

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

Control and Performance Monitoring of Solar Tracking Systems with Embedded Software

Marco A. Peñaloza López ^{#1}, Sergio I. Palomino Resendiz ^{*2}, Diego A. Flores Hernández ^{#3}

[#] Instituto Politécnico Nacional – UPIITA, Av. Instituto Politécnico Nacional 2580, La Laguna Ticoman, Gustavo A. Madero, 07340 Ciudad de México, México

¹ mpenaloza1500@alumno.ipn.mx

³ dfloreshe@ipn.mx

^{*} Instituto Politécnico Nacional – ESIME Zacatenco, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Av. Luis Enrique Erro S/N, Gustavo A. Madero, Zacatenco, Ciudad de México, C.P. 07738, México

² spalominor@ipn.mx

Recibido: 29/09/24; Aceptado: 05/04/25

Abstract— This work shows a procedure through which it is possible to reduce the complexity of design, implementation, and tuning of non-conventional controllers for solar tracking systems. This is achieved by programming an STM32F4-NUCLEO board using a high-level language. This is made possible through the use of embedded software (*Waijung toolbox*) that enables access to the functions and blocks of Matlab-Simulink for the automatic generation and download of C code into STM32F4 microcontrollers. Additionally, the resulting configuration allows the processing resources of a computer to be easily and practically utilized, facilitating a Hardware-in-the-Loop scheme. As a result, the computer can be used as a monitoring and configuration interface, as well as a server for database storage. To validate the proposal, the development procedure and performance tests conducted with an existing solar tracker are presented.

Keywords: solar tracker; *Waijung*; STM32F4; control strategy; monitoring and configuration interface.

Resumen— Este trabajo muestra un procedimiento a través del cual es posible reducir la complejidad de diseño, implementación y ajuste de controladores no convencionales para sistemas seguidores solares. Lo anterior a través de la programación de una tarjeta STM32F4-NUCLEO en un lenguaje de alto nivel. Esto es posible gracias al uso de un software embebido (*toolbox Waijung*) que permite disponer de las funciones y bloques pertenecientes a Matlab-Simulink para la generación y descarga automática de código C en microcontroladores de la familia STM32F4. 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. Sin embargo, es importante mencionar que existen algunas problemáticas asociadas al uso de PV que usualmente pueden llegar a pasar desapercibidas. En primera instancia la tecnología fotovoltaica convencional alcanza una eficiencia de transformación de energía que apenas supera el 20%, esto considerado que se satisfacen las condiciones mínimas de operación, es decir, un cielo soleado y despejado y una incidencia directa de los rayos solares sobre la superficie del PV. No obstante, en la realidad, la producción de energía eléctrica de un PV se ve disminuida por factores como una mala orientación, condiciones climáticas y contaminación, ya sea en instalaciones domésticas, o bien, en los denominados campos solares. Por lo que, para estos casos, la satisfacción de la demanda de energía se consigue a través de la instalación de grandes superficies de captación, lo que se refleja en un uso masivo de PV [2], [3]. Estos eventualmente deberán ser sustituidos al concluir su tiempo vida, el cual es de aproximadamente 25 años. Con esto en mente, puede entenderse que el impacto ambiental asociado a los PV se centra en su potencial como fuente de desechos. Teniendo en cuenta que actualmente se puede reciclar aproximadamente el 88% de los materiales que componen un PV, se estima que para el año 2050 se generarán alrededor de 80 millones de toneladas de desechos directamente relacionados con estos dispositivos [4]. Es importante mencionar que esta problemática se ve acentuada por la carencia de una regulación formal asociada al procedimiento de desecho y reciclaje de los PV [5]. Adicionalmente, también debe considerarse que las centrales de energía fotovoltaica requieren superficies que van desde las 100 hasta las 500

hectáreas, lo que implica una modificación significativa del entorno natural [6].

Lo anterior, ha dado lugar a una nueva área de oportunidad dedicada al desarrollo de seguidores solares (SS), los cuales son dispositivos electromecánicos cuyo objetivo es garantizar la orientación de una superficie de interés de forma normal al Sol en el desarrollo de cada día, compensando constantemente los cambios en su posición aparente. La importancia de los SS radica en que permiten mantener la producción energética de un PV en un régimen alto, lo cual se consigue apuntando su superficie directamente hacia el Sol con un margen de error acotado entre $\pm 2^\circ$ para tecnología fotovoltaica convencional. Adicionalmente, los SS también permiten incluir a los dispositivos ópticos (lentes y espejos) para la transformación de la energía solar en térmica ya que, a diferencia de los PV, el seguimiento de la trayectoria solar para estos dispositivos es imprescindible para su correcto funcionamiento.

Los SS se clasifican en función de los ejes o grados de libertad (GDL) con que cuentan. Los de un solo eje son capaces de compensar los cambios en la posición aparente del Sol ocasionados por el movimiento de rotación de la Tierra, sin embargo, para reproducir completamente la trayectoria solar a lo largo de todo un año se deben contemplar las variaciones estacionales derivadas del movimiento de traslación y del ángulo de inclinación con respecto a la eclíptica, para lo cual se utilizan los SS de 2 ejes. Por otro lado, también puede realizarse una clasificación considerando la forma en que se realiza el seguimiento de la trayectoria [7]. En este sentido se identifican 5 tipos de seguimiento: activo, cronológico, pasivo, semipasivo y manual. 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).

