

Modelado de un parque solar fotovoltaico de empleo industrial

Modeling of a photovoltaic solar park for industrial use

Jesús Gabriel García Tamayo^I, Francisco Beraldo Herrera Fernández^{II}

^IEmpresa de Tecnologías de la Información y Automática, Villa Clara, Cuba

^{II}Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Villa Clara, Cuba

*Autor de correspondencia: herrera@uclv.edu.cu

Recibido: 12 de enero de 2023

Aprobado: 9 de marzo de 2023

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) 

RESUMEN/ABSTRACT

En este trabajo se desarrollan modelos matemáticos aplicando técnicas clásicas de identificación de sistemas para la modelación del funcionamiento de un Parque Solar Fotovoltaico (PSFV) conectado al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), aplicando diferentes técnicas de identificación considerando el comportamiento de la irradiación solar y la temperatura del panel como variables de entrada y la potencia activa generada como variable de salida. Estos modelos tienen como objetivo estudiar el comportamiento de los PSFV y son tomados como referencia en sistemas computacionales para la predicción de la potencia generada en estos tipos de parques, contribuyendo a la toma de decisiones relativas a la logística del SEN. La metodología expuesta en este trabajo puede ser utilizada para obtener el modelo de cualquier PSFV que sea de interés. Los modelos de PSFV son obtenidos y validados con medidas extraídas directamente de una instalación industrial de PSFV.

Palabras clave: Parque solar fotovoltaico (PSFV), modelo de PSFV, Sistema electroenergético nacional (SEN).

Some mathematical models are developed for a Photovoltaic Solar Park (PSFV) applying different identification techniques, considering the behavior of the solar irradiation and panel temperature as input variables and the generated active power as output variable. These models will be used to study a behavior and as reference in forecasting systems of generated power predictions in this PSFV, contributing to the decision making concerning the logistics of the national electro-energy system (SEN). The methodology exposed in this work can be used to obtain the model of any PSFV that is of interest. The PSFV models are awarded and validated with measurements extracted directly from an industrial PSFV installation.

Keywords: Photovoltaic Solar Park (PSFV), model of PSFV, National Electro-energy System (SEN).

INTRODUCCIÓN

El modelado matemático de Parques Solares Fotovoltaicos (PSFV) de empleo industrial es un tema de intenso trabajo a nivel mundial debido al esfuerzo de gobiernos y organizaciones en poder conocer con precisión sus características y así hacer un uso eficiente de los mismos. En nuestro país, como política de interés gubernamental, se ha dado un impulso al desarrollo de trabajos de investigación sobre el modelado de este tipo de fuente renovable debido a su utilidad en tareas relacionadas con el comportamiento y predicción de la generación de energía eléctrica en estos parques a: mediano, corto y largo plazo; lo cual es de vital importancia para contribuir a la estabilidad del Sistema Electroenergético Nacional (SEN), considerando la creciente penetración de la energía solar fotovoltaica en el sistema nacional.

Cómo citar este artículo:

Jesús Gabriel García Tamayo y Francisco Beraldo Herrera Fernández. Modelado de un parque solar fotovoltaico de empleo industrial. Ingeniería Energética. 2023. 44(1), enero/abril. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

El Despacho Nacional de Carga (DNC), utiliza los datos ofrecidos por los modelos PSFV para planificar una efectiva distribución y uso de los recursos energéticos a su disposición entre las diferentes formas de generación que le son tributarias. El modelado de PSFV considera tanto las variables climatológicas como las variables y parámetros de la tecnología instalada en dichas plantas. Esto implica considerar variables meteorológicas como la trayectoria del sol, la temperatura, la irradiación solar, la humedad, la velocidad del viento y otras variables atmosféricas; así como las específicas del PSFV, como la tasa de conversión, el grado de limpieza de los paneles, etc. Normalmente este modelado se realiza con el objetivo de obtener modelos de predicción para estimar la posible potencia eléctrica a generar por la planta.

