

Evaluación del desempeño por apuntamiento de estrategias de control para seguidores solares fotovoltaicos de alta concentración

Manuel G. Satué^{a,*}, Fernando Castaño^a, Manuel G. Ortega^a, Francisco R. Rubio^{a,b}

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, Avda. de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España.

^bLab. of Engineering for Energy and Environmental Sustainability, Universidad de Sevilla, Avda. de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España.

To cite this article: Satué, M.G., Castaño, F., Ortega, M.G., Rubio F.R. 2022. Pointing performance evaluation of control strategies for high concentration photovoltaic sun trackers. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 19, 174-185 <https://doi.org/10.4995/riai.2022.16905>

Resumen

En este artículo se evalúa el desempeño por apuntamiento de una serie de estrategias de control para seguidores solares de alta concentración. Dado el alto grado de precisión que se necesita en el apuntamiento real, por debajo del semiángulo de aceptación global del sistema de captación de energía, en el artículo se revisan las incertidumbres más características del montaje de un seguidor solar, y se establece un marco teórico que permite representar imperfecciones de montaje en forma de relaciones de rotación de marcos de referencias asociados a los elementos del seguidor. Se expone un proceso de calibración del sistema en dos etapas, que permite estimar incertidumbres paramétricas de las rotaciones. Finalmente, se analizan cinco estrategias de control y los resultados experimentales obtenidos con ellas al implementarlas sobre un seguidor solar HCPV industrial de altas prestaciones. Los resultados muestran que con el sistema bien calibrado, todas las estrategias proporcionan un desempeño similar. Sin embargo, solo la basada en realimentación en potencia es suficientemente robusta como para proporcionar buen desempeño cuando el sistema de descalibra.

Palabras clave: Control de recursos energéticos renovables, Modelado, Seguimiento, Sistemas de energía, Métodos de identificación y control.

Pointing performance evaluation of control strategies for high concentration photovoltaic sun trackers

Abstract

In this article the pointing performance of several control strategies for high concentration sun trackers is evaluated. Due to the high accuracy required in real pointing, below the global acceptance half-angle of the energy harvesting system, the article summarizes the most characteristic uncertainty sources of mounting a solar tracker. A theoretical framework is established that let us represent assembly imperfections in the form of rotational relationships among reference frames associated to the elements of the tracker. A two-stage system calibration process is exposed, which allows estimating parametric uncertainties of the rotations. Finally, five control strategies and the experimental results obtained with them when implemented on a high-performance industrial-grade HCPV solar tracker are analyzed. The results show an appropriate performance for all strategies whether the system is well calibrated. However, only the one based on power feedback is robust enough to provide a good performance when the system becomes uncalibrated.

Keywords: Control of renewable energy resources, Modeling, Tracking, Energy systems, Identification and control methods.

1. Introducción

Una línea de investigación que se sigue considerando activa en el marco de producción de energía solar fotovoltaica,

es la que involucra el uso de paneles fotovoltaicos de alta concentración (HCPV). Estos paneles tienen la ventaja de mejorar sensiblemente la eficiencia respecto a los paneles convencio-

*Autor para correspondencia: mgarrido16@us.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

nales (Zubi et al., 2009). Por lo tanto, se considera que esta tecnología podría ser competitiva respecto a la convencional en caso de requerir un aumento significativo del rendimiento, bien por limitación de superficie disponible, bien por necesidad de incrementar la cantidad de energía recolectada.

Las células fotovoltaicas de los módulos HCPV pueden ser de dos tipos: silicio de alta eficiencia y multi-unión (MJ) basadas en semiconductores de los grupos III-V (Pérez-Higueras et al., 2011). Las células multi-unión producen electricidad por un mecanismo parecido al de las células de silicio, pero logran una eficiencia más elevada debido a que son sensibles a un mayor espectro de la luz solar. Los módulos HCPV montan una óptica que concentra los rayos del Sol sobre la célula fotovoltaica, aumentando la relación área de captación-área de célula respecto de un panel fotovoltaico común. Una de las características de esta óptica es la razón de concentración, que se mide en número de soles. En 2019 el National Renewable Energy Laboratory (NREL) obtuvo una eficiencia en laboratorio del 47.1 % con una célula de seis uniones y 143 soles de factor de concentración. También es cierto que, mientras que los módulos fotovoltaicos convencionales absorben radiación directa y difusa, los módulos HCPV solo aprovechan la radiación directa debido precisamente a la lente.

El principal inconveniente de estos paneles está relacionado con el hecho de que para que un panel HCPV genere energía, es necesario que la radiación solar directa sea prácticamente perpendicular al mismo. Es decir, si no se consigue que el panel apunte al Sol con una precisión suficientemente alta (inferior a su ángulo de aceptación), la energía eléctrica producida disminuye drásticamente, o incluso deja de generar energía si el error de apuntamiento es demasiado alto; lo cual no sucede con los paneles convencionales. Por lo tanto, teniendo en cuenta que la posición del Sol es cambiante con el tiempo, se hace necesario el uso de un dispositivo electromecánico (seguidor solar) que vaya adaptando la orientación de los paneles a lo largo del tiempo de manera suficientemente precisa.

El ángulo de aceptación de la lente se mide desde el eje normal al plano de la célula y suele ser pequeño, de aproximadamente un grado (Tien and Shin, 2016; Yavrian et al., 2013). Debido a las tolerancias de fabricación y otros defectos, en la práctica se define el semiángulo de aceptación, α , como el ángulo de desviación de los rayos solares que hace que la eficiencia disminuya al 90 %, como se ejemplifica en la Figura 1. Que este ángulo sea pequeño es una restricción muy limitante para el diseño de un seguidor solar y su sistema de control. El sistema debe tener una alta precisión de apuntamiento para mantener la eficiencia de los módulos HCPV en valores próximos a su máximo y no desperdiciar energía.

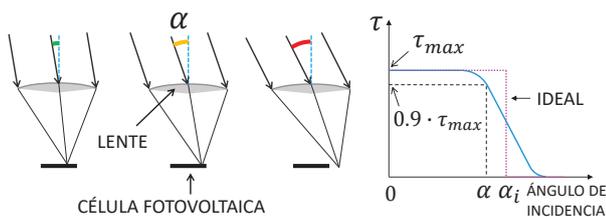


Figura 1: Semi-ángulo de aceptación de un módulo fotovoltaico de alta concentración.