II. CONTROL DE SEGUIDORES SOLARES

A. Dispositivos para el control de seguidores solares

El seguimiento solar activo se realiza a través de la construcción de un lazo de control cerrado, es decir, en el que existe una retroalimentación a través de sensores que miden magnitudes físicas directamente relacionadas con la incidencia de la radiación solar (temperatura, luminosidad, irradiancia, corriente eléctrica, etc.) y que, además, están dispuestos en arreglos específicos que permiten generar un vector de posición angular con respecto al sol (ángulos acimutal y de elevación). En la literatura se encuentran diferentes diseños y configuraciones de sensores con este propósito, por ejemplo, en trabajos como [8], [9] se presentan arreglos de sensores de luminosidad e incluso en [10] se utiliza un sensor de visión. No obstante, estos dispositivos también se ofrecen de forma comercial [11].

Por otro lado, la información de la posición relativa al Sol proporcionada por los sensores es interpretada por una unidad de control como un error de seguimiento, a partir del cual se genera una señal de control que es enviada a los actuadores (motores eléctricos) con el objetivo de corregir dicho error. La forma en que se construye la señal de control, así como su naturaleza, depende directamente de la ley de control que se

utilice, además, está acotada por el tipo de señales que la unidad de control puede proporcionar y recibir.

Para el caso del seguimiento solar cronológico el funcionamiento se basa en un lazo de control abierto, el cual comienza por conocer la posición del Sol a través de métodos numéricos como el de [12] o el de [13], los cuales utilizan parámetros de tiempo (fecha y hora) y ubicación geográfica para calcular la trayectoria solar. Luego, los actuadores son accionados para orientar la superficie de interés hacia la posición calculada. Es posible que en este movimiento exista implícito un lazo de control cerrado para el control de posición, sin embargo, no existe una forma de determinar si en efecto se está apuntando al Sol adecuadamente, por lo tanto, se considera que el sistema es de lazo abierto al menos en términos de seguimiento solar.

Tanto para el caso del seguimiento solar activo como el cronológico se requiere una unidad de control que gobierne el movimiento de los actuadores, ya sea a partir de una ley de control en lazo cerrado o bien con base en los cálculos fuera de línea de la trayectoria solar. En la literatura se reportan diferentes diseños para SS que utilizan como unidad de control Controladores Lógicos Programables (PLC), microcontroladores (MC), computadoras de placa única e incluso computadoras personales [14]. 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.

En [14], [15], [16] se presenta una propuesta de seguimiento solar activo para SS de dos ejes usando como unidad de control una placa Arduino, de la cual se utilizan sus entradas analógicas para recibir la señal de los sensores utilizados en cada caso para determinar la posición relativa al Sol. Los controladores desarrollados para estos trabajos son On-Off, Proporcional Integral Derivativo (PID) y de lógica difusa (Fuzzy), respectivamente. Por lo tanto, las señales de control que se generan son del tipo digital para el controlador On-Off, mientras que los controladores PID y Fuzzy emulan una señal analógica a través de la Modulación por Ancho de Pulso (PWM) dado que no es posible obtener una señal puramente analógica desde la placa Arduino. En [17] se aborda una propuesta de control de seguimiento de tipo cronológico, es decir, se construye bajo un esquema de lazo abierto basado en un reloj de tiempo real y un algoritmo para el cálculo de la trayectoria solar ejecutado por una placa Arduino.

El uso de PLC puede encontrarse en trabajos como [18], [19] donde se tiene un seguimiento solar activo gracias al uso de fotorresistores como sensores, o bien también hay trabajos como [20] 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 [21] donde la propuesta desarrollada opera a través del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Finalmente, en [22] se presenta una propuesta de control On-Off para seguimiento activo desarrollada mediante amplificadores operacionales.

Una revisión sobre el tipo de controladores y tecnología más utilizada para SS se muestra en [23]. Los resultados, se centran en una clasificación sobre la implementación de estrategias de control clásicas y modernas, esto para trabajos experimentales, así como a nivel simulación. Y, cabe mencionar que en cada caso se indica el hardware utilizado. En el trabajo se señala al control On-Off como la estrategia predominante en tareas de seguimiento de trayectoria solar, representado el 57.02 % de los casos consultados (ver Fig. 1). Esto gracias a su simplicidad (en términos de desarrollo, implementación y configuración) y bajo costo. No obstante, como se indica en [14], presenta importantes desventajas relacionadas con su baja precisión e incapacidad para el rechazo de perturbaciones. En consecuencia, dentro de esta misma revisión, estrategias más complejas y que presentan un mejor desempeño en términos de robustez, precisión y consumo energético como Fuzzy y PID (y sus variantes) representan el 10.53 % y el 6.14 % de los trabajos consultados, respectivamente. Finalmente, las estrategias de control modernas, como las redes neuronales, el regulador cuadrático lineal, etc., en conjunto figuran con el porcentaje restante (26.31 %), ya que, a pesar de presentar resultados favorables (como se reporta en [24]), generalmente demandan un mayor esfuerzo para su programación y sintonización. Por otro lado, en lo que refiere a los dispositivos de control para trabajos con resultados experimentales, ya sea para estrategias de control clásicas o modernas, se destaca a los MC como una alternativa importante para el desarrollo de SS, no solo por el amplio uso que se reporta en la literatura, sino también porque, en comparación con otras opciones como los PLC, presentan un desempeño similar, pero con un costo aproximadamente 30 % menor [25].

