

Control y monitoreo de desempeño de sistemas seguidores solares bajo software embebido

Marco A. Peñaloza-López
Instituto Politécnico Nacional
Ciudad de México, México
mpenalozal1500@alumno.ipn.mx

Sergio I. Palomino-Resendiz
Instituto Politécnico Nacional
Ciudad de México, México
spalominor@ipn.mx

Diego A. Flores-Hernández
Instituto Politécnico Nacional
Ciudad de México, México
dfloreshe@ipn.mx

Abstract— Este trabajo presenta un sistema capaz de reducir la complejidad en términos de diseño, implementación y ajuste de controladores no convencionales en sistemas seguidores solares, así como tareas de monitoreo y generación de base de datos. Lo anterior a través del uso de un software embebido que permite utilizar funciones y bloques pertenecientes al entorno de *Matlab-Simulink*. Esto, mediante el *toolbox* de *Waijung* para la programación en un lenguaje de alto nivel para la tarjeta STM32F4-NUCLEO. Adicionalmente, la configuración resultante logra disponer de forma fácil y práctica los recursos de procesamiento de una computadora propiciando un esquema de tipo *Hardware in the Loop*. Por lo que, la computadora puede visualizarse como una interfaz de monitoreo y configuración, así como un servidor para almacenamiento de base de datos. Para validar la propuesta se presenta el procedimiento de desarrollo y pruebas de funcionamiento realizadas con un seguidor solar existente.

Palabras clave—Seguidor solar, *Waijung*, STM32F4, estrategia de control, interfaz de monitoreo y configuración.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años los avances en el uso de la tecnología para el aprovechamiento de la energía solar han alcanzado importantes mejoras en lo que respecta a la disminución de los costos de manufactura y al incremento en la eficiencia de los dispositivos para captación y conversión de la irradiancia solar [1]. Esto, aunado a la creciente demanda mundial de energía y a la necesidad de utilizar fuentes sostenibles ha extendido rápidamente el uso de paneles fotovoltaicos (PV) tanto a nivel doméstico como a gran escala. Al mismo tiempo, con esto se ha visto impulsada la aparición de una nueva área de oportunidad dedicada al desarrollo de seguidores solares (SS) cuyo objetivo es garantizar la orientación de una superficie de interés de forma normal al sol. La importancia de los SS radica en que permiten incluir a los concentradores ópticos como dispositivos para el aprovechamiento de la irradiancia solar [2], ya que estos operan con un ángulo de aceptación muy reducido ($\pm 0.5^\circ$, [2]), además, también se puede incrementar la producción de energía de un PV al mantenerlo dentro de las condiciones de operación necesarias para un régimen de producción alto (ángulo de aceptación entre $\pm 2^\circ$, [2]).

Los SS se clasifican en función de los ejes o grados de libertad (GDL) con que cuentan (1 o 2 ejes) y por la forma en que realizan el seguimiento de la trayectoria solar [3]. En esta última clasificación se identifican 5 tipos de seguimiento, sin embargo, para este trabajo en particular, resultan de mayor interés el seguimiento activo y el cronológico ya que en ambos casos es necesario el uso de un controlador encargado de gestionar el adecuado desempeño de la tarea de seguimiento solar ya sea mediante una estrategia de control en lazo cerrado (seguimiento activo) o mediante el uso de algoritmos para el cálculo de la trayectoria solar en un esquema de control de

lazo abierto (seguimiento cronológico). En la literatura se pueden encontrar diferentes diseños para SS que utilizan como unidad de control Controladores Lógicos Programables (PLC), microcontroladores (MC), computadoras de placa única e incluso computadoras personales [4]. En cada caso las características del hardware utilizado se definen con base en las necesidades de la estrategia de control utilizada y de la aplicación que se busca desarrollar. En este sentido se considera la compatibilidad con los sensores y actuadores, la capacidad de procesamiento, los puertos para la comunicación, la capacidad de memoria, el consumo energético entre otros.

