

PROTOTIPO DE CONCENTRADOR SOLAR PARA APLICACIONES EN CPV. PRIMEROS DESARROLLOS EN EL SEGUIDOR DE DOS EJES Y EL SISTEMA ÓPTICO

Luca Andrés Bastida¹, Federico Barral¹, Mariela Videla², Edgardo Sambrano¹, Juan Plá^{2,3}

¹Instituto de Tecnología Minera – Servicio Geológico Minero Argentino (INTEMIN-SEGEMAR)

Av. General Paz 5445, 1650 San Martín – Provincia de Buenos Aires

Tel. 011-5670-0100 email: edgardo.sambrano@segemar.gov.ar

²Departamento Energía Solar – Centro Atómico Constituyentes - Comisión Nacional de Energía Atómica (DES-CAC-CNEA)

³Instituto de Nanociencia y Nanotecnología-nodoCAC - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (INN-CONICET-CNEA)

Av. General Paz 1499, 1650 San Martín – Provincia de Buenos Aires

Tel. 011-6772-7128 email: jpla@tandar.cnea.gov.ar

RESUMEN: Entre las tecnologías fotovoltaicas disponibles para la generación eléctrica se encuentra CPV (*Concentrating Photovoltaics*) de alta concentración, la cual a su vez es la de mayor eficiencia de conversión energética demostrada. Esta tecnología utiliza un sistema óptico de concentración solar a los efectos de producir una reducción del costo de fabricación y, en consecuencia, es necesario utilizar un seguidor solar de dos ejes dado que solo es posible concentrar la componente directa de la radiación solar. En este marco, se presentan los avances realizados en un prototipo de seguidor solar económico de dos ejes para la aplicación mencionada más arriba. Basado en el microcontrolador de 32 bits stm32f401, utiliza dos estrategias de control en cooperación para el seguimiento del sol: un algoritmo para calcular las efemérides solares y un sistema de control a lazo cerrado, utilizando una matriz LDR (*Light-Dependent Resistor*) como sensor. Asimismo, se muestra el avance en el montaje de un prototipo de concentrador para aplicaciones en CPV, así como una serie de verificaciones del funcionamiento del equipo en condiciones de operación.

Palabras clave: energía solar, concentradores, seguidor solar, CPV.

INTRODUCCIÓN

Los últimos años han mostrado un notable desarrollo de la energía solar fotovoltaica, cuya diseminación a nivel global no reconoce fronteras. A fines de 2021, la potencia total instalada se estimaba cercana al TWp (IEA, 2022; REN21, 2022), evidenciando un fuerte crecimiento histórico a pesar de las dificultades que afectaron la economía mundial, particularmente durante la pandemia de la COVID-19 (Fig. 1).

Por otra parte, la tecnología dominante en el mercado ha sido históricamente aquella basada en el Si cristalino, hecho que se fue reafirmando durante los últimos años. En 2020 el 80% del mercado correspondió al Si monocristalino mientras que, si se considera también el Si policristalino, esta cifra se eleva al 95% (ISE, 2022). Entre las causas de esta tendencia es posible identificar la economía de escala y la optimización de los procesos industriales (particularmente la mejora en la eficiencia de conversión de las celdas solares de Si cristalino), básicamente apoyadas por políticas ejecutadas desde los estados nacionales dirigidas a promover esta tecnología. Esto llevó a una reducción del costo de los módulos fotovoltaicos (FV) del 91% entre 2010 y 2021, mientras que el costo nivelado de la energía (LCOE, *Levelized Cost of Energy*) promedio generada por solar FV se redujo en un 88%, desde USD

0,417/ kWh a USD 0,048/kWh (IRENA, 2022). Este nivel de costo ya se encuentra debajo de aquel correspondiente a la generación eléctrica por combustibles fósiles (IRENA, 2022), evidenciando el enorme potencial que se abre para el crecimiento y diseminación de la energía solar FV.

Dentro del mercado FV, la opción tecnológica CPV posee productos comerciales, y ha tenido cierto desarrollo hasta 2017 (Wiesenfarth et al., 2017), aunque aún no ha logrado una inserción significativa en dicho mercado. Entre otras razones, esto se debe a su relativamente reciente ingreso al mercado FV, y por lo tanto con escasa experiencia y datos concretos acerca de la confiabilidad de los sistemas, así como a la continua disminución de los precios de la tecnología basada en el Si cristalino. Estas circunstancias dificultan el cambio de escala y la estandarización de componentes de su industria.

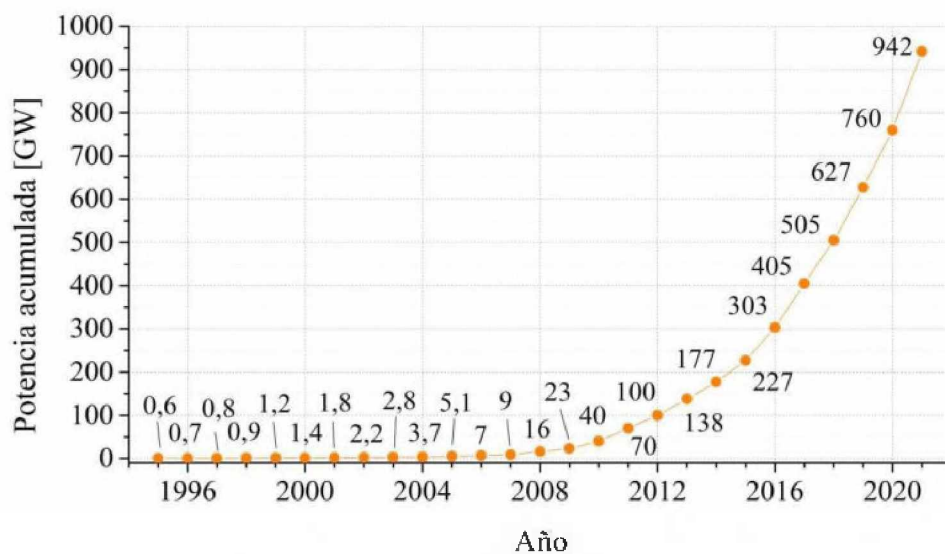


Figura 1. Evolución de la potencia instalada de energía solar FV a nivel global 1995-2021. Fuentes: REN21 (2013); REN21 (2022).