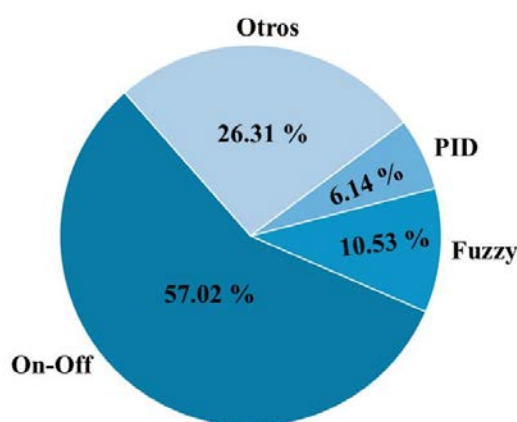


Fig. 1. Estrategias de control utilizadas en trabajos de seguimiento de trayectoria solar, [23].

B. Software embebido

Considerando lo mencionado hasta ahora, puede entenderse que el uso de MC para el control de SS permite desarrollar estrategias de control modernas, con un considerable nivel de complejidad y que presentan un mejor desempeño en términos de consumo energético y precisión de seguimiento [24]. Esto sin incrementar innecesariamente el costo de la implementación. Además, comúnmente los MC, (incluso de gamma baja) disponen de entradas analógicas y salidas de tipo PWM, las cuales permiten su integración con actuadores y sensores que operan con señales de naturaleza analógica. No obstante, es importante tomar en cuenta que estos dispositivos usualmente requieren ser programados con lenguaje estructurado, lo cual puede representar una complejidad en términos de diseño y desarrollo de software,

especialmente cuando se implementan algoritmos de control avanzados.

Así, dado lo anterior, las placas de desarrollo con microcontroladores de la familia STM32F4 se presentan como una alternativa que merece ser considerada, 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* [26]. 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. No obstante, es importante mencionar que la programación en lenguaje de alto nivel de **Simulink**® es interpretada y traducida a un código equivalente en lenguaje C antes de ser descargada hacia el microcontrolador [27]. Debido al *toolbox Waijung*, este procedimiento es llevado a cabo de forma automática y 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 [28]). Por lo anterior, 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. Análisis de simulación de tipo multicuerpo y diseño de controlador.

Es bien sabido que el entorno de bloques que ofrece **Matlab-Simulink**® [29] 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, del inglés: *MultiBody Simulation*), 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 [30] se obtiene de forma automática al utilizar los bloques de *Waijung*. Este procedimiento ha sido reportado en trabajos como [24] 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.

De lo anterior, bajo el desarrollo de un procedimiento similar, en este trabajo se llevó a cabo una MBS a partir de un modelo tridimensional del SS creado en **SolidWorks**® 2020, el cual, si bien no corresponde exactamente con la construcción del SS utilizado durante la experimentación, sí preserva sus características fundamentales, esto es número y

disposición de juntas, masas, momentos de inercia y, en general, una geometría similar. Posteriormente se utilizó el *toolbox Simscape Multibody Link* para la exportación del modelo tridimensional a un archivo de tipo “XML”, el cual es interpretado desde el entorno de **Matlab-Simulink®** para su representación como un sistema robótico de 2 GDL con configuración revoluta-revoluta en cadena cinemática abierta (para obtener mayor información sobre el procedimiento descrito consultar [31]). Esto puede observarse en la Fig. 2 donde se muestra el modelo tridimensional del SS de dos ejes (acimutal y de elevación), así como el diagrama de bloques de **Simulink®** resultado de la exportación a través de *Simscape Multibody Link*.

Cabe mencionar que deben tomarse en cuenta algunas consideraciones durante la generación del modelo tridimensional para que sea interpretado correctamente en el entorno de **Simulink®**. Es decir, que su representación como sistema robótico sea equivalente a la esperada. Por ello, este modelo en particular es el resultado del ensamble de tres piezas: Base (marco inercial), Eje acimutal (primera revoluta) y Eje de elevación (segunda revoluta), cuyo acoplamiento se realizó especificando como relación de posición la concenricidad en los puntos donde ocurre el movimiento característico de una junta tipo revoluta. En otras palabras, cada acoplamiento especificado con relación de posición concéntrica es interpretado como una junta de tipo revoluta por lo que se debe ser cuidadoso con el número de piezas utilizadas para el ensamble.

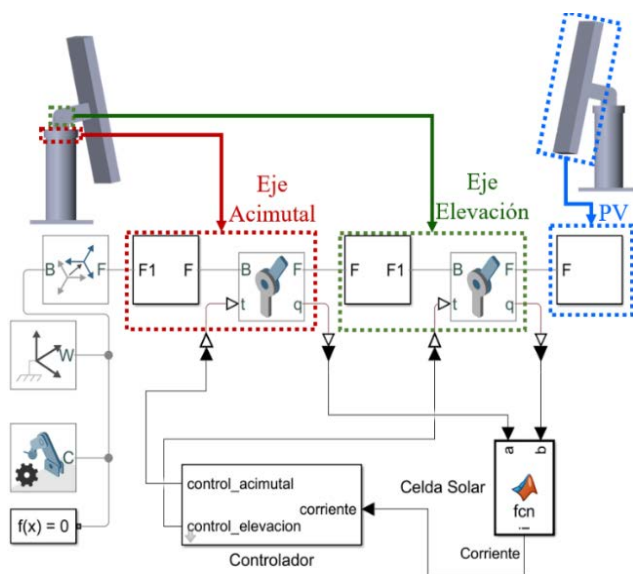


Fig. 2. Simulación MBS de un SS de dos ejes en el entorno de **Simulink®**.