Estos métodos de predicción se basan fundamentalmente en la determinación de las relaciones existentes entre las variables meteorológicas, tecnológicas y económicas, que permiten obtener estimaciones de los valores futuros de degeneración potencial. Según la bibliografía técnica especializada, se utilizan dos tipos de modelos diferentes; uno para la predicción de la irradiación solar (I_r), que actúa sobre el PSFV y un segundo modelo para la caracterización del funcionamiento de la propia planta, relacionando las variables meteorológicas con la potencia generada [1]. La figura , establece la relación entre ambos modelos.

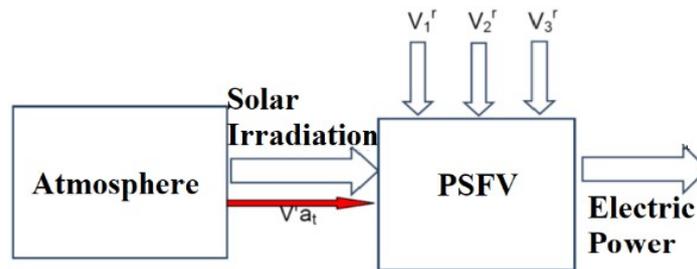


Fig. 1. Principales relaciones funcionales en un PSFV

V_k^r : k- esima variable de proceso afectada por la relación P/IR.

V_{a_t} : Vector de variables meteorológicas con influencia en la generación de potencia.

Para representar el comportamiento de un PSFV, normalmente se utilizan las relaciones entre la potencia generada y las variables de irradiación solar proporcionadas por los fabricantes de la instalación, lo que no considera un conjunto de parámetros tecnológicos inherentes al PSFV que presentan una dinámica de comportamiento con una incidencia permanente en el coeficiente de conversión energética de la instalación. El comportamiento de un PSFV se manifiesta en sus dos componentes fundamentales: un conjunto de módulos fotovoltaicos y un inversor eléctrico. Sobre esta base, el segundo modelo propuesto, el modelo PSFV, debe considerar a su vez los modelos de ambos componentes.

En el modelo de la disposición de los módulos fotovoltaicos, existe una marcada influencia de las variables meteorológicas, siendo la temperatura de los paneles una variable importante de influencia en los parámetros que definen el coeficiente de conversión. En [1], se demuestra que la temperatura de los paneles en un PSFV puede influir hasta un 20% en la eficiencia de conversión. Por las razones expuestas, tanto la irradiación solar como la temperatura de los paneles pueden considerarse variables de entrada básicas en este modelo. La nubosidad, otra variable meteorológica, podría considerarse como entrada, dada su influencia negativa en la conversión de la planta. También existen modelos de previsión para esta variable [1]. Otros parámetros tecnológicos, como la limpieza de los paneles, también deben ser considerados, aunque predecir su comportamiento ya es un poco más complicado, comparado, por ejemplo, con la predicción de la irradiación solar y la temperatura ambiente. Este comportamiento real de los PSFV implica la necesidad de obtener modelos que representen todos los cambios que se producen, lo que implica una mejora en los sistemas de diagnóstico y predicción energética que se aplican. De ello se deduce que es un objetivo práctico obtener modelos matemáticos para cada planta en particular.

En la actualidad se está trabajando intensamente en la modelación de PSFV, presentándose los resultados en la literatura técnica de diversas formas [2–7]. En el presente estudio, se presenta primeramente lugar una breve descripción del PSFV objeto del modelado. A continuación, se presentan los resultados de la caracterización del conjunto de datos reales obtenidos por medición. Finalmente, se expone la aplicación de diferentes técnicas de identificación para obtener los modelos deseados, realizando conjuntamente una comparación de los modelos obtenidos.

DESARROLLO

Características del psfv de la UCLV

El PSFV objeto de la presente investigación se encuentra ubicado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Está compuesto por 207 estructuras de soporte para paneles solares llamadas bandejas, cada una de las cuales agrupa 22 módulos [8] de paneles. Las bandejas conectan los módulos en serie y éstos se conectan en bloques de hasta 16 a 14 cajas de conexión (string); estos strings a su vez conectan las bandejas en serie o en paralelo hasta alcanzar los 700 V necesarios para entregar la instalación a los 2 inversores [9], de 0,5MW de potencia cada uno para un total de 1MW de capacidad máxima instalada, y, finalmente, éstos se conectan a una celda de media tensión que interactúa con la red del SEN.