Para alcanzar una alta precisión de apuntamiento, desde el punto de vista del diseño mecánico se emplean múltiples reductoras en cadena y codificadores de posición con varios miles de pulsos por vuelta de resolución. Sin embargo, existen una serie de incertidumbres que hacen que, en la práctica, la precisión de apuntamiento lograda sea menor que la esperada nominalmente, si no se emplea una estrategia de control adecuada. Estas incertidumbres no tienen por qué depender necesariamente del diseño mecánico del seguidor, sino que están relacionadas con la cimentación o instalación del seguidor en el terreno, tolerancias de fabricación y el ensamblado mecánico.

Entre los factores más importantes que generan estas incertidumbres se pueden citar los siguientes (Berenguel et al., 2004), (Carballo et al., 2019) (Chiesi et al., 2017), (Rubio et al., 2007): errores de verticalidad y de orientación, por ejemplo en el poste principal, que además pueden ir evolucionando con el tiempo en función del terreno donde este ubicada la instalación y cómo se haya hecho la cimentación de la estructura; errores o imprecisiones en el montaje de los paneles, lo cual implica que el ángulo de aceptación global de la instalación se reduce respecto al de un módulo en solitario; las estructuras no son perfectamente rígidas; y por último existen holguras en los mecanismos de movimiento.

Consecuentemente, si bien a nivel teórico el problema de seguimiento estaría resuelto aplicando las ecuaciones solares (conociendo las coordenadas de la instalación y la hora solar se podría obtener la dirección de apuntamiento y aplicar una estrategia de seguimiento en bucle abierto), en la práctica, en una instalación real, los resultados que se obtienen no suelen ser satisfactorios debido a que los factores mencionados intervienen y degradan de forma importante el funcionamiento del sistema de seguimiento. Por todo ello, en la práctica es necesario realizar una calibración del sistema y/o complementar o sustituir la estrategia en bucle abierto, basada en ecuaciones solares, por otras estrategias más sofisticadas en las que, de alguna forma, se pueda aplicar un control con realimentación.

Respecto a las estrategias de control para conseguir un cierto grado de apuntamiento, en (Fuentes-Morales et al., 2020) se realiza una revisión de distintos algoritmos de control para seguidores solares activos. En esta revisión se clasifican las estrategias de control en bucle abierto y en bucle cerrado, con la posibilidad de mezclar realimentación con un control por prealimentación (a lo que en el mencionado trabajo se denomina estrategia híbrida). Tal como se indica en el artículo, hay que remarcar que los resultados presentados en la revisión de las prestaciones no se han caracterizado bajo las mismas condiciones ni de simulación ni sobre el mismo seguidor solar.

En este artículo se evalúa el desempeño por apuntamiento de cinco estrategias de control implementadas en un mismo seguidor solar industrial equipado con módulos de alta concentración. Dos de las estrategias son en bucle abierto ((Blanco-Muriel et al., 2001),(Chowdhury et al., 2019)); y otras dos basadas en realimentación proporcionada por un sensor solar (Mems, 2016). En estas estrategias se añade una variante con la predicción de la posición del Sol. La quinta esta basada en realimentación de la potencia generada por el sistema de captación (Satué et al., 2020b). Asimismo, se establecerá un marco teórico que permita definir las imperfecciones de montaje en términos de matrices de rotación, y se indicarán algunas nocio-

nes sobre el proceso de calibrado del sistema. Finalmente, se analizarán los requisitos necesarios para que dichas estrategias de control funcionen correctamente, al menos durante un periodo de tiempo no muy extenso en el que el sistema no necesite volver a calibrarse.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: la descripción del seguidor solar y los modelos asociados se realiza en la Sección 2. En la Sección 3 se presenta el método de calibración utilizado. Las distintas estrategias de control para seguimiento solar se presentan en la Sección 4. En las Secciones 5 y 6 se muestran resultados de simulación y experimentales de una serie de pruebas de control. Finalmente en la Sección 7 se presentan las conclusiones principales de este trabajo.

2. Descripción y modelo del seguidor

El seguidor solar utilizado en este trabajo se muestra en la Figura 2, y está situado en la azotea de los laboratorios del *Dept. de Ingeniería de Sistemas y Automática* de la *Universidad de Sevilla*. Se trata de un seguidor industrial, cuya vela se ha reducido drásticamente por motivos de espacio. La electrónica de potencia ha sido adaptada a la capacidad de captación de energía de la nueva vela.

La estructura mecánica del posicionador tiene dos grados de libertad, uno para seguir el movimiento del Sol en azimut (θ_1) y otro para seguirlo en elevación (θ_2). Como puede observarse en la fotografía, se trata de una configuración típica de poste fijo sobre cimentación. En el poste está montado el mecanismo de giro azimutal (piñón-corona), que permite relacionar directamente con una ganancia el valor del giro del actuador, θ_{m1} , con el del grado de libertad θ_1 . Este mecanismo soporta a su vez tanto al mecanismo de elevación como a la vela, la cual alberga los paneles solares. El mecanismo de elevación consiste en un actuador lineal, cuyo movimiento d (ver Figura 4) proporciona valores de θ_2 . El seguidor dispone de una vela separada en dos zonas con una superficie de captación total, A_c , igual a $9,3 \text{ m}^2$.

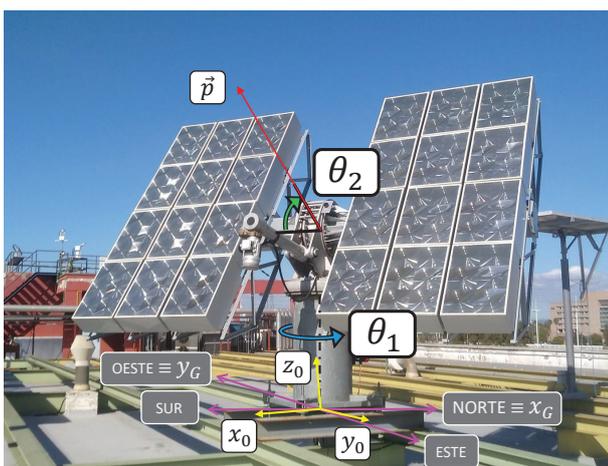


Figura 2: Seguidor solar de dos ejes equipado con módulos fotovoltaicos de alta concentración.