En este marco, se propone en el presente trabajo el desarrollo local de un prototipo de concentrador para aplicaciones en CPV, incluyendo un sistema de seguimiento de dos ejes de precisión a fin de satisfacer la necesidad de un ángulo de aceptación menor a 1° dado por el sistema de concentración óptica.

El prototipo incluyó el desarrollo de un concentrador óptico tipo Cassegrain, que consiste en un espejo primario parabólico y otro secundario hiperbólico. Para esto se desarrolló una técnica de curvado de vidrio basada en procesos térmicos y moldes cerámicos. Sobre estos vidrios curvados se generaron espejos de primera superficie depositando una bicapa de aluminio y SiO₂ (ver Mangano et al., 2017). Finalmente, la introducción de un elemento óptico secundario formado por espejos ubicados en una pirámide truncada invertida, permite redirigir hacia la ubicación del dispositivo activo la parte de la radiación que eventualmente haya resultado dispersada.

Por otra parte, para cumplir con los requisitos del sistema de seguimiento se desarrolló un seguidor solar de dos ejes de una precisión de ±0,75 grados basado en los trabajos de Fedor Zyrianov (Zyrianov, 2017), Matias Figueroa (Figueroa, 2018), Muhammad Chowdhury y otros (Chowdhury et al., 2019) y Kumar y Suryanarayana (Kumar y Suryanarayana, 2014).

DESARROLLO DEL CONCENTRADOR ÓPTICO

Para el desarrollo del concentrador Cassegrain se realizó el conformado de dos espejos de primera superficie parabólico e hiperbólico. La técnica desarrollada consiste en el curvado de vidrios soda-cal, a partir de una superficie parabólica/hiperbólica tallada en un soporte cerámico. Como ejemplo, se

presenta en la Figura 2 el caso del espejo hiperbólico secundario. El vidrio se introduce en una mufla donde alcanza una temperatura próxima al punto de ablandamiento $10^{6.6}$ Pas (PA), momento en el que se produce la deformación plástica del mismo entrando posteriormente en una zona de liberación de tensiones entre el punto de recocido superior, 10^{12} Pas (PRS), y el inferior, $10^{13.5}$ Pas (PRI) (ver Figs. 3 y 4).



Figura 2: Molde cerámico de superficie hiperbólica y espejo hiperbólico de primera superficie, respectivamente.

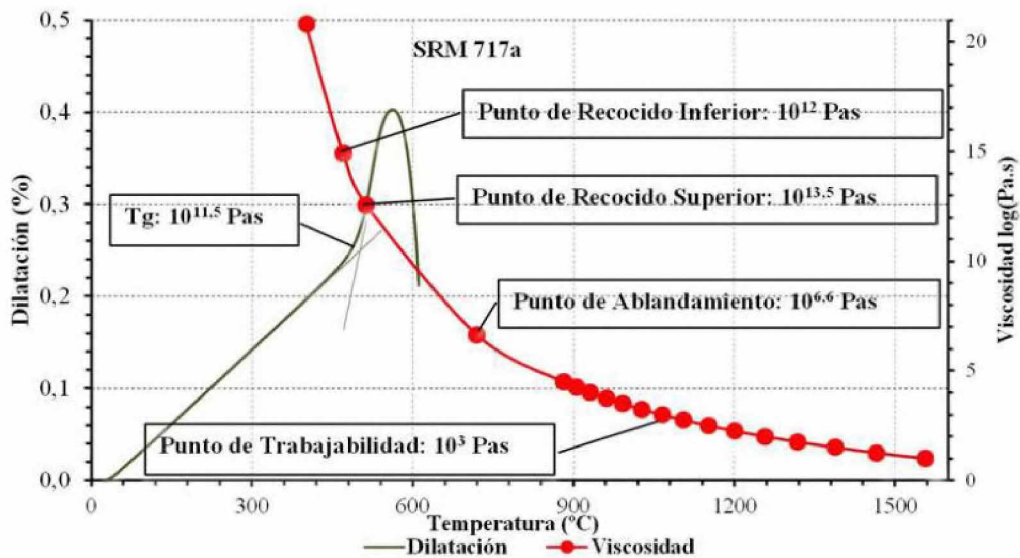


Figura 3: Curva de viscosidad y dilatación en vidrios y sus puntos característicos.

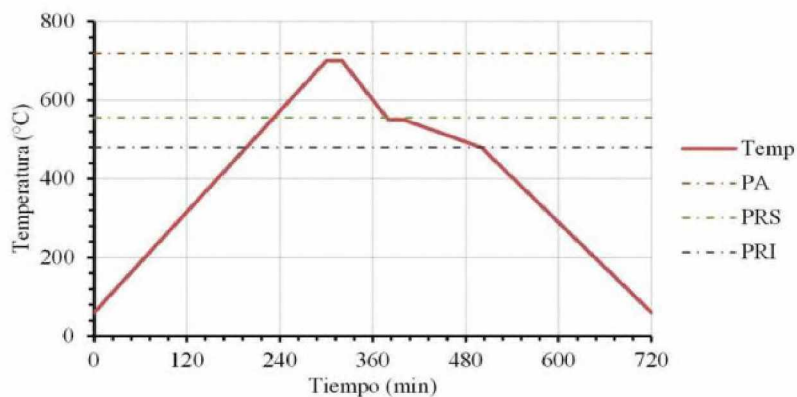


Figura 4: Curva de conformado de la superficie parabólica/hiperbólica.

