con ellos se evita que, si el sombreado es muy acusado, la placa llegue a polarizarse inversamente y actuar como una carga, aumentando mucho la temperatura de las células fotovoltaicas.

La Figura 6 muestra gráficamente cómo se obtiene la curva IV de un *string* en un instante de tiempo dado. Fijado el nivel de irradiancia de cada placa fotovoltaica, se suma la tensión de cada una de ellas para cada una de las posibles intensidades. Una vez calculada la curva IV de un *string*, se puede calcular fácilmente el punto de máxima potencia instantánea. Esto último constituye un modelo estático del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) de un inversor de corriente.

3.3. Visión por computador

Una vez se tiene el entorno virtual con las sombras que generan todos los espacios geométricos del entorno sobre las placas fotovoltaicas, dichas sombras se pueden utilizar para modelar la influencia que tienen sobre la producción de potencia eléctrica. Esto implica el uso de algoritmos de visión por computador que permitirán determinar la fracción sombreada de cada módulo fotovoltaico.

El uso de un entorno virtual tridimensional como Unity proporciona la posibilidad de añadir una serie de cámaras de visualización adicionales con el único objetivo de enfocar desde una dirección ortogonal a los módulos fotovoltaicos. Así se dispone de una imagen ya rectificada de cada campo solar, la cual se puede tratar con algoritmos de visión artificial, separando los módulos individuales y umbralizando para determinar el área sombreada.

Con el objetivo de facilitar el procesamiento de las imágenes, se modifica el material y color de los elementos (módulos fotovoltaicos), eligiéndose el color blanco como el más apropiado para la aplicación de umbrales.

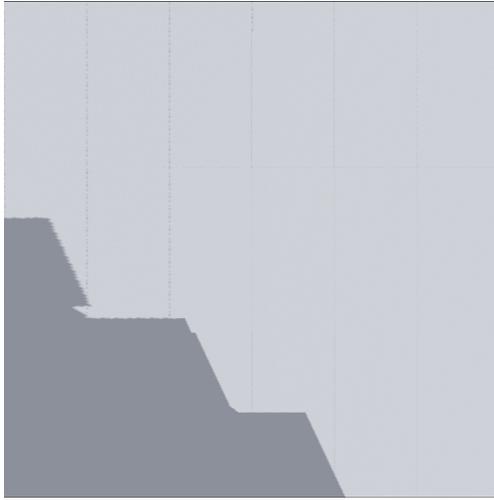
La comunicación entre el entorno Unity y el script de Python se realiza mediante TCP/IP, y un archivo temporal. La comunicación en dirección Unity-Python se basa en la creación de un archivo temporal, que indica que se han tomado las imágenes a tratar en el entorno virtual y sirve de activador del algoritmo de tratamiento de imágenes, que se mantenía a la espera. Con la información obtenida del algoritmo de visión por computador, el entorno virtual recibe por TCP/IP los valores de las eficiencias estimadas con los que se corregirá el valor de la irradiancia.

El parámetro de eficiencia ϵ_s propuesto inicialmente es el factor de área no sombreada, es decir, la relación entre el área total del panel y el área no sombreada.

Con el valor del parámetro ϵ_s obtenido para cada panel se calcula la irradiancia efectiva corregida de cada uno de los módulos fotovoltaicos según (6).

$$G^* = G \cdot \epsilon_s \quad (6)$$

Este nuevo valor de irradiancia efectiva corregida (G^*) será uno de los valores de entrada a la LUT que proporciona la curva I-V de un módulo fotovoltaico.



(a) Campo solar afectado por sombras.



(b) Placas sombreadas separadas.

Figura 7: Proceso de separación de placas fotovoltaicas mediante visión por computador

3.4. Complementos

Aparte del diseño descrito del gemelo digital, se añaden varias funciones para poder navegar por el entorno, y permitir desplazarse a lo largo del tiempo.

Se dispone de varias cámaras (virtuales) que permiten observar los diferentes módulos fotovoltaicos, teniendo éstas asociadas sus respectivas teclas.

Para avanzar o retroceder en el tiempo, se dispone de dos modos, uno a velocidad lenta y otro rápido, con lo cual el usuario puede desplazarse hasta el momento deseado para obtener las potencias estimadas de los inversores.

Supongamos que el usuario ha llegado a la hora exacta en la que quiere ver la generación eléctrica de su planta, bastaría con pulsar un botón para que el algoritmo se ejecutase, se obtuviesen todos los valores de las corrientes de las placas foto-

voltaicas, y las diferentes eficiencias. Obteniéndose así, unos nuevos valores de potencias de los inversores estimadas. El esquema del proceso de comunicación entre los distintos programas utilizados para el algoritmo de visión por computador se detalla en la Figura 8.



Figura 8: Esquema de comunicación entre programas para actualización de la generación eléctrica en el gemelo digital.

4. Resultados

Para comprobar que la base teórica y la corrección de la irradiancia efectiva dan resultados satisfactorios, se ha accedido al repositorio de irradiancias PVGIS, que permite disponer de los diferentes valores de irradiancias directas hasta el año 2020. Se ha alimentado el modelo con los valores de irradiancia directa siempre ortogonal al sol, y se ha procedido a corregir estos valores de irradiancia por el efecto sobre los paneles debido a la orientación fija de los mismos, (proceso expuesto en el apartado 3.1 y que se observa en la Figura 3(b)).

Así, si el modelo se ejecuta para un día concreto, y considerando los valores de potencia instantánea que genera un único inversor, cuyos paneles no presentan sombra, se obtiene la curva de potencia mostrada en la gráfica superior de la figura 9). En la gráfica inferior de la figura 9, se presenta la curva de irradiancia directa (curva de color naranja) y la curva corregida de irradiancia con la orientación de los paneles de los que se dispone en la planta real, con una inclinación de 30 grados y apuntando hacia el sur (curva de color azul).