Los actuadores son dos motores asíncronos de 550W (azimut) y 750W (elevación) comandados por dos variadores de velocidad gestionados desde un autómata programable. El motor de orientación está conectado a dos reductoras con una relación

de reducción total de 45000:1. El motor de elevación está conectado a un actuador lineal de alta precisión con una relación de reducción de 180:1 y un avance de 0,09mm/rev.

Los equipos generadores de energía serán el conjunto de paneles solares de alta concentración (HCPV) y como equipo de transformación se dispondrá de un inversor de corriente. La instalación dispone de 24 paneles solares con seis células de triple unión cada uno. Los módulos tienen una potencia de 83,6 W bajo una irradiancia de 900 W/m^2 a una temperatura de célula $T_c = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Los paneles están conectados en serie, de forma que la tensión que se podrá alcanzar en bornas será de unos 443 V a circuito abierto y la intensidad máxima se mantendrá en 5,73 A. Para esta instalación se ha elegido un inversor de 2500 W de potencia con características de entrada en continua de tensión entre 260 y 500 V e intensidad máxima de 10 A, y características de salida en alterna de 230 V 50 Hz y 11 A.

Como equipo de control principal se ha usado un autómata programable *MC80* de *Schneider Electric*. El algoritmo de control determina cuándo y a qué velocidad se deben mover los motores, generando las correspondientes referencias a los variadores de velocidad.

Se utilizan además un sensor de potencia instantánea generada por la instalación en el lado de corriente continua y un sensor electro-óptico montado en la vela que proporciona el ángulo de incidencia de los rayos solares respecto del plano del sensor con alta precisión, así como el valor de irradiancia solar normal directa (fabricante SolarMems (Mems, 2016)). El sensor óptico tiene un campo de visión de 10 grados. El sensor de potencia está conectado a una entrada analógica del PLC. El sensor electro-óptico se comunica con el PLC mediante un bus de campo *Modbus RTU*, al igual que el inclinómetro. El encoder y los variadores de frecuencia se comunican con el PLC a través de un bus *CAN Open*.

El sistema de control está dividido en dos capas. La capa de bajo nivel se ocupa del control de posición de los dos ejes del seguidor, el cual está basado en la realimentación de la posición angular de los ejes a partir de la información proporcionada por el encoder y el valor angular proporcionado por el inclinómetro. Este control de posición se realiza mediante perfiles de velocidad que se les proporciona a los variadores de frecuencia que mueven los actuadores en última instancia. La capa de alto nivel se ocupa del cálculo de referencias para la capa de bajo nivel, es decir, los valores que deben tomar las coordenadas articulares de orientación, θ_1 , y elevación, θ_2 , para poder seguir el movimiento del Sol durante el día. Las estrategias presentadas en la Sección 4 están implementadas en esta capa de alto nivel.

2.1. Modelo mecánico

El sistema mecánico está compuesto por una serie de cuerpos rígidos conectados mediante articulaciones que forman una cadena cinemática. Para representar la posición y orientación de los cuerpos en el espacio se asocia un sistema de referencia a cada uno de ellos. Las relaciones de transformación existentes entre los distintos sistemas de referencia de un sistema mecánico se pueden definir utilizando las matrices de transformación homogéneas, las cuales permiten expresar de forma compacta las operaciones de rotación y traslación de un marco de referencia respecto a otro. En el caso concreto del sistema mecánico

de un seguidor solar, se pueden despreciar las transformaciones de traslación entre sistemas de referencia, puesto que sólo interesa orientar la vela (y en última instancia los módulos solares) según una dirección en el espacio definida por un vector. Por tanto, sólo se considerarán las transformaciones de rotación, iR_j , entre los distintos marcos de referencia genéricos, i e j , de los elementos que componen el posicionador. La Figura 3 muestra los sistemas de referencia descritos sobre un esquema del seguidor solar, además del árbol de relación entre dichos sistemas de referencia.

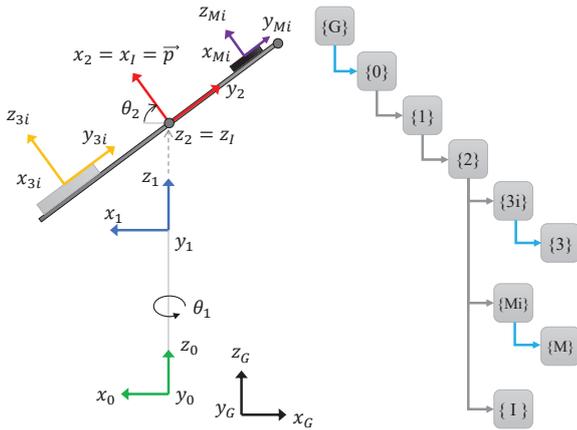


Figura 3: Sistemas de referencia del seguidor solar.

A continuación se describen los elementos del seguidor a los que se les ha asociado un sistema de referencia. La plataforma se asienta en el terreno y tiene asociado el sistema de referencia {0}. En el mástil se encuentra la primera articulación de giro del seguidor solar (giro acimutal) y se le asocia el sistema de referencia {1}. La vela es la estructura sobre la que se montan los módulos fotovoltaicos de alta concentración, teniendo asociado el marco de referencia {2}. Al conjunto de módulos se le asocia el sistema de referencia {3}. El sensor electro-óptico va montado en la vela y tiene asociado el sistema de referencia {M}. El inclinómetro también va anclado a la vela y se le asocia el sistema de referencia {I}. La plataforma se posiciona con respecto al sistema de referencia global o geográfico {G}, que es el sistema al cual están referidos los ángulos azimut y zenit que proporcionan las ecuaciones solares. Los sistemas de referencia {3i} y {Mi} se refieren a elementos en su orientación ideal o teórica. Si no se produjeran errores de montaje, los sistemas de referencia {3} y {M} serían coincidentes con los sistemas {3i} y {Mi} respectivamente. Las rotaciones ${}^2R_{3i}$ y ${}^2R_{Mi}$ son conocidas y consisten en un giro de valor $\pi/2$ alrededor del eje y_2 , de forma que los ejes z_{3i} y z_{Mi} coinciden con el eje x_2 .