Elemento óptico secundario

El elemento óptico secundario se diseñó en forma de pirámide truncada invertida reflectante, con un espejado de primera superficie (Fig. 5). Sus dimensiones son 27,8 mm de altura y 21,5 mm de longitud del borde del área base superior. Por otro lado, es de fácil construcción, y la eficiencia puede alcanzar un valor mayor al 70% (Chen y You, 2015).

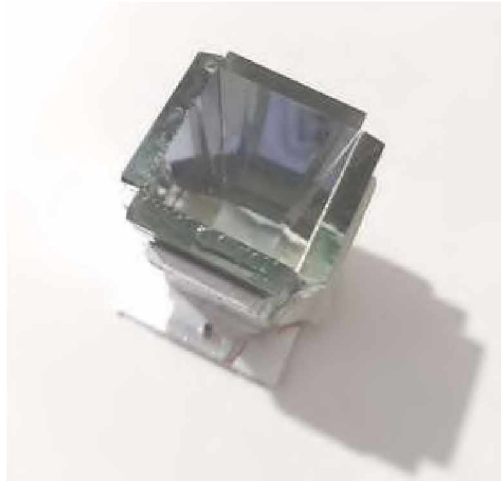


Figura 5: Elemento óptico secundario.

En la Fig. 6 se puede observar la configuración final del concentrador óptico diseñado. Resulta necesario destacar que la Fig. 6 representa el diseño esquemático final del concentrador y no el estado actual de su desarrollo ya que aún, por ejemplo, no fue implementado el ensamblado de la celda solar ni se realizaron por lo tanto mediciones de su desempeño desde el punto de vista eléctrico. Cabe aclarar asimismo que dicho concentrador fue dimensionado para ser utilizado con una celda solar de triple juntura estándar InGaP/GaAs/Ge de 10x10 mm², definiéndose para el espejo primario un diámetro de 200 mm. Resulta de esta manera una concentración nominal de 400x. Este valor es una aproximación en condiciones ideales, tal como se indica en el artículo Tsai, 2015.

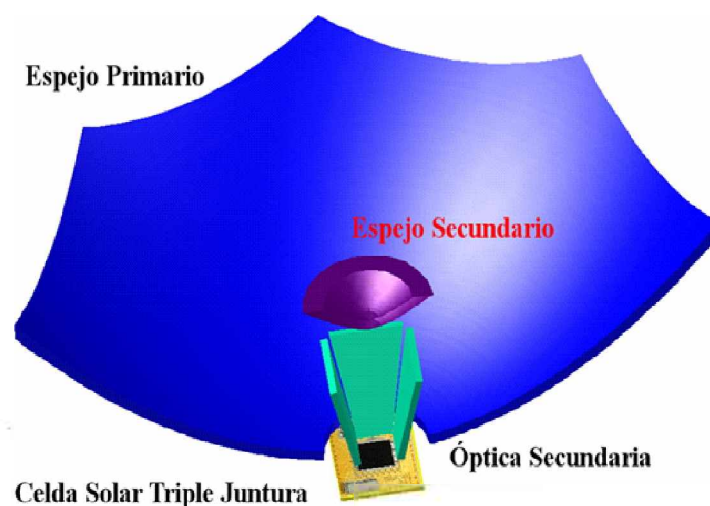


Figura 6: Esquema del concentrador Cassegrain.

SEGUIDOR DE DOS EJES

Concepto general

El equipo cuenta con dos mecanismos que trabajan en conjunto para el seguimiento del sol: un algoritmo de cálculo que estima la posición del sol según la ubicación y la hora y, por otro lado, un sensor óptico que rastrea al sol durante su inicialización y calibración periódica. De esta manera, el sensor óptico se utiliza para orientar diariamente al concentrador solar, y posteriormente el seguimiento del sol queda a cargo del algoritmo.

Para el algoritmo de cálculo utilizamos el algoritmo del NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), una agencia científica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos cuyas actividades se centran en monitorear las condiciones de los océanos y la atmósfera. El algoritmo solar del NOAA se basa en ecuaciones desarrolladas en el libro “Astronomical Algorithms” de Jean Meeus (NOAA, 2022).

Según la página del NOAA, el algoritmo tiene una precisión teórica de 1 minuto de arco ($\pm 0.0166^\circ$). Más allá de esto, se realizó una comparación en relación con otros algoritmos en línea, pudiéndose asegurar que tiene una precisión de al menos $\pm 0,07$ grados. El algoritmo tiene un intervalo operativo desde el año 1800 hasta el 2100 para ubicaciones entre $\pm 72^\circ$ de latitud, esto último debido a los efectos de la refracción atmosférica para esas latitudes (NOAA, 2022).

La cooperación de ambos métodos compensa las falencias de cada uno. Por un lado, el algoritmo tiene gran precisión y los factores externos, como por ejemplo la nubosidad, no lo afectan; pero necesita calibrarse (es decir determinar su orientación inicial), lo cual resulta costoso (Satué et al., 2020). Por otro lado, el sensor óptico no necesita de una calibración previa, pero su precisión es menor y tiene problemas ante la presencia de nubosidad. Esta cooperación resulta en un sistema de control robusto ante los factores externos y de gran precisión.

Sistema de Control

El seguidor utiliza dos elementos de control: por un lado el algoritmo de efemérides solares, que corresponde a un control de lazo abierto, y por otro, un sistema de control ON-OFF para calibrarse, que utiliza como sensor una matriz LDR (*Light-Dependent Resistor*) (Fig. 7). Ambos sistemas de control no funcionan en ningún momento al mismo tiempo, sino que cooperan entre ellos.