Para la captura de las mediciones de los datos se utilizó la estación meteorológica proporcionada por el fabricante de la tecnología PSFV, en la que están instalados: un anemómetro para la medición de la velocidad del viento; dos sensores de temperatura pt100 para medir la temperatura ambiente y la temperatura de los paneles, variables a tener en cuenta en la eficiencia de la conversión energética; un piranómetro [10], situado con la misma inclinación de los paneles solares que obtiene en su lectura el valor de la irradiación solar efectiva que los mismos reciben. Esta variable es de gran importancia ya que es la principal fuente de energía del sistema. Además de la estación meteorológica, la instalación dispone de un contador de energía [11], para cuantificar la potencia activa entregada al SEN. Todos los valores de las mediciones anteriores se almacenan en tiempo real en el software de control y supervisión instalado en la cabina de control de dicha PSFV. Durante el periodo de recopilación de los datos, todos los instrumentos disponían del certificado de calibración vigente.

Caracterización de los datos

Los datos para el experimento de modelado se obtuvieron directamente del PSFV en el periodo del 28 de junio de 2018 y el 24 de abril de 2021, alrededor de 3 años. Los datos tienen un tiempo de muestreo de 1 hora. Para el análisis, se eligieron 10 horas solamente de las 24 horas del día, debido a que es donde se concentran las horas efectivas de generación de energía. La tabla 1, contiene información sobre las variables del modelo, mientras en la figura 2, se presenta un gráfico con una muestra de estos datos.

Tabla 1. Información acerca de las variables del modelo

Nombre de la variable	Media	Varianza	Unidad Física	Correlación con la salida
Irradiación	495.12	12803	W/m ²	Entrada 1
Temperatura de los paneles	30.03	100.04	°C	Entrada 2
Potencia Generada	0.4550	0.0952	MW	Salida

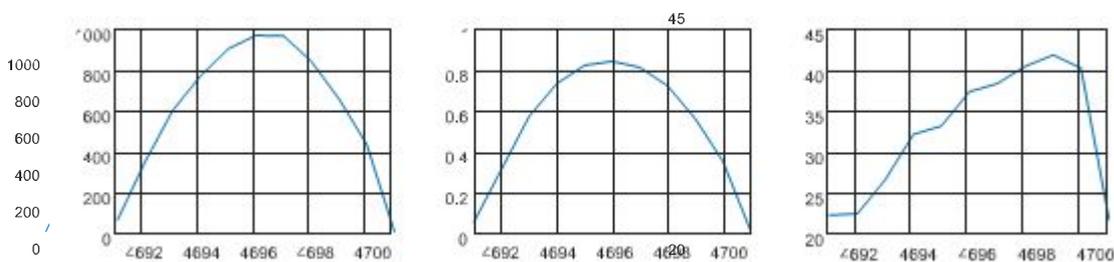


Fig. 2. Muestra de medición de un día: Irradiación solar (izquierda), potencia activa (centro), temperatura del panel (derecha)

La tabla 1, muestra las grandes relaciones que existen entre las variables de irradiación solar y potencia activa con un valor de correlación de 0,96 y un poco menor pero no despreciable de la variable temperatura de los paneles con la potencia generada con un 0,48. La relación entre las primeras variables mencionadas es mayor y a que la irradiación solar es la principal fuente de energía para la generación de potencia; y el caso de la temperatura de los paneles esta influye en la eficiencia de la conversión de energía a razón de '0.5%/°C, si la temperatura supera los 25 °C [12], y como muestran los resultados de los valores medios la temperatura en la geolocalización del PSFV se mantiene por encima de los 30°C. En el caso de la varianza de los datos, se puede observar en la tabla 1, que la irradiación tiene una alta varianza con respecto a las demás variables, esto se debe a que los valores de irradiación varían entre 0 y 1200W/m², un campo muy amplio de mediciones.

Debido a las características de los entornos industriales, los datos obtenidos presentan imperfecciones. Se detectó una gran cantidad de datos con valores atípicos, datos faltantes y registros no continuos, debido principalmente a fallos en las fuentes de alimentación o en el canal de comunicación de los instrumentos de medida, o a fallos en el software de supervisión y control del PSFV. Para aplicar con éxito el procedimiento de modelado, es necesario eliminarlos valores atípicos descritos anteriormente, ya que podrían introducir dinámicas no deseadas.