II. CONTROL DE SEGUIDORES SOLARES

A. Dispositivos para el control de seguidores solares

En [4, 5, 6] se presenta el desarrollo de SS de dos ejes controlados con placas Arduino en un seguimiento activo, es decir, las acciones de control dependen de la lectura obtenida a través de sensores y se necesitan entradas de tipo analógicas. Los controladores desarrollados para estos trabajos son On-Off, Proporcional Integral Derivativo (PID) y de lógica difusa (Fuzzy), respectivamente. En consecuencia, se generan señales digitales como salidas del control On-Off, mientras que en los últimos dos casos se obtienen señales de modulación por ancho de pulso PWM. En [7] también se aborda el uso de una placa Arduino para el control de un SS, sin embargo se hace bajo un esquema de lazo abierto basado en un reloj de tiempo real y un algoritmo para el cálculo de la trayectoria solar.

El uso de PLC puede encontrarse en trabajos como [8, 9] donde se tiene un seguimiento solar activo gracias al uso de fotoresistores como sensores, o bien también hay trabajos como [10] en el que se calcula la trayectoria solar fuera de línea y se propone un esquema de control en lazo abierto. Cabe mencionar que para cualquiera de estos tres trabajos las entradas y salidas de los PLC son únicamente de tipo digitales, además, para el seguimiento activo nuevamente se utiliza el control On-Off. Los MC ajenos a las placas Arduino también se hacen presentes en trabajos como [11] donde la propuesta desarrollada opera a través del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).

Finalmente, en [12] se presenta una propuesta de control On-Off para seguimiento activo desarrollada mediante amplificadores operacionales. A través de la revisión de la literatura puede observarse la tendencia hacia el uso del control On-Off para la gestión del seguimiento de trayectoria en SS, esto probablemente debido a su simplicidad y la facilidad y bajo costo de su implementación, no obstante, este tipo de control presenta importantes desventajas relacionadas con baja precisión de seguimiento, incapacidad para el rechazo de perturbaciones y susceptibilidad al ruido [4]. Por

otro lado, el uso de PLC pareciera estar reducido para la implementación de estrategias de control con mayor complejidad (PID, Fuzzy, MPPT, etc.), además, al realizar una comparativa desde el punto de vista asociado al costo de la implementación con respecto a SS controlados con MC se obtiene que el costo de estos últimos es alrededor de un 30 % menor. Al mismo tiempo, una comparativa en términos de desempeño arroja diferencias próximas al 1.8 % [13].

B. Software embebido

Como se ha analizado hasta ahora, el uso de microcontroladores para el control de SS permite desarrollar estrategias de control con un considerable nivel de complejidad sin incrementar innecesariamente el costo de la implementación, además, la disponibilidad de entradas analógicas facilita la conexión con los sensores mientras que las salidas con PWM posibilitan la operación de los actuadores fuera de sus parámetros nominales. La disponibilidad de este tipo de entradas y salidas es una característica muy común de los microcontroladores. No obstante, el uso de estos dispositivos conlleva también algunas desventajas entre las cuales se encuentra una capacidad de procesamiento y memoria menores a la de un PLC, así como la necesidad de ser programados mediante lenguaje estructurado, como se muestra en [23], una revisión sobre el tipo de controladores y tecnología más utilizada en SS.