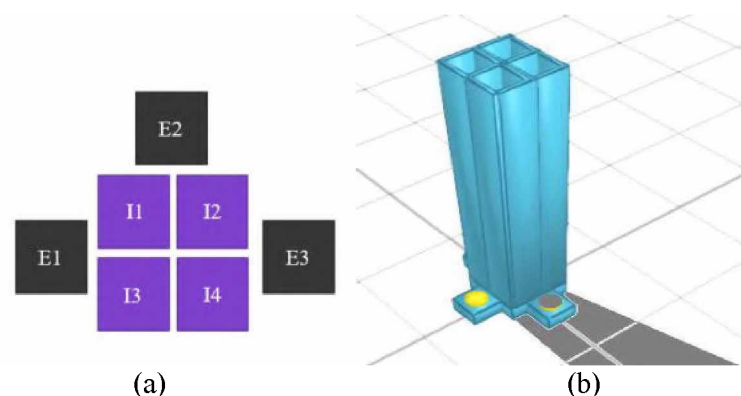


Figura 7: a) Esquema de la matriz LDR utilizada. En violeta la matriz interna, en gris la matriz externa. b) Ejemplo del uso de la sombra de la estructura de la matriz LDR interna sobre los sensores externos.

El sistema de control principal consiste en el algoritmo de efemérides solares, ya que es la forma de control más precisa y robusta frente a los cambios climáticos, el cual se encuentra funcionando el 99% del tiempo. Sin embargo, al no tener retroalimentación está expuesto a tener un error acumulativo, tanto por los movimientos imprevistos como la desviación que se produzca por la calibración inicial,

la cual requeriría de un mantenimiento sostenido. En consecuencia, se utiliza un sistema de control ON-OFF implementado por la matriz LDR tanto para la calibración inicial como para recalibrar el sistema cada 24 hs a partir de las 10AM. De esta manera se evita el mantenimiento y se acota el error que se pueda acumular al mínimo. El esquema de funcionamiento activo y ya calibrado se presenta en el diagrama de la Fig. 8.

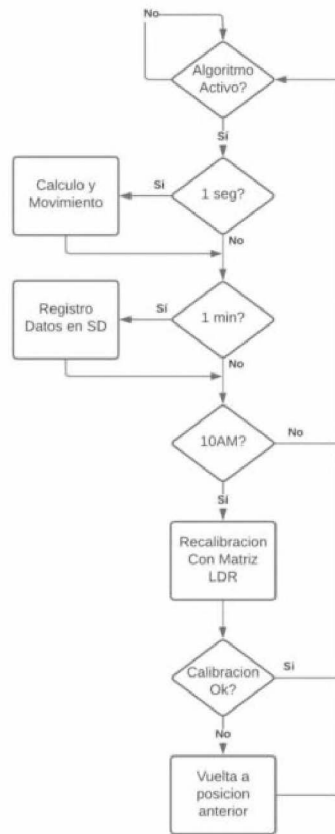


Figura 8: Diagrama de flujo del funcionamiento activo del seguidor solar.

El sistema de control ON-OFF consiste en una secuencia de movimientos dados a partir de la lectura del estado de la matriz LDR. Cada uno de los estados corresponde con un movimiento en grados, azimuth o de elevación según corresponda a una tabla de movimientos. A su vez, los movimientos están divididos en movimientos según la lectura de la matriz interna y externa. El esquema de funcionamiento se presenta en el diagrama de la Fig.9.

Matriz LDR

Tal como fuera comentado anteriormente, como sensor óptico se desarrolló una matriz LDR para medir la perpendicularidad con el sol (Figuroa, 2018; Kumar y Suryanarayana, 2014). Esta consta de dos matrices de fotorresistores: una matriz interna, de alta precisión, que es la que determina la resolución del sistema de retroalimentación, y una matriz externa, de una resolución gruesa, que sirve como primera aproximación para acercarse a la posición angular donde empieza a actuar la matriz interna (ver Fig. 7a). El funcionamiento consiste en realizar correcciones angulares a partir de la lectura del estado en que se encuentran las matrices (ver la tabla de estados de las matrices en la Fig. 9). En primer lugar, se hace una aproximación a partir de la lectura de la matriz externa, la cual utiliza la sombra generada por la estructura donde está alojada la matriz interna para orientarse (ver Fig. 7b). Una vez orientado con la matriz externa, el sistema pasa a utilizar la matriz interna para asegurar una calibración dentro de 0,75 grados respecto a la normal al sol. La precisión está definida por el ángulo

de incidencia necesario para iluminar al centro del LDR. El mismo está calibrado experimentalmente a un umbral programado por software.