El objetivo siguiente es poder integrar la información de los inversores que disponen de paneles libres de sombra con los inversores conectados a paneles con sobras totales o parciales, de modo que se pueda disponer de una estimación de la producción eléctrica de la planta solar bastante precisa.

Finalmente, aparte de influencia las sombras, está previsto contemplar efectos importantes para la producción de la planta como son el de la temperatura, estado de limpieza y envejecimiento de los paneles, de modo que se puedan añadir estos factores en el gemelo digital a nivel de cada panel individual.

Así, para considerar la influencia de la temperatura, se pueden instalar sensores de temperatura en los paneles, de modo que permitan obtener modelos más precisos con lo que se dispondrá de una mejor estimación de la producción eléctrica. Según las condiciones se podrá escoger partiendo de una LUT unas curvas I-V más cercanas a las reales, mejorando el funcionamiento final del gemelo digital.

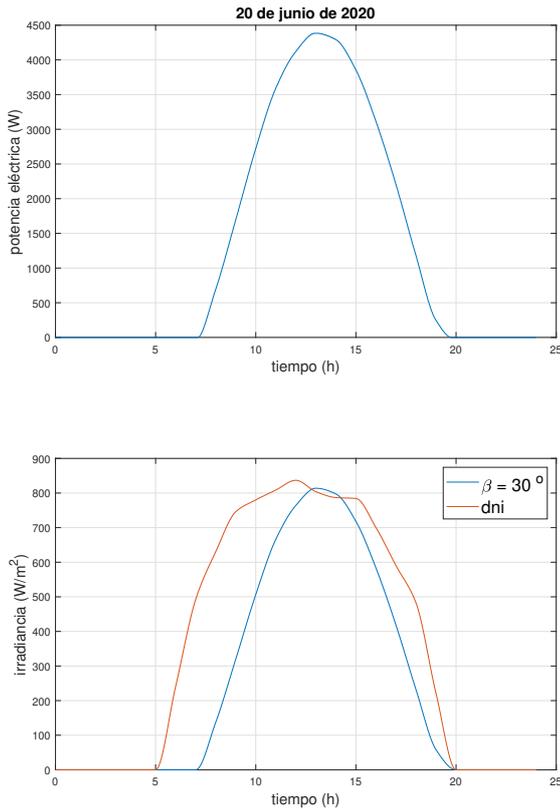


Figura 9: Potencia instantánea de un inversor e irradiancia efectiva

5. Conclusiones

Hoy en día existen herramientas software que, aunque no se concibieron para su uso en la industria, proporcionan funcionalidades muy útiles para el desarrollo de simuladores y gemelos digitales como son la visualización tridimensional, el uso de lenguajes de propósito general, la gestión de comunicaciones vía TCP/IP, etc. En este artículo se ha presentado un diseño básico de un gemelo digital de una planta fotovoltaica utilizando sólo dos herramientas *software* gratuitas: Unity y Python (junto con OpenCV). La mayor parte del gemelo digital (modelos, etc.) está implementado utilizando exclusiva-

mente Unity, siendo la parte de visión por computador la que utiliza Python y OpenCV. En el futuro se implementarán los algoritmos de estimación de parámetros *on-line* necesarios para mantener los modelos actualizados y se desarrollará la capa de optimización que permitirá tomar decisiones que afecten al estado de carga de las baterías.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto "Control Óptimo De Estación Basada en Energía Solar con Almacenamiento para Carga de Vehículos Eléctricos (CON-SOLVE)"(codigo PID2020-115561RB-C32), financiado por Plan Estatal 2021-2024 Retos - Proyectos I+D+i.

Referencias

- Aivaliotis, P., Georgoulas, K., Arkouli, Z., Makris, S., 2019. Methodology for enabling digital twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia CIRP* 81, 417–422, 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS), Ljubljana, Slovenia, June 12-14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.072>
- Blanco-Muriel, M., Alarcón-Padilla, D. C., Lara-Coira, T. L.-M. M., 2001. Computing the solar vector. *Solar Energy*, 431–441. DOI: [10.1016/S0038-092X\(00\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00156-0)
- Castilla, M., Redondo, J., Martínez, A., Álvarez, J., 2024. Artificial neural network-based digital twin for a flat plate solar collector field. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108387>
- Chicaiza, W. D., Gómez, J., Sánchez, A. J., Escaño, J. M., 2024. Digital twin: applications in automatic control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industria* 21. DOI: <https://doi.org/10.4995/riai.2024.20175>
- de Prada, C., Galán-Casado, S., Pitarch, J., Sarabia, D. and Galán, A. G. G., 2022. Digital twins in the process industry. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industria* 19. DOI: <https://doi.org/10.4995/riai.2022.16901>
- Kavousi-Fard, A., Dabbaghjamesh, M., Jafari, M., Fotuhi-Firuzabad, M., Dong, Z. Y., Jin, T., 2024. Digital twin for mitigating solar energy resources challenges: A perspective. *Solar Energy* 274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112561>
- Machado, D. O., Chicaiza, W. D., Escaño, J. M., Gallego, A. J., de Andrade, G. A., Normey-Rico, J. E., Bordons, C., Camacho, E. F., 2023. Digital twin of a fresnel solar collector for solar cooling. *Applied Energy* 339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120944>
- Red-Eléctrica, 2024. Potencia instalada en España. <https://www.ree.es/es/datos/generacion/potencia-instalada>.
- Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J., Ji, P., 2022. Digital twin modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 372–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015>