Así, dado lo anterior, las placas de desarrollo con microcontroladores de la familia STM32F4 son una alternativa que atiende de forma eficiente estas problemáticas ya que, además de cubrir las necesidades y/o requerimientos en términos de procesamiento, también presentan la ventaja de poder ser programadas mediante el *toolbox Waijung* [14]. El cual, permite disponer de la mayoría de los bloques (y todas sus capacidades) pertenecientes a operaciones y/o funciones de *Simulink*®, y a su vez utilizarlos con fines de programación en alto nivel. Es decir, sustituye la complejidad de la escritura y configuración de los algoritmos, por la distribución de objetos asociados a tareas específicas. Aunque, cabe aclarar que la descarga e interpretación del programa resultante en el microcontrolador, se hace mediante código en lenguaje C, mismo que se genera de forma automática [15]. Esto, sin la necesidad de realizar configuraciones especiales, o bien garantizar el desarrollo de procedimientos intermedios, como los que implica el uso de software dedicado para estos microcontroladores, como por ejemplo STM32CubeIDE [22]). Por ello, hasta cierto punto, puede establecerse que el resultado del proceso conserva cierta equivalencia, teniendo una diferencia clara en la complejidad y/o el tiempo destinado para su obtención.

III. USO DE MATLAB-SIMULINK EN EL DISEÑO DE CONTROLADORES PARA SEGUIDORES SOLARES

A. Waijung como medio para la transición del nivel simulación a la implementación en físico.

Es bien sabido que el entorno de bloques que ofrece *Matlab-Simulink*® [16] es ampliamente utilizado para el modelado de sistemas y el diseño de controladores de todo tipo. Hablando específicamente de SS, fácilmente pueden utilizarse funciones de transferencia o representaciones en espacio de estados para modelar su dinámica, incluso se dispone de herramientas como el *toolbox Simscape Multibody Link* que permite llevar a cabo un análisis de simulación de tipo multicuerpo (MBS), en el cual un SS es representado como un sistema robótico de 1 o 2 GDL. Por otro lado,

también se dispone de bloques con funciones de particular interés para el diseño de controladores, por ejemplo integradores, derivadores, PID, Fuzzy, redes neuronales artificiales (RNA), entre otros. Todo esto toma gran relevancia al utilizar los bloques de *Waijung* ya que la extrapolación de un controlador diseñado en el entorno de simulación de *Matlab-Simulink*® hacia una implementación en físico es prácticamente directa puesto que la generación del código C propio de los microcontroladores de la familia STM32F4 [17] se obtiene de forma automática al utilizar los bloques de *Waijung*. Este procedimiento ha sido reportado en trabajos como [18] en el cual se comparan 7 estrategias de control para SS implementadas a nivel simulación con *Matlab-Simulink*® y a nivel físico con un SS de dos ejes controlado con una placa de desarrollo STM32-NUCLEO.

La Fig. 1 muestra un ejemplo de una simulación MBS de un SS en el cual la ley de control se rige por la medición de la corriente eléctrica desarrollada por la celda solar. Luego la Fig. 2 muestra como el mismo controlador de la Fig. 1 es utilizado con bloques de *Waijung* para extender su implementación en un SS físico con una tarjeta de desarrollo STM32-NUCLEO. Cabe mencionar que aunque esta es una clara ventaja del uso de *Waijung*, conlleva una limitante asociada a la versión de *Matlab*® con que es compatible, en este caso se ha utilizado *Matlab*® 2021b para el análisis MBS mientras que para el modelo de la Fig. 2 se ha utilizado *Matlab*® 2015b. Esto no representa un problema para el diseño del controlador siempre y cuando este sea construido con bloques disponibles en ambas versiones.

De la Fig. 2 también puede observarse claramente como se obtienen la lectura de las entradas analógicas a través de una bloque asociado a un Convertidor Analógico Digital (CAD). En este caso los datos obtenidos corresponden a mediciones de irradiancia solar directa (pirheliómetro) y global (piranómetro) proporcionadas por instrumentos de la marca *Kipp&Zonen*® modelos SHP1-V y SMP6-V respectivamente [19]. La conexión de estos instrumentos es bastante sencilla ya que ambos proporcionan como salida una señal analógica de voltaje en un intervalo de 0 – 1 V el cual puede ser conectado directamente a la placa de desarrollo. Asimismo, también se tiene la lectura de un sensor de corriente MAX471, el cual puede conectarse a la placa siguiendo las especificaciones de su fabricante para que proporcione una