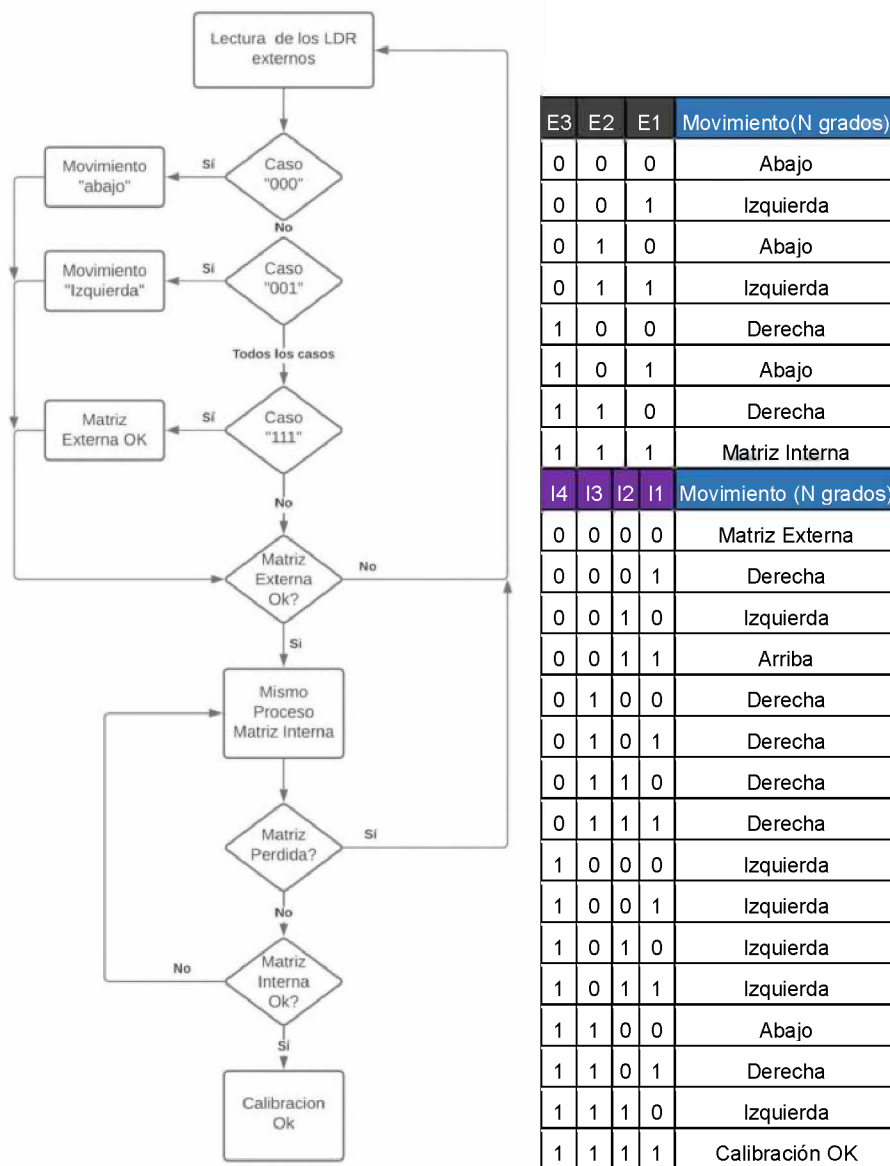


Figura 9: Diagrama de flujo del funcionamiento de la calibración del seguidor.

Finalmente, para calibrarse el sistema iguala su posición adquirida por la calibración de la matriz LDR (es decir cuando esta adquiere un estado activo completo de toda su matriz interna) con los cálculos de posición azimuth y elevación que resultan en esa ubicación y a esa hora, calculados por el algoritmo.

Electrónica de control - Hardware

El esquema general del dispositivo de control se presenta en la Fig.10. Dado que uno de los objetivos del proyecto es desarrollar un producto lo más económico posible, se decidió utilizar el microcontrolador STM32f401 de 32 bits, ya que es económico y de gran potencia de procesamiento dada la frecuencia de su procesador (84 Mhz), instrucciones de procesamiento de señales (DSP), y unidad de punto flotante (FPU). Estas características son indispensables para poder realizar las operaciones matemáticas del cálculo del algoritmo de efemérides solares con gran precisión sin necesidad de utilizar una librería “BigNumber” (GitHub, 2022), que son necesarias en procesadores de 8 y 16 bits.

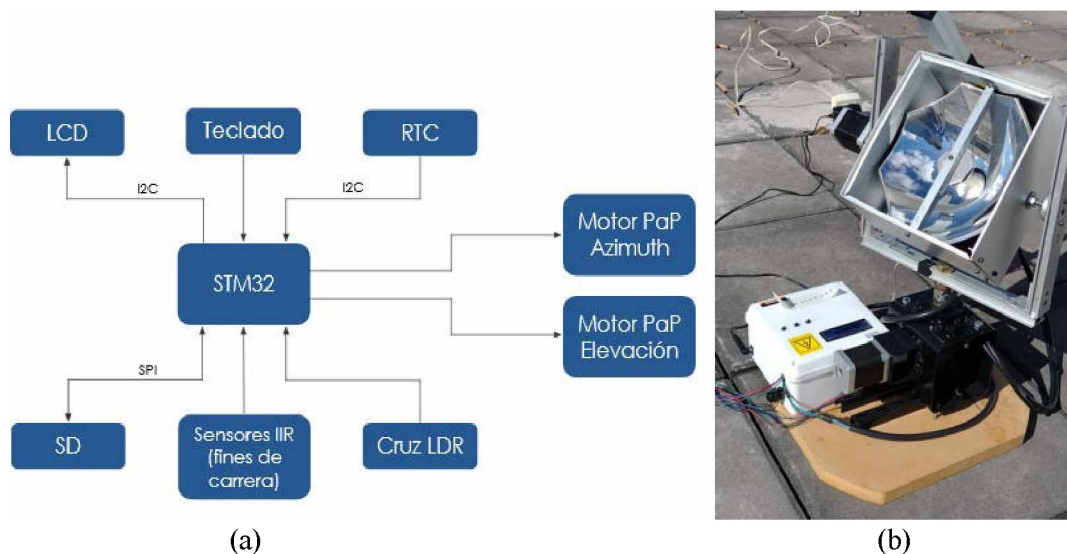


Figura 10: a) Esquema global del dispositivo. b) Prototipo del concentrador solar.

Por otra parte, el equipo necesita una base de tiempo estable y precisa, que se mantenga a pesar de la falta de alimentación. La configuración de la hora y su precisión es un elemento sustancial en el seguimiento, ya que de este depende el cálculo del algoritmo. Al ser un equipo económico y preciso decidimos utilizar un RTC (*Real Time Clock*) en lugar de un módulo GPS (*Global Positioning System*). Para ello elegimos el RTC DS3231, extremadamente preciso, que posee un oscilador integrado en el chip y compensado por temperatura (TCXO, *Temperature Compensated Crystal Oscillator*). Entre sus aplicaciones están los servidores y el GPS. Este RTC tiene un rango de temperatura de operación de -40 a 85 °C, y se comunica a través de un bus I2C (Maxim Integrated, 2022).

Los sensores LDR están conectados a través de un multiplexor, que reduce la cantidad de pines necesarios para su medición, utilizando un solo convertor analógico digital (ADC) para la lectura de toda la matriz. El convertor tiene una resolución de 12 bits.

Respecto al acondicionamiento de la señal, basta con un divisor resistivo. A pesar de no utilizar la máxima resolución del ADC, a fin de no agregar más componentes al acondicionamiento de la señal, esto no representa un problema. Dado que la lectura del ADC tendrá solo dos posibilidades, presencia de luz o ausencia; el umbral, es decir el límite entre ambos estados, se programa por software.