La representación del SS como sistema robótico en **Simulink®** admite una serie de configuraciones que permiten aumentar la proximidad del modelo de movimiento de junta a la realidad, esto es añadir fuerzas de tipo disipativas, fuerzas asociadas con resortes y la especificación del punto de equilibrio. Además, también permite controlar el movimiento de las juntas a través de entradas de tipo par, así como monitorear su posición, velocidad y aceleración como salidas. De esta forma es posible diseñar y probar esquemas de control a nivel simulación que sean fácilmente extrapolables a la realidad. En este sentido, la Fig. 2 también muestra la construcción de un lazo cerrado de control a través de la adición de un bloque que modela la celda solar y otro encargado del control de seguimiento de trayectoria. El primero se modela siguiendo la Eq. (1), la cual expresa la

corriente eléctrica desarrollada por un PV como una función de su orientación (descompuesta en un ángulo acimutal y uno de elevación) con respecto a la posición del Sol [32]:

$$i = KIS(s(\alpha_0) s(\alpha) + c(\alpha_0) c(\beta_0) c(\alpha) c(\beta) + c(\alpha_0) s(\beta_0) c(\alpha) s(\beta)), \quad (1)$$

siendo I la irradiancia disponible, S la superficie del PV y K una constante de proporcionalidad. Luego, α y β son los ángulos acimutal y de elevación, respectivamente, y corresponden a la orientación del PV, mientras que α_0 y β_0 son los ángulos que describen la posición del Sol (es decir, la trayectoria de referencia). Por otra parte, cabe mencionar que por simplicidad en la notación $s(\cdot)$ y $c(\cdot)$ representan a las funciones trigonométricas seno y coseno, respectivamente.

Es importante mencionar que en la Fig. 2 el bloque denominado “Controlador” se compone de un algoritmo basado en un esquema de optimización denominado *Extremum Seeking Control*, el cual introduce al sistema perturbaciones con naturaleza periódica y oscilatoria, ante las cuales el sistema responde y ocasiona la convergencia hacia el punto de máxima potencia eléctrica. Lo anterior, asistido del funcionamiento de un esquema de control Proporcional-Integral [32]. Este tipo de algoritmos de control son parte de un conjunto de técnicas de optimización conocidas como seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, del inglés: *Maximum Power Point Tracking*). La simulación de este lazo de control se realizó considerando una posición inicial de la celda en $(\alpha, \beta) = (0^\circ, 0^\circ)$ y la posición del Sol en $(\alpha_0, \beta_0) = (30^\circ, 45^\circ)$, así como una corriente máxima de 1 A , obteniéndose la respuesta presentada en la Fig. 3, la cual es bastante favorable debido a que presenta una rápida convergencia y una estabilización muy próxima al valor máximo de corriente eléctrica.

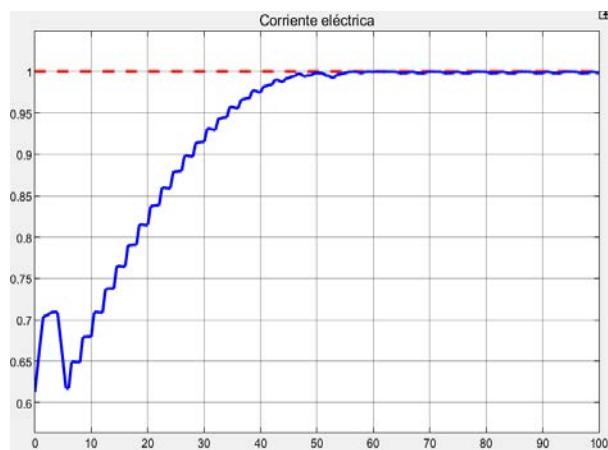


Fig. 3. Simulación de corriente eléctrica del PV.

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

A través del análisis de MBS descrito hasta ahora, se valida el funcionamiento del controlador propuesto para el seguimiento de la trayectoria solar, por lo que en este punto resulta adecuado buscar su implementación en un SS físico. Esto es posible de una forma muy sencilla con el *toolbox Waijung* gracias al cual se programa el mismo bloque de control mostrado en la Fig. 2 en un microcontrolador STM32-F446RE, mismo que está contenido en 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 de MBS, mientras que para el uso con *Waijung* se ha optado por **Matlab®** 2015b. Esto no representa un problema para el diseño del controlador siempre y cuando este sea construido con bloques disponibles en ambas versiones. Por otro lado, para implementar el lazo de control completo es necesaria la adición en el modelo de **Simulink®** de bloques dedicados a la adquisición de señales, generación de salidas de control, configuración de programación y, opcionalmente, comunicación a través del protocolo UART. De esta manera el diagrama de bloques que contiene todo lo descrito hasta ahora para el control de un SS físico se presenta en la Fig. 4 donde para facilidad de entendimiento se han señalado con colores las diferentes secciones que lo componen, de las cuales resultan de particular interés la de “Adquisición de señales” y la de “Salidas de señales de control para motores”.