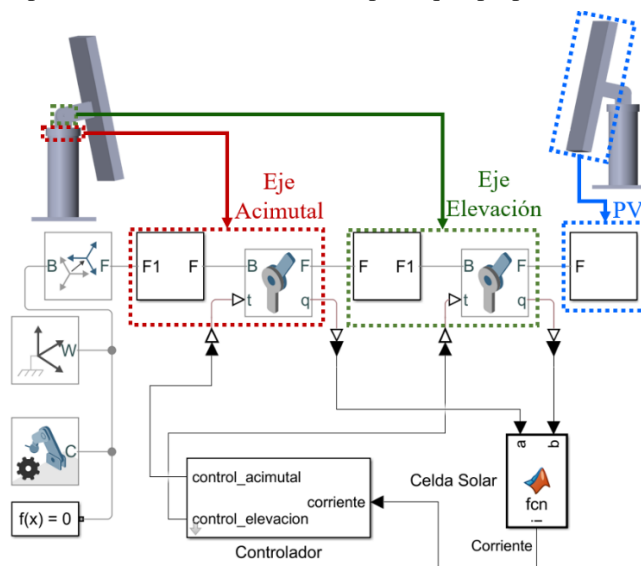


Fig. 1. Simulación MBS de un SS de dos ejes en el entorno de *Simulink*®.

señal de voltaje [20]. Cada señal recibida pasa por un bloque de acondicionamiento en el cual se busca eliminar el ruido y también realizar el escalamiento necesario para recuperar el dato de cada medición en las unidades correspondientes. Lo primero se realiza con un filtro pasa bajas de primer orden mientras que las operaciones para el escalamiento dependen de la caracterización de cada instrumento (para el pirheliómetro y el piranómetro, su fabricante proporciona la ecuación que permite calcular el valor de irradiancia como función de la señal de voltaje). El contenido de cada bloque de acondicionamiento puede observarse en la Fig. 3.

B. Monitoreo y registro de datos

Es muy común que cuando se realiza la implementación de una propuesta de un SS se deba verificar su adecuado desempeño a través de la medición de parámetros asociados con su consumo y producción energética, condiciones de operación, error de apuntamiento, entre otros. De igual forma, cuando se realizan pruebas experimentales llegan a requerirse procesos de calibración y parametrización. Para cualquiera de estos dos casos resulta de mucha utilidad poder visualizar en tiempo real las señales implícitas en el funcionamiento y operación del SS, por ejemplo, lecturas de sensores y señales de control, o bien también puede optarse por registrar estas señales en una unidad de memoria para su posterior análisis. Con esto en mente, nuevamente el conjunto de bloques de *Waijung* ofrece una forma rápida y sencilla tanto para la visualización como para el registro de señales. Esto se consigue como puede verse en la Fig. 2 donde posterior al acondicionamiento de las señales de la instrumentación éstas son enviadas a través del módulo UART y el puerto USB a una computadora donde el entorno de *Matlab-Simulink*® permite tratarlas como si hubieran sido generadas durante una simulación. La Fig. 4 muestra cómo se accede a las señales enviadas por la placa STM32-NUCLEO desde un modelo de simulación. Cabe mencionar que esta comunicación no está limitada a la recepción de señales ya que también es posible enviarlas desde la computadora hacia la