RESULTADOS

Para las pruebas de funcionamiento se colocó el concentrador en la terraza de un edificio. A su vez, se colocó una vara de un metro de altura para generar una sombra definida que permitiera realizar comparaciones del ángulo de elevación del sol, medido por la sombra, respecto al ángulo calculado por el algoritmo (ver Fig. 11). El área gris de los gráficos corresponde a la incertidumbre de la medición, dada por la dificultad de medir la longitud sobre la sombra difusa, que fue estimada en ± 1 cm. La incertidumbre del cálculo en el microcontrolador se considera irrelevante a la precisión que estamos trabajando, ya que el procesador es de 32 bits, es decir, que maneja un rango de datos del orden de $1,18 \times 10^{38}$ (STd, 2022), haciendo que los errores de redondeo de datos tipo “double” no tengan un peso tan considerable.

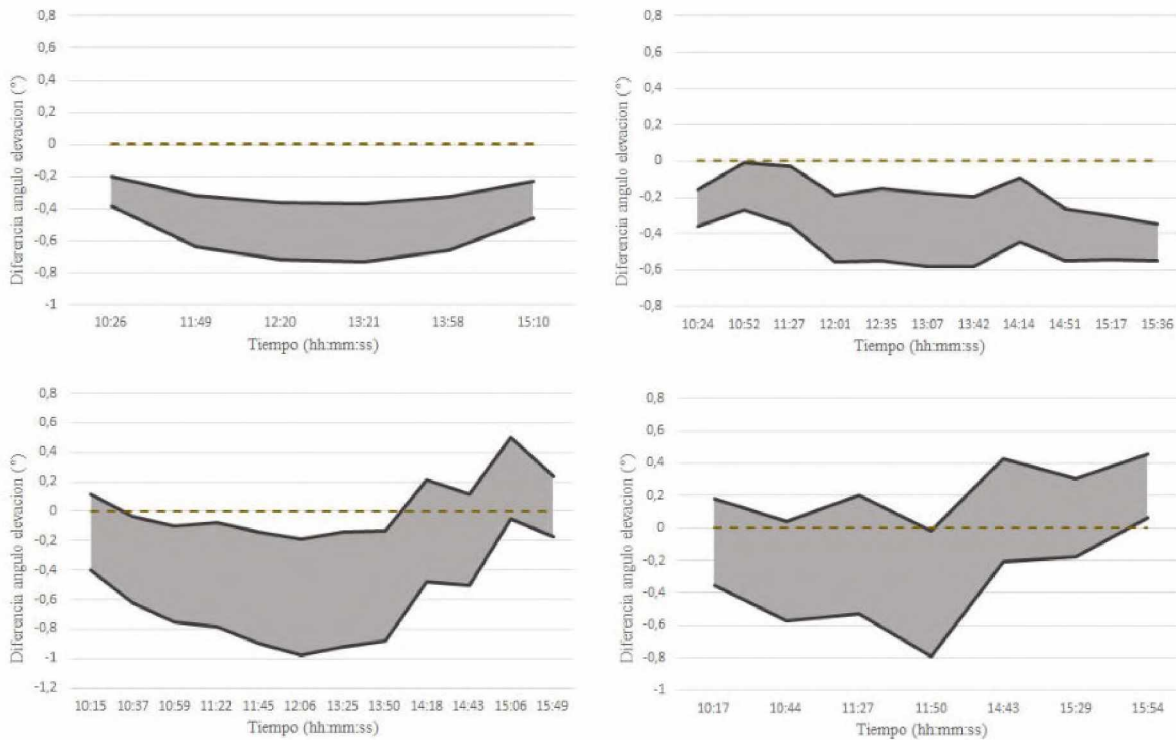


Figura 11: Diferencia del ángulo de elevación medido respecto del calculado incluyendo la incertidumbre de la medición para el 20-07-2022, 29-07-2022, 28-09-2022 y 29-09-2022 respectivamente (de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo).

A pesar del método rudimentario utilizado para verificar la resolución del algoritmo experimentalmente, los resultados obtenidos muestran que dicho algoritmo cumple con la precisión requerida. Se observa que la incertidumbre de ± 1 cm en la determinación de la sombra de la vara genera una incertidumbre del orden de los $0,2^\circ$ en los meses de julio y $0,4^\circ$ en septiembre. Esto es debido a que la longitud de la sombra generada por la vara disminuye casi a la mitad, generando más dispersión.

Para comprobar el funcionamiento del algoritmo, durante el mismo experimento, se registró la lectura de la matriz LDR interna. La Fig. 12 muestra la activación de los LDR internos (I1, I2, I3, I4). Esta lectura da información acerca de la perpendicularidad con el sol con una resolución de $0,75$ grados, dada por la geometría de la estructura. Por otro lado, el umbral de la matriz interna asegura el sensado de la radiación directa del sol, ya que este umbral es lo suficientemente exigente como para no considerar la radiación que se podría reflejar internamente por la estructura de aluminio anodizado y alcanzar los LDR.

Como se puede apreciar en la Fig. 13, existen mediciones completamente nulas. Esto es debido a que algún objeto se interpuso entre el equipo y el sol, o bien a alguna condición de nubosidad, como fue el caso en la medición del 29-09-2022. Por otro lado, se ve claramente como el concentrador mantiene el seguimiento del sol a pesar de la interposición gracias al algoritmo, manteniendo así la precisión asegurada por la matriz.