El modelo cinemático directo permite obtener la matriz de rotación 0R_2 que relaciona los sistemas de referencia de la plataforma y la vela del seguidor solar, y por tanto el vector de apuntamiento de la vela, ${}^0\vec{p}$, a partir de los grados de libertad de la primera y la segunda articulación, θ_1 y θ_2 , respectivamente. En la Figura 4 se muestra un esquema del mecanismo que relaciona el grado de libertad en elevación, θ_2 , con el desplazamiento del motor lineal de la segunda articulación, d . La dependencia entre ellos puede calcularse aplicando el Teorema del Coseno conocidos los parámetros d_1 , d_2 y R de la Figura 4.

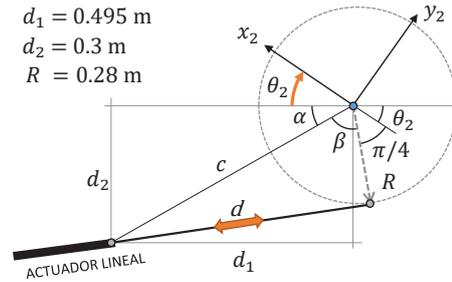


Figura 4: Geometría del mecanismo de elevación del seguidor solar.

Para controlar el sistema en la capa de alto nivel, es necesario disponer del modelo cinemático inverso, que permite obtener referencias de los grados de libertad θ_1 y θ_2 a partir del vector de apuntamiento ${}^0\vec{p}$ deseado. En el caso de apuntamiento con la vela es posible obtener una solución analítica sencilla. En este punto es conveniente recordar que lo importante en el control no es apuntar al Sol con la vela, sino con los paneles solares, que pueden no estar perfectamente alineados con ésta debido a imperfecciones en el montaje. En general existe una rotación genérica entre los sistemas de referencia del conjunto de los módulos solares y el sistema de referencia que define la pose ideal de los mismos, esto es, ${}^{3i}\tilde{R}_3$ no es la identidad. En el caso de que el controlador disponga de su valor estimado, se plantea el problema de encontrar la pose de la vela del seguidor solar que hace que los módulos apunten en dirección al Sol. Esto se traduce en encontrar los ángulos θ_1 y θ_2 que definen la rotación 0R_2 , conocidos el vector de apuntamiento de los módulos solares referido al sistema de referencia de la plataforma, ${}^0\vec{z}_3$, y la matriz de rotación estimada de los módulos solares, ${}^{3i}\tilde{R}_3$.

Es importante notar que la configuración cinemática del seguidor solar hace que sea posible que el vector de apuntamiento de la vela (x_2) tome cualquier dirección en el espacio (en la práctica, evidentemente dentro de los límites mecánicos). Pero los otros dos ejes del sistema de referencia de la vela no son libres, es decir, cada dirección que puede tener el eje x_2 , define una dirección concreta de los ejes y_2 y z_2 . Por tanto, el sistema no tiene grados de libertad suficientes para orientar el marco de referencia {2} en cualquier orientación en el espacio, sino solamente el eje x_2 .

Esto implica que aunque se conozca la transformación de rotación 2R_3 , de la transformación 0R_3 sólo se conocen las componentes del eje z_3 , y por tanto faltan datos para resolver la cadena cinemática de la Figura 5. Además, como ya se ha explicado, no todas las poses del sistema de referencia {3} (y {2}) son compatibles con la cinemática del seguidor solar. Por tanto, es necesario resolver el problema de forma numérica, por ejemplo, utilizando el método de Newton-Raphson. Concretamente hay que resolver el sistema de ecuaciones no lineal dado por (1), donde 0R_2 es función de θ_1 y θ_2 y ${}^{3i}R_3$ es conocida.

$${}^0R_2 \cdot {}^2R_{3i} \cdot {}^{3i}R_3 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0\vec{z}_3 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

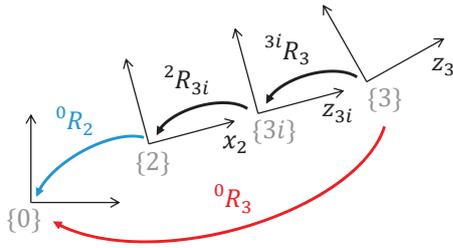


Figura 5: Cadena cinemática desde el sistema de referencia asociado a la plataforma hasta el sistema de referencia del conjunto de los módulos solares.

2.2. Modelo del sistema de generación de energía

El modelo del sistema de captación tratará de aportar información sobre el comportamiento electro-óptico de los 24 módulos de alta concentración conectados en serie, el cual considera que existe un diodo de paso en cada módulo, de manera que si un módulo empieza a comportarse como una carga, este queda puenteado.

Existen trabajos, como por ejemplo (Ben Or and Appelbaum, 2013) y (Rodrigo et al., 2015), en los que se detallan ecuaciones de modelos eléctricos de células fotovoltaicas de triple unión que se pueden ajustar bien al comportamiento de paneles utilizados.

Para modelar la parte óptica del módulo de alta concentración se considera más recomendable obtener superficies experimentales de potencia en función del error de apuntamiento al Sol, que puedan ser consideradas como modelos tipo caja negra.

En este sentido, se han realizado una serie de pruebas para calcular la superficie de potencia del conjunto de los módulos, es decir, de la variación de la potencia en función del ángulo de incidencia de los rayos solares en los módulos, y así extraer información acerca del *campo de visión*, ψ , de los módulos solares. La Figura 6 muestra los resultados obtenidos experimentalmente y el modelo completo del sistema de generación, es decir, incluyendo el inversor de potencia.