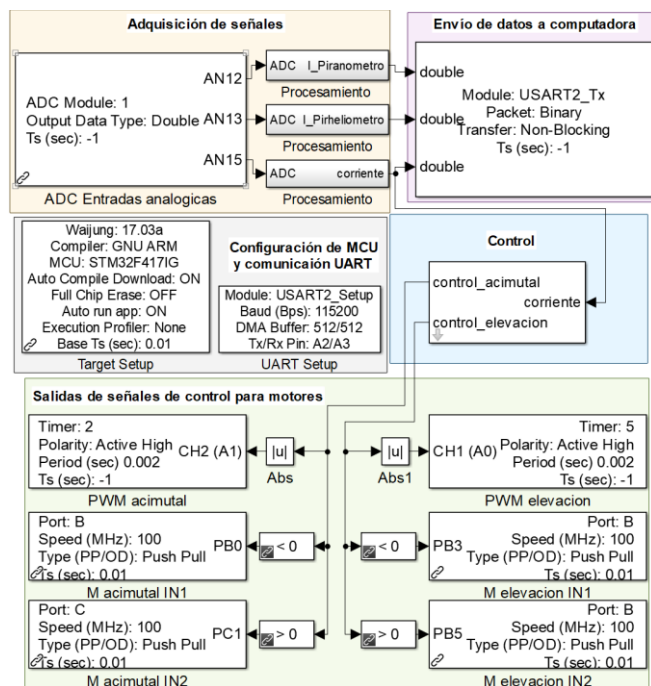


Fig. 2. Modelo de *Simulink*® con bloques de *Waijung* para la programación de una tarjeta STM32-NUCLEO dedicada al control de un SS.

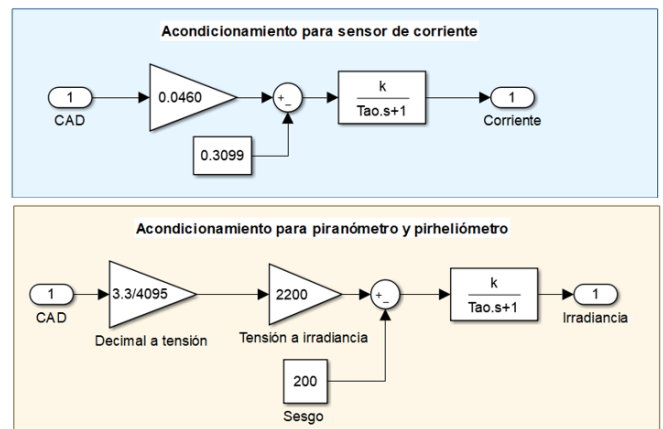


Fig. 3. Acondicionamiento de señales con bloques de *Simulink*®.

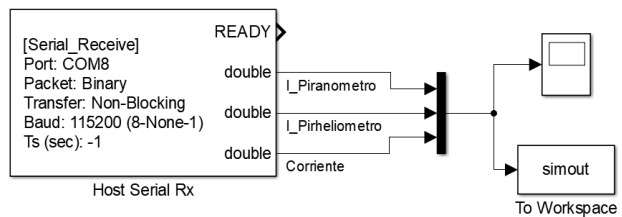


Fig. 4. Adquisición de señales de la placa STM32-NUCLEO para su visualización y registro en el *Workspace* de *Matlab/Simulink*.

tarjeta, lo cual es útil, por ejemplo, para controlar de forma manual los movimientos del SS. La frecuencia de envío y recepción de información puede configurarse a través de los bloques de *Waijung*, mientras que la frecuencia de muestro para el registro en el *Workspace* de *Matlab*® se configura directamente en el bloque “*To Workspace*” de la Fig. 4.

La selección de una frecuencia de muestro apropiada es un aspecto importante para la verificación del desempeño de un SS, ya que debe ser capaz de capturar la dinámica propia del sistema. Por ello, se necesita una frecuencia con un valor de al menos el doble de la frecuencia de señal más alta. En este caso, el *Dither Signal* [21], aunque también pueden tomarse en cuenta algunas posibles perturbaciones a las que el SS es susceptible. Estas últimas estrechamente relacionadas con las condiciones climáticas y la irradiancia solar disponible en cada momento. Como ejemplo de esto se tiene la Fig. 5 donde ha sido graficada la potencia eléctrica obtenida con un PV en un SS controlado mediante una estrategia de control no convencional (*Extremum seeking control*) durante un día soleado y uno nublado.