En el análisis previo de los datos, los valores atípicos se trataron como valores perdidos. Este análisis se llevó a cabo mediante una inspección visual a través de gráficos y análisis a través del software [13].

Para la estimación de los valores perdidos en las mediciones o eliminados por su valor atípico, se utilizó la técnica de modelado de datos perteneciente a la caja de herramientas Matlab System Identification [14], que permite reconstruir el conjunto de datos y tiene muy buenos resultados cuando la pérdida no es severa. En el caso de las variables de entrada, los valores perdidos se estiman mediante: una regresión lineal que utiliza una interpolación lineal en su primera iteración, mientras que, en el caso de los valores perdidos en la variable de salida, se utiliza un filtro de Kalman variable en el tiempo, con un procedimiento estándar [13].

Modelo de PSFV y discusión

Un modelo analítico general de un PSFV contiene una relación estática entre la potencia activa generada y las variables económicas y tecnológicas. Considerando los paneles solares como una fuente generadora de corriente, la ecuación (1), se puede expresar como:

$$I(t) = f(I_r, T, a, \phi) \quad (1)$$

Donde:

I : corriente eléctrica generada, expresada por los componentes i_q e i_d , (A)Ir:

Irradiación W/m^2

Ta: Temperatura de los paneles (oC)

ϕ : valor de referencia del factor de potencia

Mientras que la potencia generada en la salida del convertidor es expresada por la ecuación (2):

$$P(t) = g(I(t), V_r) \quad (2)$$

Donde:

Vr: Voltaje de la red eléctrica(V)

Normalmente los fabricantes de sistemas solares ya proporcionan estas relaciones como se muestra en la ecuación (3):

$$P(t) = h(K, I_r) \quad (3)$$

Donde K es un valor calculado a partir de la potencia máxima generada en condiciones estándar de temperatura e irradiación, previamente establecidas por los fabricantes.

En resumen, en la práctica se aplica la ecuación (3), proporcionada por el fabricante. Este procedimiento no considera las lógicas variaciones en los parámetros tecnológicos que se dan en estas plantas solares, como por ejemplo con el nivel de suciedad. La figura 3, muestra la reducción de la potencia generada que puede provocar la suciedad de los paneles.

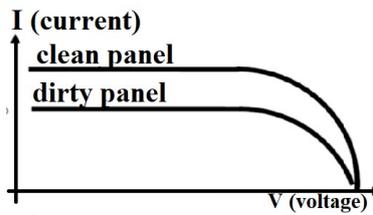


Fig. 3. Reducción de la potencia generada a causa de la suciedad de los paneles

Para resolver esta limitación en la práctica, es necesario aplicar en cada PSFV un método de identificación experimental de esta relación, lo que significa obtener el modelo real que representa la planta, a partir de los datos experimentales de las variables que intervienen en las relaciones anteriores (P, Ir y Tpaneles). Si los procedimientos de identificación se aplican sistemáticamente a lo largo del tiempo, todos los efectos causados por las variaciones de los parámetros tecnológicos, como la suciedad, etc., se incluyen en los datos medidos. Ver figura 4.

Para la culminación del experimento de identificación dinámica del PSFV, del total de muestras se eligen 700 (70 días en total), ya que éstas represen tan todas las características deseadas que reproduce un modelo de este tipo y evitan el sobre entrenamiento y la memorización; para la validación se eligen un total de 400 muestras (40 días en total).

Para el modelado, se eligieron varias estructuras de modelos lineales simples, como el modelo de proceso con dos entradas y una salida con funciones de transferencia independientes, dando un resultado de seguimiento del 62% de la salida (se utilizaron funciones de transferencia de orden cero y de primer orden para las relaciones irradiación-potencia y temperatura de los paneles-potencia, respectivamente); Otro modelo utilizado fue el ARX con una estructura polinómica de tercer orden pero con resultados muy discretos (3%), luego se experimentó con modelos no lineales, como el modelo Hammerstein-Wiener, que se compone de un bloque no lineal en cascada con un modelo ARX lineal y finalmente otro bloque no lineal dando resultados considerables de hasta un 78% de coincidencias de la salida. Por último, se analizó un modelo NARX con un bloque de regresores lineales con un retardo de 5 muestras en la salida y 1 y 3 en la entrada con respecto a la irradiación solar y la temperatura de los paneles, en el caso del bloque no lineal tiene un grado 4, dando un resultado del 79% de coincidencia. Ver tabla 2.