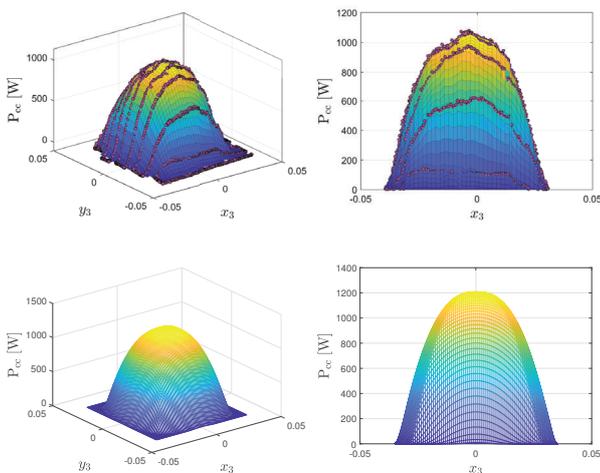


Figura 6: Superficies de potencia real y modelada.

Para modelar estas superficies se ha utilizado un *modelo mixto cuadrado-circular de transmisión óptica con función*

de corrección gamma. El *modelo circular* consiste en la aplicación de una transformación lineal sobre el ángulo de incidencia, γ , para obtener un valor de la incidencia normalizada, $\gamma_{n,circ} = \gamma/\psi$, siendo ψ un valor constante, y aplicar después la función *gamma* para calcular el valor de la transmisión τ_{circ} , según la siguiente expresión:

$$\tau_{circ} = \begin{cases} 1 - \gamma_{n,circ}^a & \text{si } \gamma \leq \psi \\ 0 & \text{si } \gamma > \psi \end{cases} \quad (2)$$

En la Figura 7(a) se muestra la proyección (p_x, p_y) de un vector unitario con ángulo de incidencia γ sobre una lente circular. El hecho de que la proyección esté en el interior de la circunferencia, y por tanto que el error de apuntamiento sea admisible, es equivalente a que el ángulo de incidencia es inferior al ángulo de visión ($\gamma < \psi$), independientemente del valor del ángulo φ .

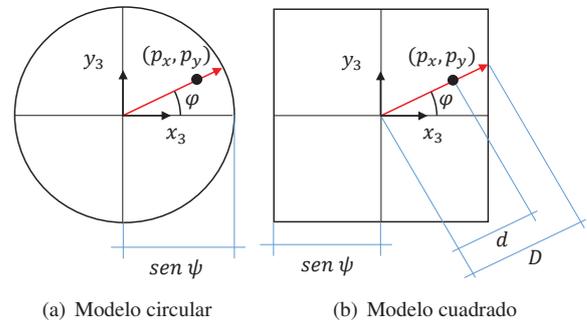


Figura 7: Proyecciones normalizadas para modelo circular y cuadrado.

El modelo cuadrado considera que el límite superior del error de apuntamiento admisible no es constante, sino que varía para adaptarse al contorno de una célula cuadrada. Como se puede observar en la Figura 7(b), para un mismo valor de (p_x, p_y) , el punto podría estar incluso fuera del cuadrado en función del valor del ángulo φ . El valor de la incidencia normalizada para este modelo se obtiene como $\gamma_{n,cuad} = \gamma_d/\psi_D$, siendo $\gamma_d = a \cdot \text{sen}(d)$ y $\psi_D = a \cdot \text{sen}(D)$. Los valores de $d = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ y $D = \text{sen}(\psi)/\cos(\varphi)$, con $\varphi = \text{atan}(p_y/p_x)$, son fácilmente deducibles de la Figura 7(b). El valor de la transmisión óptica para este modelo, τ_{cuad} , se obtiene mediante la expresión:

$$\tau_{cuad} = \begin{cases} 1 - \gamma_{n,cuad}^a & \text{si } \gamma_d \leq \psi_D \\ 0 & \text{si } \gamma_d > \psi_D \end{cases} \quad (3)$$

El *modelo mixto de transmisión óptica* consiste en una suma ponderada de la circular junto con la cuadrada, tal como se expone en la siguiente expresión:

$$\tau = \begin{cases} \frac{1}{2}\tau_{circ} + \frac{1}{2}\tau_{cuad} & \text{si } \tau \geq 0 \\ 0 & \text{si } \tau < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Una vez obtenido el valor de transmisión óptica del modelo mixto, se calcula el valor de la irradiancia efectiva como $Irr_e = \epsilon \tau Irr$, siendo ϵ el valor de la eficiencia óptica del captador, e Irr la irradiancia normal directa. Los valores utilizados en el modelo han sido $\epsilon = 0,85$ y $\psi = 2^\circ$. Se ha ajustado la constante a de la función *gamma* a un valor de 2 a fin de obtener un modelo que se asemeje a los datos experimentales. La

irradiancia efectiva es la variable de entrada al modelo eléctrico de los módulos solares (modelo exponencial simple), cuya salida es la potencia de corriente continua, P_{cc} .

En el sistema real, estas superficies también variarán dependiendo de la carga conectada y de la temperatura de trabajo. En este sentido hay que tener en cuenta, por una parte, que los inversores de potencia ya suelen incluir algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (conocidos con las siglas anglosajonas *MPPT: Maximum Power Point Tracking*) a nivel eléctrico, y que el tiempo de respuesta de dicho algoritmo se considera despreciable respecto a la dinámica de los movimientos mecánicos. Y por otra parte, que más allá de la magnitud de la superficie, su forma se mantiene; lo que implica que más allá de la cantidad de potencia captada, si se está en lo alto de la superficie es que se está captando el máximo posible con la radiación existente. Además, el hecho de obtener curvas experimentales para el conjunto de módulos completo implica disponer de una medida realista del ángulo de aceptación global, que no tiene por que ser el mismo del de cada módulo por separado, tal como se comentó en la introducción.

Respecto al modelo inversor (sistema de transformación de energía), como se comentó anteriormente se considera que realiza el seguimiento del punto de máxima potencia de manera ideal, es decir, sin considerar la dinámica. Sin embargo, el modelo sí debe contemplar el comportamiento del inversor respecto al retardo en el inicio de la inyección de potencia en situaciones como el arranque o el desenfoque durante un cierto tiempo.