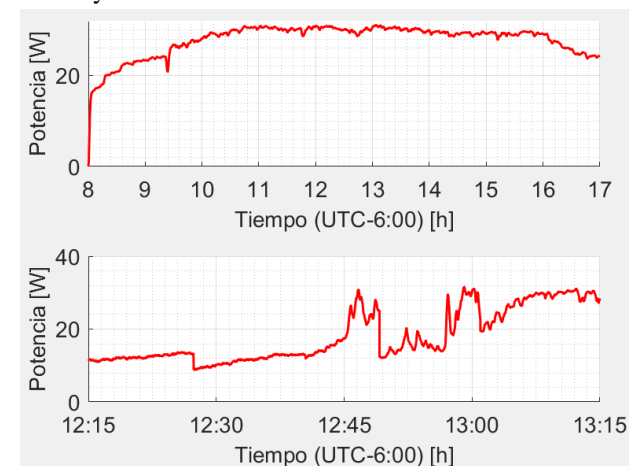


Fig. 5. Gráficas de la potencia eléctrica desarrollada por el PV de un SS. En la figura, gráfica de día soleado (arriba) y gráfica de día nublado (abajo).

IV. CONCLUSIONES

Se presentó el uso de MC como una opción con desempeño y costo aceptable para el control de SS, además, se hizo énfasis de su uso en la implementación de estrategias de control con un nivel de complejidad moderado atribuyendo esta tendencia a la variedad en el tipo de entradas y salidas disponibles en los MC como una característica común en la mayoría de ellos. No obstante, también se señaló al uso de lenguaje estructurado para su programación y a su capacidad de procesamiento y memoria como una limitante para el desarrollo de estrategias de control más complejas.

Se expuso a las placas de desarrollo con microcontroladores de la familia STM32F4 como alternativas con un buen desempeño y que tienen la posibilidad de ser programadas desde el entorno de *Matlab-Simulink*® mediante el *toolbox Waijung*, lo cual atiende directamente las complicaciones mencionadas asociadas con el uso de microcontroladores para el control de SS.

Se ejemplificó el uso de los bloques de *Waijung* dentro del entorno de *Matlab-Simulink*® en la implementación de un SS de dos ejes mostrando el procedimiento para la adquisición, acondicionamiento, visualización y registro de señales. Esto con la finalidad de destacar las ventajas que ofrece este *toolbox* y, presentándolo como un medio para facilitar la implementación de estrategias de control convencionales y no convencionales en SS.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación estuvo parcialmente financiada por el Instituto Politécnico Nacional – Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP-20240618, SIP-20241103, SIP-20241043 y SIP-20241454), y el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT Convocatoria Ciencia de Frontera 2023 CF-2023-I-1635).

REFERENCIAS

- [1] M. Schmela, R. Rossi, C. Lits, S. Kumar Chunduri, A. Shah, R. Muthyal, P. Moghe, S. Kalam, A. Jamkhedkar, S. Goel, P. Saratchandra, "Advancements in solar technology, markets, and investments – A summary of the 2022 ISA World Solar Reports", Solar Compass, volumen 6, 2023.
- [2] S. I. Palomino Resendiz, "Generación y control de trayectorias para sistemas robóticos de seguimineto solar", UPIITA – IPN, 2021.
- [3] A.Z. Hafez, A.M. Yousef, N.M. Harag, "Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volumen 91, 2018, pp. 754-782.
- [4] M. Angulo Calderón, I. Salgado Tránsito, I. Trejo Zúñiga, C. Paredes Orta, "Development and Accuracy Assessment of a High-Precision Dual-Axis Pre-Commercial Solar Tracker for Concentrating Photovoltaic Modules", Appl. Sci., 2022.
- [5] V. T. Widyaningrum, A. S. Romadhon and D. Safitri, "Solar Tracking System Dual Axis using Proportional Integral Derivative (PID) Controller," 2023 IEEE 9th Information Technology International Seminar (ITIS), Batu Malang, Indonesia, 2023, pp. 1-5.