Tabla 2. Características de los modelos obtenidos

Tipo de modelo	Mejor coincidencia	Orden de los modelos	MSE
NARX	78%	Orden de la salida 5 Orden de la	0.003495
Hammerstein Wiener	79%	Entrada 1 pwnlinear 10 unidades Entrada 2 pwnlinear 10 unidades Salida no lineal	0.003113

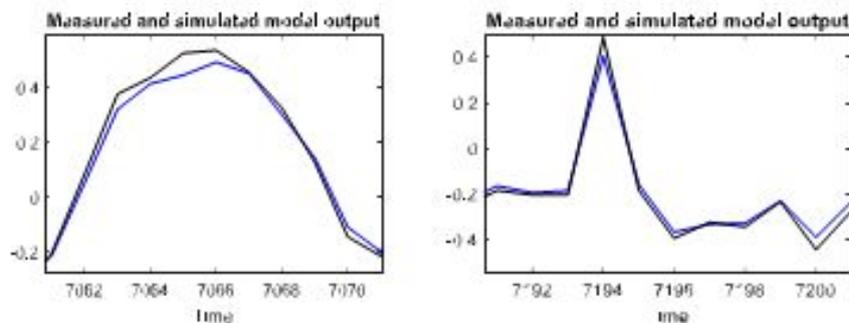


Fig. 4. Ejemplos de validación de los modelos con un día soleado (izquierda) y un día nublado (derecha)

La figura 4, muestra un seguimiento aceptable del 79% de coincidencia para el modelo PSFV tanto en días soleados como en días nublados. La figura 5, representa la calidad del modelo en la reproducibilidad de los valores futuros que se le suministran debido a que los valores de sus residuos están entre -0,1 y 0,1 en ambas entradas y una correlación cruzada entre -0,15 y 0,2 como se muestra en la figura 5.

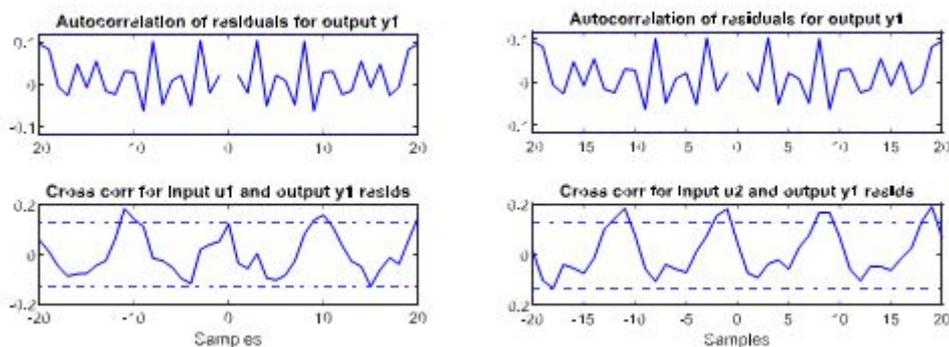


Fig. 5. Residuos del modelo: entrada irradiación (izquierda), entrada temperatura de los paneles (derecha)

CONCLUSIONES

Se ha demostrado que es posible obtener modelos no lineales para describir el comportamiento de un PSFV (Hammerstein-Wiener, NARX). Para el PSFV particular utilizado en el trabajo, el mejor resultado en términos de reproducibilidad de las muestras y comportamiento de los residuos lo presentó el modelo NARX, con una coincidencia de hasta el 79%. Estos modelos tienen como entradas la irradiación solar y la temperatura de los paneles ya que son las variables de mayor influencia en este tipo de instalaciones. Con este modelo es posible estudiar el comportamiento de las PSFV para uso industrial y utilizar los resultados en la planificación de la generación de potencia eléctrica.