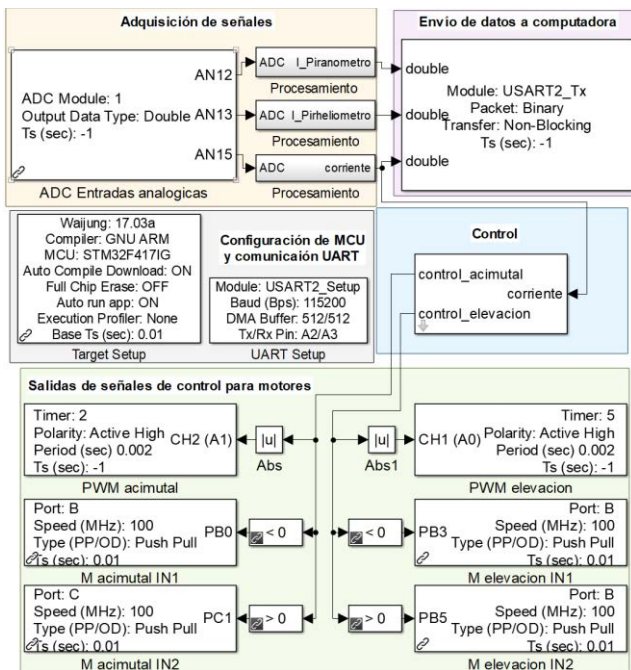


Fig. 4. Modelo de **Simulink®** con bloques de *Waijung* para la programación de una tarjeta STM32-NUCLEO dedicada al control de un SS.

En la primera de estas se observa un bloque que permite realizar la lectura de entradas analógicas ya que está asociado con un convertidor analógico digital. Estas entradas corresponden con la medición de irradiancia solar global de un piranómetro e irradiancia solar directa de un pirheliómetro, instrumentos de la marca **Kipp&Zonen®** modelos SHP1-V y SMP6-V, respectivamente [33]. La conexión de estos instrumentos (mostrada en la Fig. 5) es bastante sencilla ya que ambos proporcionan como salida una señal analógica de voltaje en un intervalo de 0 – 1 V, la cual puede ser conectada directamente a la placa de desarrollo, admiten una alimentación de entre 5 y 30 VCD y utilizan la misma expresión matemática, mostrada en la Eq. (2), para recuperar el valor de irradiancia a partir de la salida de voltaje [33]:

$$E_{solar} = 2.2 V - 200, \quad (2)$$

donde E_{solar} es irradiancia solar en W/m^2 y V es voltaje en mV.

Asimismo, también se tiene la lectura de un sensor de corriente MAX471, el cual ha sido conectado siguiendo las especificaciones de su fabricante (ver Fig. 6) [34]. Además, para este sensor en particular ha sido necesario realizar un

proceso de caracterización utilizando un amperímetro digital como instrumento patrón, determinando así que presenta el comportamiento descrito en la Eq. (3):

$$I_{PV} = 0.0460 I_{CAD} - 0.3099, \quad (3)$$

donde I_{PV} es la corriente eléctrica desarrollada por el PV en A y I_{CAD} es el valor proporcionado directamente por el bloque asociado al convertidor analógico digital.

Cada señal analógica 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, cuyo tiempo de respuesta (T_{ao}) se configuró en función de la dinámica con la que se construye la señal de modulación (*Dither signal*) propia del algoritmo de control. Lo anterior con el objetivo de garantizar la sincronía de eventos o cálculos computacionales, para mayor detalle consultar [35]. En específico su valor es 0.001 ms, también cabe mencionar que este valor se relaciona con el tiempo de muestreo en el que se adquieren y procesan las señales en el microcontrolador. Por otro lado, las operaciones para el escalamiento corresponden con las Eq. (2) y (3). El contenido de cada bloque de acondicionamiento puede observarse en la Fig. 7. Cabe resaltar que el sensor de corriente es el único que interviene como retroalimentación para la generación de las señales de control, ya que los otros dos instrumentos son dedicados solo al monitoreo.

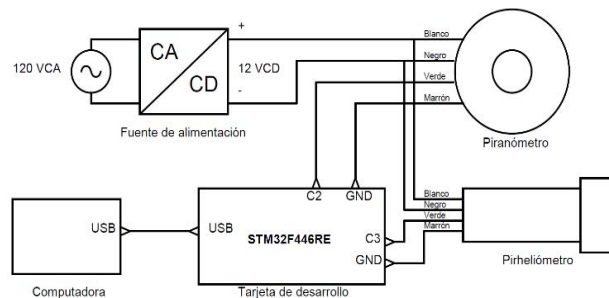


Fig. 5. Conexión eléctrica del piranómetro y el pirheliómetro.