2.3. Modelo del sensor electro-óptico

Este sensor proporciona el vector solar respecto de su propio sistema de referencia, $\{M\}$, indirectamente a través de los ángulos φ_x y φ_y . Estos ángulos se miden desde el eje z_M hasta las proyecciones del vector solar en los planos x_M-z_M y y_M-z_M respectivamente, como se observa en la Figura 8.

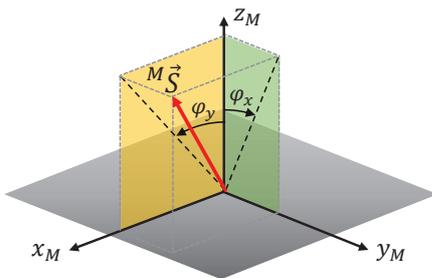


Figura 8: Sistema de referencia del sensor electro-óptico.

3. Calibración del seguidor

En esta sección se expone el método seguido para estimar los valores de algunos parámetros que pueden ser cruciales para el buen desempeño de algunas estrategias de control, dado el pequeño grado de error de apuntamiento que se exige en este tipo de seguidores. En concreto, el proceso permite estimar valores de las matrices de rotación ${}^G R_0$, ${}^{Mi} R_M$ y ${}^{3i} R_3$ existentes entre los sistemas de referencia global-plataforma, sensor óptico ideal-sensor óptico y módulos ideal-módulos respectivamente. El árbol de la Figura 3 muestra en color azul estas relaciones de rotación.

El método consta de dos etapas que se realizan en secuencia. En la *primera etapa*, se usan el sensor solar y las ecuaciones solares para obtener tanto la matriz de rotación que relaciona la plataforma o base del seguidor solar con respecto al norte geográfico, ${}^G \tilde{R}_0$, como la matriz de rotación que relaciona el sistema de referencia de la vela con el sistema de referencia del sensor óptico, ${}^{Mi} \tilde{R}_M$. Es importante enfatizar que aunque se utilice un sensor óptico que proporcione la posición del Sol, si el sistema de referencia del sensor no está alineado con el sistema de referencia de la vela o de los módulos en última instancia, la medida que proporciona introducirá un error en la cadena cinemática que permite apuntar al Sol.

Para ello, se toman n muestras de $({}^G \vec{S}_e, {}^M \vec{S}_m, {}^0 R_2)$ espaciadas por intervalos de tiempo de m minutos, donde ${}^G \vec{S}_e$ es el vector solar proporcionado por las ecuaciones solares, ${}^M \vec{S}_m$ es el vector solar proporcionado por el sensor óptico, y ${}^0 R_2$ es la matriz de rotación obtenida a partir de la postura de la estructura mecánica del seguidor. Con estas muestras se construye el sistema de ecuaciones no lineal (sobre-determinado) dado por (5). En este sistema de ecuaciones las incógnitas son la matriz de rotación de la plataforma del seguidor solar referida al sistema global y la matriz de rotación del sensor óptico en su orientación real referido a su orientación ideal. El sistema de ecuaciones establece que el vector solar medido por el sensor óptico debe ser igual al vector solar proporcionado por las ecuaciones solares cuando ambos vectores se expresan en el mismo sistema de referencia.

$${}^G \vec{S}_e^{(i)} = {}^G \tilde{R}_0 {}^0 R_2^{(i)} {}^2 R_{Mi} {}^{Mi} \tilde{R}_M {}^M \vec{S}_m^{(i)} ; i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

La matriz de rotación ${}^0 R_2$ es función de las coordenadas articulares del seguidor, θ_1 y θ_2 , y se calcula usando la cinemática directa. El vector solar proporcionado por las ecuaciones solares se obtiene a partir de la marca de tiempo (fecha y hora), ts , de la muestra. El sensor óptico proporciona un vector solar indirectamente a partir de los ángulos φ_x y φ_y , mostrados en la Figura 8. Por tanto, respecto del almacenamiento de información durante el proceso de calibración, una muestra viene dada por la expresión (6).

$$muestra_i = [\theta_1, \theta_2, ts, \varphi_x, \varphi_y] \equiv [{}^0 R_2^{(i)}, {}^G \vec{S}_e^{(i)}, {}^M \vec{S}_m^{(i)}] \quad (6)$$

Nótese que el sistema de ecuaciones (5) tiene seis incógnitas, concretamente tres ángulos de Euler para cada una de las dos matrices de rotación incógnita.

Es importante dar cierta variabilidad a las muestras (realizar pequeños movimientos de corrección para que el Sol medido no proyecte siempre prácticamente en el mismo punto del plano $x_M - y_M$) para que la estimación de la orientación del sensor electro-óptico sea correcta.

En la *segunda etapa* del proceso, la idea es utilizar los módulos fotovoltaicos como sensor de la posición del Sol, en lugar del electro-sensor óptico que se utilizó en la primera. Con ello se pretende estimar la rotación existente entre el sistema de referencia del conjunto de los módulos fotovoltaicos y el sistema de referencia de la vela del seguidor solar, ${}^{3i} \tilde{R}_3$. Para poder utilizar los módulos fotovoltaicos como sensor de la posición del Sol, se desconecta el inversor de corriente y se coloca en su lugar una resistencia para medir la potencia producida en el circuito de corriente continua.

De nuevo se trata de obtener una serie de muestras de la posición del Sol para construir un sistema de ecuaciones no lineales sobre-determinado. En cada una de las muestras, se busca estimar las coordenadas articulares $\hat{\theta}_1$ y $\hat{\theta}_2$ que hacen que los módulos fotovoltaicos apunten al Sol, utilizando la medida de potencia como sensor. Para ello se apunta al Sol en bucle abierto (la referencia la proporcionan las ecuaciones solares) y se realizan dos movimientos separados: uno en orientación, por tanto solo cambia θ_1 , y otro en elevación, por tanto solo cambia θ_2 .