- [6] Zakariah, J. J. Jamian, M. Amri Md Yunus, "Dual-axis solar tracking system based on fuzzy logic control and Light Dependent Resistors as feedback path elements," 2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED), Kuala Lumpur, Malaysia, 2015, pp. 139-144.
- [7] W. Aslam, Y. Xu, A. Siddique, A. Batool, M. N. Aslam, "A Method of Hybrid Solar Tracking Prototype for MPPT," 2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEEC), Chengdu, China, 2019, pp. 253-257.
- [8] B. K. S. Vastav, S. Nema, P. Swarnkar, D. Rajesh, "Automatic solar tracking system using DELTA PLC," 2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), Bhopal, India, 2016, pp. 16-21.
- [9] N. M. Isa, Y. M. N. S. Ismail, C. K. Gan, "Design of Single Axis Solar Tracking System (SASTS) Integrated with Programmable Logic Controller," 2021 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021, pp. 1-6.
- [10] O. T. Mahmood, "Programmable logic controller based design and implementation of multiple axes solar tracking system," 2013 International Conference on Electrical Communication, Computer, Power, and Control Engineering (ICECCPCE), Mosul, Iraq, 2013, pp. 101-106.
- [11] H. Fathabadi, "Novel Online Sensorless Dual-Axis Sun Tracker," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 22, no. 1, pp. 321-328, Feb. 2017.
- [12] W. Jing Min, L. Chia Liang, "Design and Implementation of a Sun Tracker with a Dual-Axis Single Motor for an Optical Sensor-Based Photovoltaic System", Department of Electrical Engineering, St. John's University, Taiwan, 2013.
- [13] H. Awad, S. Moawad, A. Atalla, "Experimental Comparison Between Microcontrollers and Programmable Logic Controllers in Sun Tracking Applications," 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2018, pp. 58-63.
- [14] K. Rao, D. J. Vaghela, M. V. Gojiya, "Implementation of SPWM technique for 3- Φ VSI using STM32F4 discovery board interfaced with MATLAB," 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, India, 2016, pp. 1-5.
- [15] Waijung Blockset, [https://waijung1.aimagin.com/\(ultima consulta: 1-5-2024\)](https://waijung1.aimagin.com/(ultima consulta: 1-5-2024)).
- [16] Mathworks, Simulink, [https://la.mathworks.com/products/simulink.html \(última consulta: 1-5-2024\)](https://la.mathworks.com/products/simulink.html (última consulta: 1-5-2024)).
- [17] STMicroelectronics, ARM Cortex-M4 High-Performance MCUs, [https://www.st.com \(última consulta: 1-5-2024\)](https://www.st.com (última consulta: 1-5-2024)).
- [18] S. I. Palomino-Resendiz, F. A. Ortiz-Martínez, I. V. Paramo-Ortega, J. M. González-Lira y D. A. Flores-Hernández, "Optimal Selection of the Control Strategy for Dual-Axis Solar Tracking Systems," in IEEE Access, vol. 11, pp. 56561-56573, 2023.
- [19] Kipp & Zonen, [https://kippzonen.com \(última consulta: 1-5-2024\)](https://kippzonen.com (última consulta: 1-5-2024)).
- [20] Maxim Integrated Products. Precision, High-Side Current-Sense Amplifiers. MAX471 datasheet, 1996.
- [21] Krstić, M. (2000). Performance improvement and limitations in extremum seeking control. Systems & Control Letters, 39(5), 313-326.
- [22] STM32CubeIDE, [https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html \(última consulta: 1-5-2024\)](https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html (última consulta: 1-5-2024)).
- [23] Fuentes-Morales, R. F., Diaz-Ponce, A., Peña-Cruz, M. I., Rodrigo, P. M., Valentín-Coronado, L. M., Martell-Chavez, F., & Pineda-Arellano, C. A. (2020). Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review. Solar Energy, 212, 203-219.