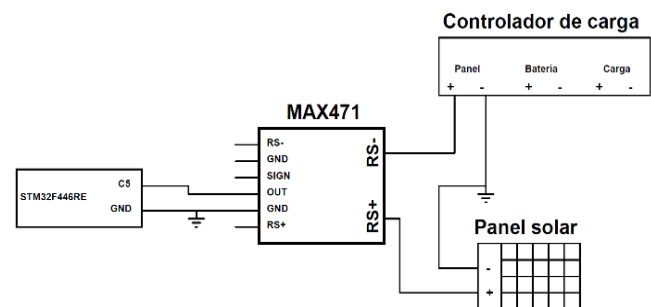
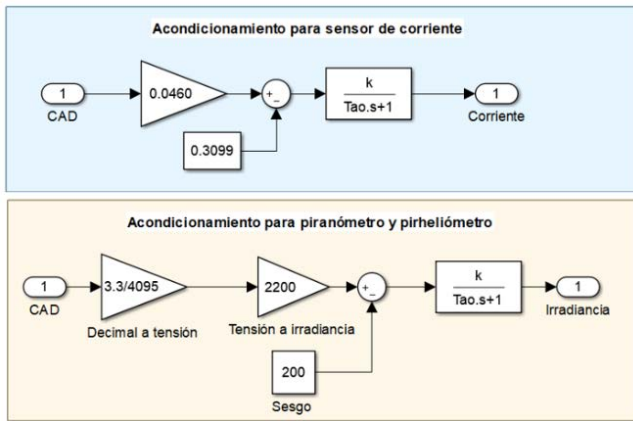


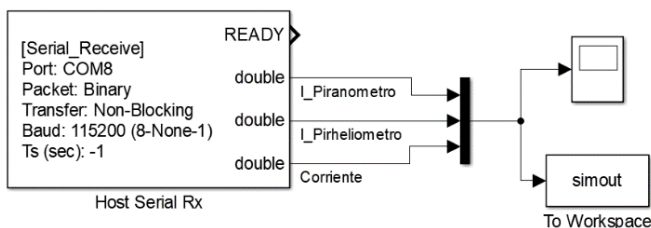
Fig. 6. Conexión eléctrica del sensor de corriente.

Por otro lado, la sección “Salidas de señales de control para motores” de la Fig. 4 se establece como la etapa encargada de convertir las señales del controlador en salidas que permitan manipular el movimiento de los motores. Para esto es importante tomar en cuenta que se utilizaron motores de corriente directa con tensión y corriente nominales de 12 V y 0.25 A, respectivamente, así como un puente H L298D. En consecuencia el control de cada motor se realizó a través de dos salidas digitales que determinan el sentido de giro y una de modulación por ancho de pulso para controlar la velocidad.

Fig. 7. Acondicionamiento de señales con bloques de **Simulink®**.

C. Monitoreo y registro de datos para evaluación de desempeño.

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. 4 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. 8 muestra cómo se accede a las señales enviadas por la placa STM32-NUCLEO desde un modelo de simulación.

Fig. 8. Adquisición de señales de la placa STM32-NUCLEO para su visualización y registro en el *Workspace* de Matlab/Simulink.

Cabe mencionar que esta comunicación no está limitada a la recepción de señales ya que también es posible enviarlas desde la computadora hacia la 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 muestreo para el registro en el *Workspace* de **Matlab®** se configura directamente en el bloque “To Workspace” de la Fig. 8.

La selección de una frecuencia de muestreo 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* [35], 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.

Para validar el sistema propuesto, en este trabajo se puso a prueba su desempeño con fines de gobernar el funcionamiento de un SS prototipo existente en un periodo comprendido desde las 8:00 a.m. hasta las 5:00 p.m. del día 6 de febrero de 2024, en las instalaciones del Laboratorio de Sistemas Dinámicos Aplicados (ubicado en la UPIITA-IPN en la Ciudad de México) cuyas coordenadas geográficas son: 19.510736° de latitud y -99.125897° de longitud. Cabe mencionar que las condiciones de este día en particular fueron predominantemente favorables, es decir, con un cielo soleado y despejado. Durante la operación del SS se monitorearon y registraron las mediciones realizadas con el piranómetro, el pirheliómetro y el sensor de corriente, además, se incluyó un PV con orientación fija para establecer un punto de comparativa respecto al cual evaluar el desempeño del SS (cabe mencionar que la potencia eléctrica desarrollada por el PV fijo se registró de forma manual y periódica utilizando un voltímetro y un amperímetro digitales). El PV fijo y el SS solar utilizados para esta prueba experimental pueden observarse en la Fig. 9.

De lo anterior, se obtuvieron como resultado las gráficas que se muestran en la Fig. 10 donde claramente el SS presenta un mejor desempeño al desarrollar una potencia eléctrica superior en todo momento, además, al calcular el área bajo estas curvas se obtiene el total de energía producida, no obstante, es importante tomar en cuenta la energía consumida por la tarea de seguimiento, la cual fue cuantificada por un medidor de consumo.



Fig. 9. PV fijo y SS solar utilizados en pruebas experimentales.

En este sentido, el total de energía disponible que proporciona el SS se presenta en la Tabla I, donde puede notarse que incluso después de restar la energía consumida por el SS, este proporciona un 27% más de energía disponible con respecto al PV fijo. Este resultado toma relevancia al compararlo con los conclusiones reportadas en trabajos como [14] donde a través de un análisis por simulación se estima un incremento del 37.5 % en la producción anual de energía de un PV fijo comparado con un SS; en [16] la implementación de una estrategia de control Fuzzy en un SS de dos ejes entregó un

incremento del 18.13 % bajo la misma comparativa; finalmente, en [21] se reporta un incremento que oscila entre el 28.8 % y 43.6 % en función de la estación del año. Cabe mencionar que en estos trabajos no se especifica si el resultado reportado considera o no el consumo energético propio del SS. Además, también es importante tomar en cuenta que, para realizar una comparativa completamente justa, el desempeño de cada propuesta debería evaluarse bajo exactamente las mismas condiciones de operación y considerando los mismos criterios de desempeño.