Mientras se realizan los dos movimientos se muestrean y almacenan en dos tablas (una para el movimiento de elevación y otra para el barrido de orientación) los valores de la potencia, de los ángulos θ_1 y θ_2 , junto a sus correspondientes marcas de tiempo (*timestamp*), ts . Un análisis fuera de línea de estos datos permitirá determinar los valores $\hat{\theta}_1$ y $\hat{\theta}_2$ donde las potencias son máximas, que junto con sus marcas de tiempo asociadas, permite estimar dónde está el Sol en ese intervalo de tiempo. En la Figura 9 se muestra un ejemplo del resultado del análisis de una pareja de barridos de elevación y orientación.

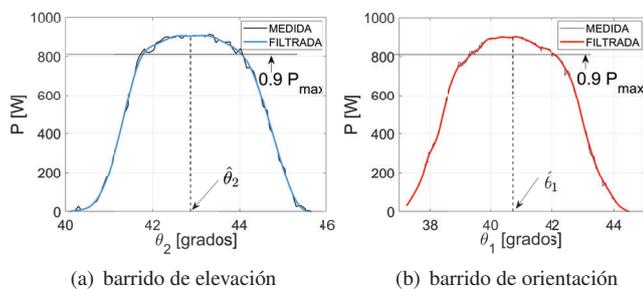


Figura 9: Análisis de una pareja de barridos de elevación y orientación.

Las ecuaciones solares se evalúan en el instante de tiempo medio ts_m para obtener el vector solar ${}^G\vec{S}_e$. La matriz de rotación 0R_2 es función de las coordenadas articulares $\hat{\theta}_1$ y $\hat{\theta}_2$ del seguidor y se calcula mediante la cinemática directa.

Por tanto, respecto del almacenamiento de información durante esta segunda etapa, una muestra viene dada por la expresión (7).

$$muestra_i = [\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, ts_m] \equiv [{}^0R_2^{(i)}, {}^G\vec{S}_e^{(i)}] \quad (7)$$

Con estas muestras se construye el sistema de ecuaciones no lineales (sobre-determinado) (8) en el que la única incógnita es la matriz de rotación ${}^3i\tilde{R}_3$, puesto que la matriz de rotación ${}^G\tilde{R}_0$ se calculó primera etapa del proceso de calibración. El sistema de ecuaciones plantea que el vector solar medido por los módulos fotovoltaicos debe ser igual al vector solar proporcionado por las ecuaciones solares cuando se expresan en el mismo sistema de referencia.

$${}^G\vec{S}_e^{(i)} = {}^G\tilde{R}_0 {}^0R_2^{(i)} {}^2R_3 {}^3i\tilde{R}_3 {}^3\vec{S}_m^{(i)} ; i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Se asume que cuando el seguidor solar se encuentra en la pose dada por $(\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2)$, el vector solar proyecta en el origen del sistema de referencia $\{3\}$ y por tanto ${}^3\vec{S}_m = [0, 0, 1]^T$ para todas las muestras.

4. Estrategias de control de apuntamiento

En esta sección se van a presentar cinco estrategias de control diferentes, cuyos resultados experimentales serán evaluados en la siguiente sección. Las estrategias de control consideradas se pueden dividir en dos grupos: estrategias de control en bucle abierto (BA) y en bucle cerrado (BC). En el primer grupo se considerará que se dispone de modelos precisos del sistema de apuntamiento; y para ello es especialmente importante el proceso de calibración expuesto en la sección anterior. En el segundo grupo, las estrategias dispondrán de una medida de la calidad de apuntamiento, y sus desempeños dependerán en buena medida de la bondad de la realimentación.

En las estrategias que impliquen adelanto de apuntamiento al Sol, será necesario definir el valor del semiángulo de aceptación de control, α_c . Este valor es un parámetro del algoritmo de control que servirá para calcular la magnitud de los movimientos del seguidor sin que se pierda potencia de manera significativa por apuntamiento. Por lo tanto, dicho valor debe ser inferior al del α , semiángulo de aceptación real del sistema de captación.

En la descripción de las estrategias sólo se va a considerar el modo normal de funcionamiento, dejando fuera del ámbito del artículo otras consideraciones como inicializaciones o algoritmos de recuperación en caso de pérdida continuada de apuntamiento al Sol.

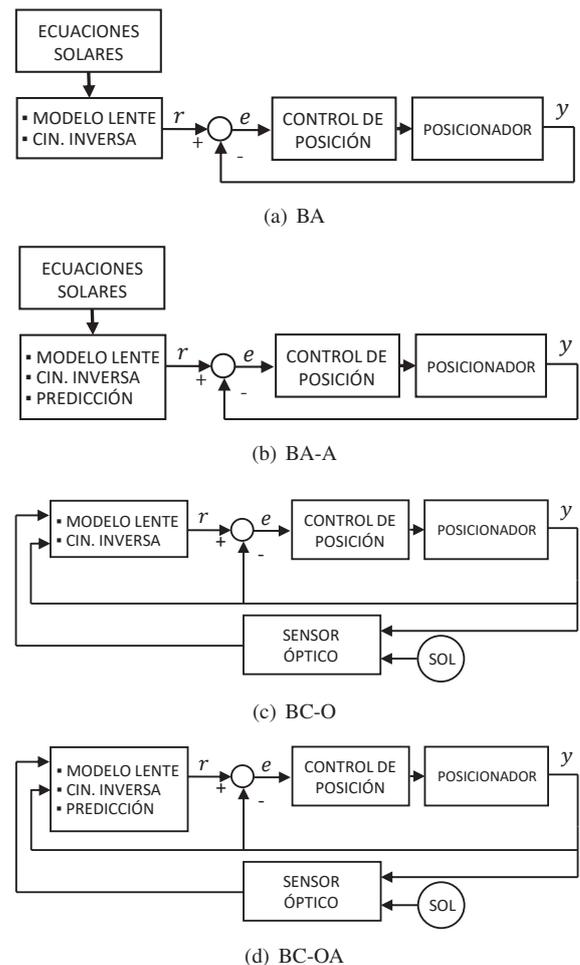


Figura 10: Diagramas de control para apuntamiento en bucle abierto y cerrado, sin adelanto y con adelanto.