RECONOCIMIENTOS

“Los autores desean agradecer a la Empresa de Tecnologías de la Información y la Automática Villa Clara y a la Empresa de Fuentes Renovables de Energía por su contribución a la obtención de los datos para la realización de los experimentos. Además, un gran reconocimiento al Instituto de Meteorología (INSMET)” por la organización y financiación del “Proyecto Energía”.

REFERENCIAS

- [1]. M. Paulescu, *et al.* “Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation”. London: Springer London, 2013. [Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-4649-0>
- [2]. V. Cuk, *et al.* “Considerations on the modeling of photovoltaic systems for grid impact studies”. Math. Comput. - Math Comput, ene.2011. [Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: https://energynautics.com/content/uploads/2019/02/App23_TUE_DTU_ENA_KTH_Considerations_on_the_Modeling_of_PV_Systems.pdf
- [3]. S. I. Nanou y S. A. Papathanassiou. “Modeling of a PV system with grid code compatibility”, Electr. Power Syst. Res., vol. 116, p. 301-310, nov. 2014. [Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779614002302>
- [4]. M. G. Villalva, J. R. Gazoli, y E. R. Filho. “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Array”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, n.5, p. 1198-1208, may 2009. [Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4806084>
- [5]. Y. Mahmoud, W. Xiao, y H. H. Zeineldin. “A Simple Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Modules”, IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 3, n. 1, p. 185-186, ene. 2012, [Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6102290>
- [6]. P. Eguía, *et al.* “Modeling and validation of photovoltaic plants using generic dynamic models”, en 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Taormina, jun. 2015, p. 78-84. [Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7177604>
- [7]. D. Sera, R. Teodorescu, y P. Rodriguez. “PV panel model based on datasheet values”, en 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, Spain, jun. 2007, p. 2392-2396. [Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4374981>

- [8]. Xi'An Yuanfar International Trade Company. "Panel solar 450w", Xi'An Yuanfar International Trade Company, 17 de diciembre de 2021. [Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.cccme.cn/shop/cccme5268/index.aspx>
- [9]. Made in China. "Híbrido de 50kw fases 3Inversor híbrido", Made-in-China.com, 17 de diciembre de 2021.[Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: https://es.made-in-china.com/co_sungoess/product_50kw-Hybrid-3-Phases-Hybrid-Inverter_onnrorieg.html
- [10]. Kintech Engineering. "Kipp & Zonen CMP11".Pyranometer, Solar Data Acquisition,KintechEngineering - Sistemas de medición eólica y solar.[Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en:<https://www.kintech-engineering.com/catalogue/solar/kipp-zonen-cmp11/>
- [11]. MICROSTAR. "P2000-D Three Phase Whole Current Meter".Microstar Electric Company Limited,2021.[Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.microstarelectric.com/products/smart-meters/p2000-d/>
- [12]. M. Koehl. "Modeling of the nominal operating celltemperaturebased on outdoor weathering", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 95, n.7, p. 1638-1646, jul. 2011, [Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024811000304>
- [13]. L. Ljung."System Identification, Theory for the user, Second Edition.", vol. 1, 1 vols. United States of America: Prentice Hall Information and System Sciences Series, 1999. [En línea]. [Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiqjMighc9AhWsj4QIHUJZDDkQFnoECCAQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.mit.bme.hu%2Fsystem%2Ffiles%2Foktatas%2Ftargyak%2F9132%2FLjung_L_System_Identification_Theory_for_User-ed2.pdf&usg=AOvVaw2HrPzAZbx3g2OgZZoFhU67
- [14]. L. Ljung. "System Identification Toolbox. User' Guide". The MathWorks, Inc, 2014.[Consultado el 2 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/ident/>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Jesús Gabriel García Tamayo: <https://orcid.org/0000-0002-8158-6984>

Diseño de la investigación, búsqueda bibliográfica, recopilación de datos, corrida del software, análisis de los resultados, redacción del artículo y revisión crítica del contenido hasta su aprobación final.

Francisco Beraldo Herrera Fernández: <https://orcid.org/0000-0002-0774-0752>

Diseño de la investigación, recopilación de datos, reprogramación y adaptación del algoritmo, programación y corrida del software, análisis de los resultados, redacción del artículo y revisión crítica del contenido y aprobación final.