Por otro lado, las mediciones realizadas con el pirheliómetro y el piranómetro, además de brindar información sobre la irradiancia disponible, permiten calcular la eficiencia de los PV utilizados, esto gracias a que la energía eléctrica producida puede asociarse con la irradiancia solar global en el caso del PV fijo y con la irradiancia solar directa para el SS. Lo anterior resulta evidente al mirar la similitud entre las gráficas de las Fig. 10 y 11. El cálculo de la eficiencia se realiza considerando que ambos paneles cuentan con una superficie de 0.198 m^2 y, por lo tanto, la energía que se produjo en ambos casos se multiplica por un factor de 5.05 para suponer una superficie de 1 m^2 , de esta manera la eficiencia es el cociente de los valores de energía (ver Tabla II) del SS y el pirheliómetro o bien del PV fijo y el piranómetro. El promedio de ambos resultados arrojó una eficiencia del 20.39 %.

Finalmente, se realizó una prueba más para evaluar los efectos de las condiciones climáticas asociadas a un pronóstico de lluvia en el desempeño de un SS. Esta prueba corresponde con el día 13 de febrero de 2024 en un horario de las 12:15 p.m. a la 1:15 p.m. De forma similar a la prueba con clima soleado y despejado, en este caso se tienen las gráficas de potencia eléctrica desarrollada en la Fig. 12, mientras que el resumen de desempeño con valores numéricos se muestra en la Tabla III, de la cual puede notarse que bajo estas condiciones la energía disponible proporcionada por el SS es incluso menor a la del PV fijo.

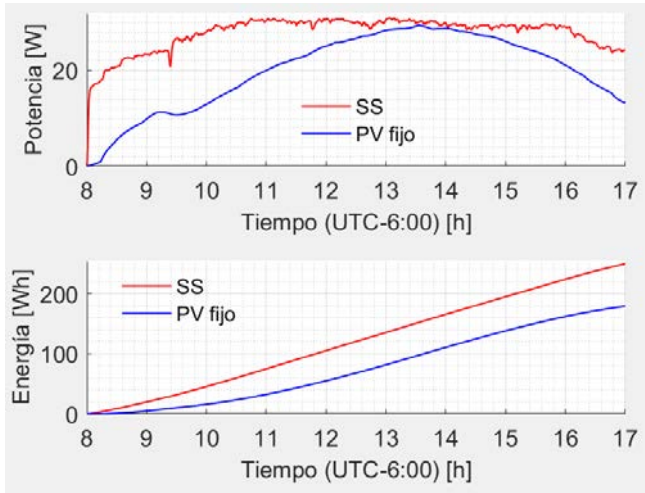


Fig. 10. Potencia eléctrica desarrollada y cálculo de energía mediante integración.

TABLA I
RESULTADOS NUMÉRICOS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

Sistema	Energía acumulada	Energía consumida	Energía disponible
SS	250.2 Wh	21 Wh	229.2 Wh
PV Fijo	179.4 Wh	No aplica	179.4 Wh

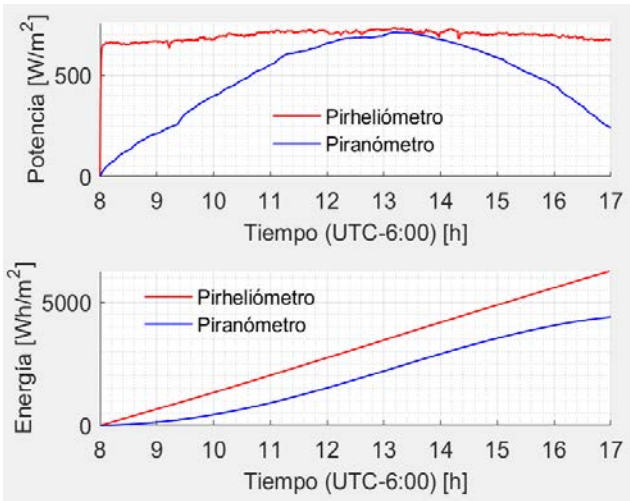


Fig. 11. Irradiancia global y directa y cálculo de energía disponible mediante integración.

TABLA II
RESULTADOS NUMÉRICOS DE ENERGÍA ACUMULADA CON PIRHELÍÓMETRO, PIRANÓMETRO, SS Y PV

Sistema	Energía [Wh/m²]
Pirheliómetro	6266
Piranómetro	4393
SS	1263.51
PV fijo	905.97

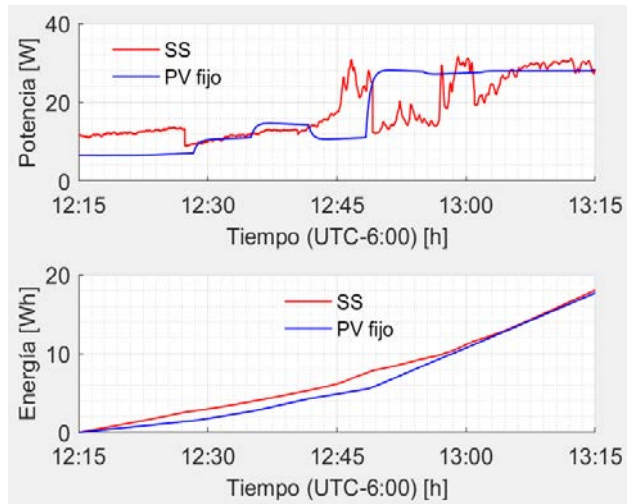


Fig. 12. Potencia eléctrica desarrollada y cálculo de energía mediante integración durante condiciones climáticas adversas.