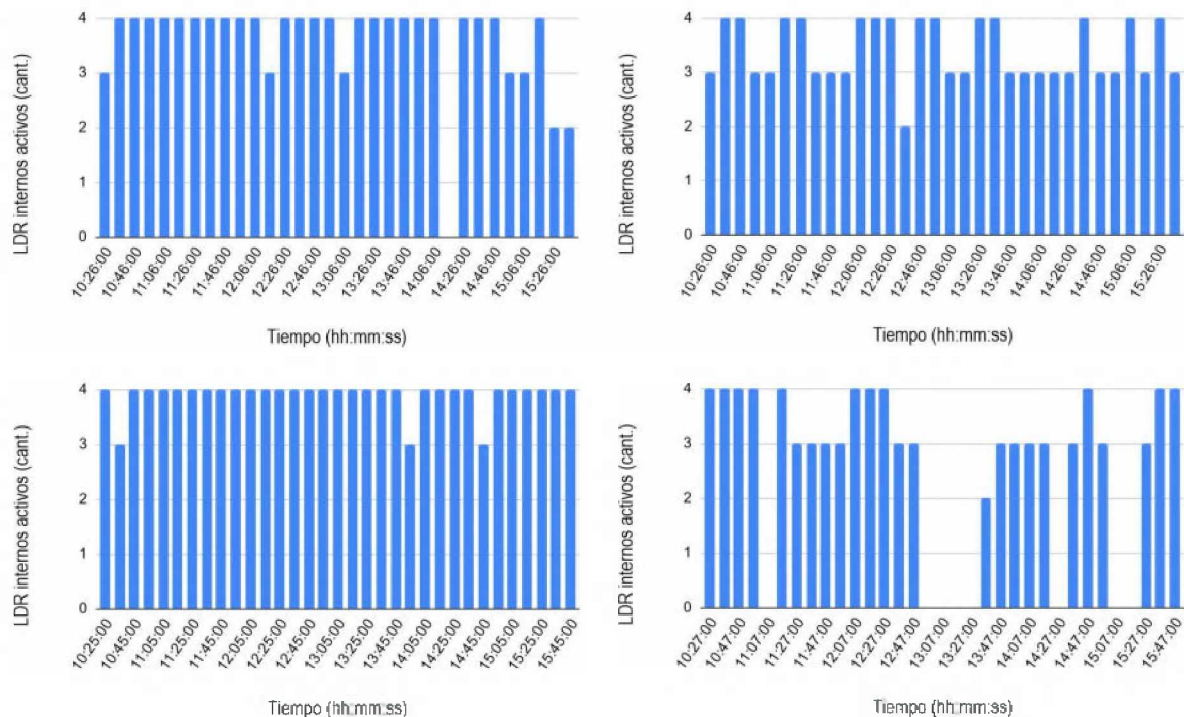


Figura 12: Registro de matriz interna durante el día. Las mediciones corresponden para el 20-07-2022, 29-07-2022, 28-09-2022 y 29-09-2022 respectivamente (de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo).

Otra medición importante es el tiempo de cálculo del algoritmo en el microcontrolador. Para medir el tiempo de procesamiento se utilizó el programador ST-Link V2 (ST, 2022b) como *debugger* en el IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) de STM32Cube (ST, 2022c) y analizando el tiempo del *timer* de ejecución. Por otro lado, también se calculó el tiempo de paso de los motores, ya que su ejecución es bloqueante. Los resultados fueron los siguientes:

- Procesamiento del algoritmo: 15 μ S.
- Tiempo de paso de motor: 16 mS.

CONCLUSIONES

Se presentan los avances en el desarrollo de un prototipo de concentrador solar para aplicaciones en CPV. Este desarrollo está basado en un concentrador óptico tipo Cassegrain, acoplado a un seguidor de dos ejes con un doble control de la posición. Conceptualmente el prototipo sigue la premisa de bajo costo, alta robustez, y elevada precisión.

El concentrador óptico se compone de dos espejos (parabólico e hiperbólico) de primera superficie, obtenidos a partir del moldeo de vidrios comunes utilizando moldes cerámicos, a los cuales se le agrega un elemento óptico secundario formado por cuatro espejos montados en un soporte de aluminio con forma de pirámide invertida truncada, de sencilla fabricación.

Por otra parte, el seguidor de dos ejes fue construido con elementos mecánicos accesibles y económicos, sumado a la electrónica de control que cumple este mismo criterio. El posicionamiento respecto del sol utiliza dos sistemas: uno a lazo abierto, dado por un algoritmo de acceso público que define dicho posicionamiento con muy alta precisión, y otro a lazo cerrado, a través del uso de matrices de LDR como sensores ópticos activos. La geometría utilizada asegura a priori una precisión de $0,75^\circ$ en la orientación. El lazo cerrado provee dos funciones esenciales, que son dar la posición inicial del concentrador y su recalibración diaria para corregir posibles errores acumulados o desviaciones producto de factores externos.

Los resultados obtenidos muestran que los datos provistos por el algoritmo son precisos y consistentes. Desde el punto de vista del funcionamiento de la matriz de LDR como elemento óptico activo, se observan ciertas limitaciones debido a la dispersión de los LDR comerciales. Esto deja abierto el trabajo para ulteriores mejoras en este aspecto particular. Asimismo, el tiempo de procesamiento involucrado en la implementación del algoritmo resultó ser 3 órdenes de magnitud inferior al que necesitan los motores de paso en su movimiento, asegurando por lo tanto que no se introducen errores en la posición por esta causa.

Cabe destacar que el seguidor desarrollado puede tener otras aplicaciones, y que en efecto en este momento estamos trabajando en la construcción de un segundo prototipo, más robusto y apto para largos períodos a la intemperie, que posibilite la medición de la componente directa de la radiación solar a través de un pirheliómetro, medición que es de importancia primordial en CPV.

La siguiente etapa prevista en el desarrollo es la integración en el concentrador de una celda solar de triple juntura InGaP/GaAs/Ge estándar y la correspondiente caracterización óptica y eléctrica del sistema completo. Otro de los trabajos a encarar próximamente es la incorporación de un GPS para la inicialización automática del sistema así como la implementación de un módulo de comunicación para el monitoreo remoto de las variables de interés.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de Martín Gomez y Diego Cowes, de la Gerencia Desarrollo y Proyectos Especiales de la CNEA, muy particularmente a este último por las impresiones 3D de los soportes utilizados en la matriz LDR.