TABLA III
RESULTADOS NUMÉRICOS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN CONDICIONES CLIMÁTICAS ADVERSAS

Sistema	Energía acumulada	Energía consumida	Energía disponible
SS	18.02 Wh	3.1 Wh	14.92 Wh
PV Fijo	17.68 Wh	No aplica	17.68 Wh

IV. CONCLUSIONES

Se expuso a la energía solar como una alternativa sostenible para la obtención tanto de energía eléctrica como térmica, sin embargo, al mismo tiempo se presentaron las problemáticas asociadas con la instalación de superficies de captación excesivamente grandes, así como a la inexistencia de una normativa formal para el desecho o reciclaje de los PV.

Se mostró a los SS como un área de oportunidad que surge de la necesidad de garantizar las condiciones mínimas de operación de un PV. Esto resulta en la posibilidad de mantener altos niveles de producción energética con lo que, al mismo tiempo, se reduce la superficie de captación necesaria para satisfacer una demanda energética específica.

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 como un aspecto a considerar para el desarrollo de estrategias de control modernas.

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 logro el desarrollo de una estrategia de control no convencional par un SS de dos ejes existente. En específico, el controlador se basa en un esquema de optimización denominado ESC. Para validar numéricamente su desempeño, se llevó a cabo una metodología experimental que consta de dos etapas. La primera corresponde a la realización de pruebas de seguimiento en entorno de simulación empleando un modelo de SS equivalente. Lo que permite validar y verificar su viabilidad, así como establecer configuraciones funcionales que pueden ser exportadas a la realidad. Y en la segunda etapa, se tiene la prueba de funcionamiento y comparación de desempeño de producción de energía respecto a un sistema con orientación fija. Dando como resultado un desempeño muy favorable y una disponibilidad de energía superior en un 27%, esto considerando que se tienen condiciones de clima soleado y despejado.

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-20251300 y SIP-20250023), 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] Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., and Gekas, V. Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy* 33, 3 (2005), 289–296. 8.
- [4] Unión Española Fotovoltaica, <https://www.unef.es> (última consulta 21-02-2025).
- [5] Shahariar-Chowdhury, Md., Sajedur-Rahman, K., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, Md., Kiong-Tiong, S., Sopian, K., Amin, N. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews* 27 (2020).
- [6] SENER, Balance Nacional de energía 2023, <https://www.gob.mx/sener> (última consulta 21-02-2025).
- [7] 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.
- [8] Palomino-Resendiz, S. I., Flores-Hernández, D. A., Lozada-Castillo, N., Luviano-Juárez, A. High-Precision Luminosity Sensor for Solar Applications. In *IEEE Sensors Journal* 19, 24 (2019), IEEE, 12454-12464.
- [9] Leñero-Bardallo, J. A., Farian, L., Guerrero-Rodríguez, J. M., Carmona-Galán, R., Rodríguez-Vázquez, Á. Sun Sensor Based on a Luminance Spiking Pixel Array. In *IEEE Sensors Journal* 17, 20 (2017), IEEE, 6578-6588.
- [10] Ruelas, A., Velázquez, N., Villa-Angulo, C., Acuña, A., Rosales, P., Suastegui, J. A solar position sensor based on image vision. *Sensors* 17, 8 (2017), 1742.
- [11] SOLAR MEMS Technologies, <https://solar-mems.com/> (última consulta 12-02-2025).
- [12] Spencer, J. Fourier series representation of the position of the sun. *Search* 2, 5 (1971), 172.
- [13] Cooper, P. The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy* 12, 3 (1969), 333–346.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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 (APEC), Chengdu, China, 2019, pp. 253-257.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] H. Fathabadi, "Novel Online Sensorless Dual-Axis Sun Tracker", in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 321-328, Feb. 2017.
- [22] 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.
- [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.
- [24] 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.

- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Waijung Blockset, <https://waijung1.aimagin.com/> (última consulta: 1-5-2024).
- [28] STM32CubeIDE, <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html> (última consulta: 1-5-2024).
- [29] Mathworks, Simulink, <https://la.mathworks.com/products/simulink.html> (última consulta: 1-5-2024).
- [30] STMicroelectronics, ARM Cortex-M4 High-Performance MCUs, <https://www.st.com> (última consulta: 1-5-2024).
- [31] Mathworks, Help Center, Simscape Multibody Link, https://la.mathworks.com/help/smlink/index.html?s_tid=CRUX_lftnav (última consulta: 24-09-2024).
- [32] M. A. Peñaloza-López, "Desarrollo e implementación de una estrategia de control no convencional basada en esquemas de optimización para aplicaciones de seguimiento solar", Instituto Politécnico Nacional, México, 2024.
- [33] Kipp & Zonen, <https://kipzonen.com> (última consulta: 1-5-2024).
- [34] Maxim Integrated Products. Precision, High-Side Current-Sense Amplifiers. MAX471 datasheet, 1996.
- [35] Krstić, M. (2000). Performance improvement and limitations in extremum seeking control. Systems & Control Letters, 39(5), 313-326.