Este trabajo fue parcialmente financiado con fondos del Proyecto Agencia I+D+i - PICT 2013 N° 3077 (Adenda 2019).

REFERENCIAS

- Chen Y. C. y You C. C. (2015). Optimal Design of a Secondary Optical Element for a Noncoplanar Two-Reflector Solar Concentrator. *International Journal of Photoenergy*, vol. 2015, Article ID 861353, 8 pages. <https://doi.org/10.1155/2015/861353>
- Chowdhury M. E. H., Khandakar A., Hossain B., Abouhasera R. (2019). A Low-Cost Closed-Loop Solar Tracking System Based on the Sun Position Algorithm. *Journal of Sensors*, vol. 2019, Article ID 3681031, 11 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/3681031>
- Figuroa, M. (2018). Posicionador Solar Automático. IX Congreso de Microelectrónica Aplicada, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca, San Fernando del Valle de Catamarca, 9 y 10 de octubre de 2018. <http://latices.tecno.unca.edu.ar/ocs/index.php/uea2018/uea2018/paper/viewFile/146/26>
- GitHub [en línea]. GitHub. Big Number. Dirección URL: <https://github.com/nickgammon/BigNumber> [consulta: 1 de junio de 2020]
- IEA (2022). 2022 Snapshot of Global PV Markets. Report IEA-PVPS T1-42:2022, April 2022, editado por la *International Energy Agency*, ISBN 978-3-907281-31-4. <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2022/>
- IRENA (2022). Renewable Power Generation Costs in 2021, editado por *International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-452-3 <https://irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>
- ISE (2022). Photovoltaic Report, informe elaborado por el *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, ISE, 24 de febrero de 2022. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>
- Kumar V. S. S. y Suryanarayana S. (2014). Automatic Dual Axis Sun Tracking System using LDR Sensor. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 4, 5, 3214-3217. <https://dx.doi.org/10.14741/ijcet/4/5/2014/22>

- Mangano E., Sambrano E., Perez M. D., Di Santo J., Malatto L., Plá, J. (2017). Estudio de películas delgadas con aplicación a concentradores solares. TecnoINTI edición 2017. Jornadas Abiertas de Desarrollo, Innovación y Transferencia Tecnológica.
https://app.inti.gob.ar/greenstone3/sites/localsite/collect/nuevadc/index/assoc/TecnoINT/I2017-33/9_pdf.dir/doc.pdf
- Maxim Integrated [en línea]. DS3231 - Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal datasheet. Maxim Integrated. Dirección URL:
 <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>> [consulta: 10 de septiembre de 2021]
- NOAA [en línea]. Solar Calculation Details. Global Monitoring Laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration (EEUU). Dirección URL:
 <<https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/calcdetails.html>> [consulta: 15 de julio de 2021]
- REN21 (2013). Renewables 2013 Global Status Report, editado por REN21, *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, ISBN 978-3-9815934-0-2.
https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2013_Full-Report_English.pdf
- REN21 (2022). Renewables 2022 Global Status Report, editado por REN21, *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, ISBN 978-3-948393-04-5.
<https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
- Satué M. G., Castaño, F., Ortega M. G., Rubio F.R (2020). Auto-calibration method for high concentration sun trackers. *Solar Energy*, 198, 311-323.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.073>
- STa [en línea]. stm32f401cb datasheet. Dirección URL:
 <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f401cb.pdf>> [consulta: 10 de julio de 2021]
- STb [en línea]. ST-LINK/V2 in-circuit debugger/programmer for STM8 and STM32. Dirección URL:
 <<https://www.st.com/en/development-tools/st-link-v2.html>> [consulta: 10 de septiembre de 2020]
- STc [en línea]. Integrated Development Environment for STM32. Dirección URL:
 <<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>> [consulta: 1 de junio de 2021]
- STd [en línea]. Floating point unit demonstration on STM32 microcontrollers. Dirección URL:
 <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/DM00047230.pdf> [consulta: 6 de octubre de 2022]
- Tsai C. Y. (2015). Improved irradiance distribution on high concentration solar cell using free-form concentrator. *Solar Energy*, 115, 694-707. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.032>
- Wiesenfarth M., Philipps S.P., Bett A.W., Horowitz K., Kurtz S. (2017). Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology, Version 1.3, April 2017. Informe generado por el Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) de Freiburg, Alemania, y el National Renewable Energy Laboratory (NREL) de Golden, Colorado, EEUU.
<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cpv-report-ise-nrel.pdf>
- Zyrianov, F. (2017). Diseño e implementación del sistema de control de un seguidor solar. Tesis de grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, Universidad Politécnica de Madrid, España. <https://oa.upm.es/47978/>

SOLAR CONCENTRATOR PROTOTYPE FOR CPV APPLICATIONS. FIRST DEVELOPMENTS ON THE TWO AXIS TRACKER AND THE OPTICAL SYSTEM

ABSTRACT High concentration CPV (*Concentrating Photovoltaics*) is among the available photovoltaic technologies for power generation and it is, in turn, the highest in terms of energetic efficiency conversion. This technology uses a solar optic concentration system in order to reduce the fabrication cost and, as a consequence, it is necessary adding a two axis solar tracker given that just the direct solar radiation component can be concentrated. In this frame, the advances performed on an economic prototype of a two axis solar tracker for CPV applications are presented. Based on a 32 bit stm32f401 microcontroller, this solar tracker utilizes two cooperative control strategies for tracking the sun: an algorithm to calculate the solar ephemerides, and a closed loop system control using a LDR (*Light-Dependent Resistor*) as optical sensor. Furthermore, advances on a concentrator prototype assembly for CPV applications, as well as a series of verifications of the setup performance in operation conditions, are presented.

Keywords: solar energy, concentrator, solar tracker, CPV