4.1. Estrategia en BA con tiempo fijo (BA)

Esta es la estrategia más sencilla dentro del primer grupo, y está basada en ecuaciones solares (BA). Estas ecuaciones proporcionan una estimación de la posición del Sol en una localización geográfica y un instante de tiempo dados; todo ello respecto a los ejes del sistema de referencia geográfico {G}. En este trabajo se han utilizado las ecuaciones solares proporcionadas por la *Plataforma Solar de Almería* (Blanco-Muriel et al., 2001).

En esta estrategia los movimientos de apuntamiento se producen a tiempo fijo con un intervalo configurable. Cuando transcurre el intervalo de tiempo definido, el controlador calcula las coordenadas articulares del seguidor solar que hacen que el vector de apuntamiento de la vela coincida con el vector solar proporcionado por las ecuaciones solares en el instante de tiempo actual. Para ello es necesario utilizar el modelo cinemático inverso de toda la estructura mecánica del seguidor solar (ver Figura 10(a)). En este sentido, hay que recordar que lo importante es que el apuntamiento se realice con los módulos solares, por lo que la cinemática inversa se vuelve algo más complicada. Y por supuesto, se necesita de una calibración precisa si se requieren altas prestaciones de apuntamiento.

La magnitud del tiempo en el que se lanzan los movimientos es importante para correcto funcionamiento del seguidor. Un tiempo pequeño proporcionaría un error de apuntamiento teórico (suponiendo modelo perfecto) pequeño, pero dispararía el número de movimientos, con la consecuente pérdida de rendimiento global del sistema de captación. Por otra parte, un tiempo grande provocaría errores de apuntamiento superiores al valor del ángulo de aceptación de los módulos, por lo que el sistema dejaría de captar energía en los intervalos de tiempo en los que esto suceda.

4.2. Estrategia en BA con adelanto (BA-A)

Esta segunda estrategia es una variante de la primera, considerando que los movimientos de apuntamiento se realizan adelantando la posición del Sol un cierto tiempo. El tiempo de adelanto no es fijo, sino que depende de la zona cuadrada definida en el plano $x_3 - y_3$ por el ángulo α_c (ver Figura 11).

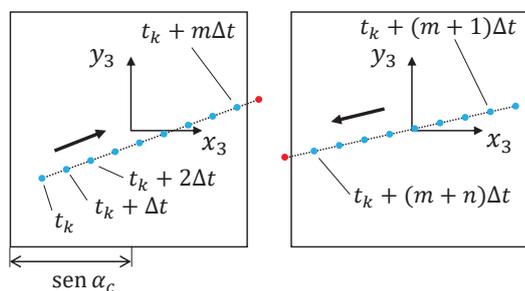


Figura 11: Etapas de predicción de las estrategias de control de apuntamiento en adelanto a la posición del Sol. Izquierda: etapa 1. Derecha: etapa 2.

El controlador calcula las coordenadas articulares del siguiente movimiento de apuntamiento realizando una predicción de la posición futura del Sol usando las ecuaciones solares. La predicción tiene dos fases: en la primera, se considera que el seguidor solar está estático en su posición actual y el Sol se mueve. El predictor simulará un adelanto del tiempo hasta que

la proyección en el plano $x_3 - y_3$ del vector solar proporcionado por las Ecuaciones Solares se sale de los límites de la zona definida (Figura 11 izquierda). Con esto se obtiene el instante de tiempo en el que se debe realizar el siguiente movimiento de apuntamiento. La segunda fase de la predicción proporciona las coordenadas articulares del movimiento de apuntamiento. Partiendo del instante de tiempo calculado en la primera fase, se considera ahora que el Sol permanece estático en la posición asociada a dicho instante de tiempo y se hace apuntar los módulos solares hacia las posiciones futuras del sol hasta que la proyección abandona de nuevo la zona definida (Figura 11 derecha).

4.3. Estrategia en BC con sensor electro-óptico (BC-O)

Esta es la primera estrategia perteneciente al grupo de bucle cerrado, y utiliza la realimentación de la medida de la posición del Sol que proporciona un sensor electro-óptico montado en la vela (ver Figura 10(c)). En este caso los movimientos de apuntamiento se producen cada vez que la proyección del Sol medido por el sensor se sale de los límites de una zona cuadrada definida en el plano $x_3 - y_3$, la cual está directamente relacionada con el ángulo de aceptación de los módulos solares. Cada vez que el rayo solar proyectado abandona esta región, el controlador calcula las coordenadas articulares que hacen que la proyección en el plano $x_3 - y_3$ del vector solar medido por el sensor coincida con el origen.

La bondad de esta estrategia de control depende sensiblemente, entre otros factores, de la calibración de la orientación del sensor y del conjunto de los captadores solares respecto a vela.

4.4. Estrategia en BC con sensor electro-óptico con adelanto (BC-OA)

Esta estrategia es una modificación de la anterior, realizando movimientos de apuntamiento en adelanto de la misma manera que se hacía en la estrategia BA-A respecto a la BA. Pero a diferencia de la estrategia (BA-A), en este caso se dispone de una medida de la posición del Sol, la cual se utilizará para aplicar una corrección a las Ecuaciones Solares en el instante de tiempo en el que se realicen los cálculos de la predicción. Las dos fases de la predicción son iguales a la de la segunda estrategia, con la excepción de que en este caso las ecuaciones solares están corregidas según la medida del sensor óptico.

El correcto desempeño de estas cuatro estrategias de control depende de las tolerancias de fabricación, de la rigidez de la estructura del posicionador y de la precisión de instalación y ensamblado de los módulos en la vela. Para paliar los efectos de estas imprecisiones se debe calibrar el sistema (Satué et al., 2020a), lo cual no es una tarea sencilla.

4.5. Estrategia en BC con realimentación de potencia (BC-P)

Esta última estrategia, desarrollada por los autores de este trabajo, consiste en un control en bucle cerrado utilizando como realimentación la potencia generada por el sistema de captación (Satué et al., 2020b). La idea de partida es que, independientemente de la calibración del sistema de apuntamiento, si se está generando potencia es que se está apuntando al Sol con un error suficientemente pequeño. Lo que no permite saber es el signo de este error, es decir, si el Sol está adelantado o atrasado respecto al apuntamiento nominal.

Esta estrategia utiliza una estructura predictora de la posición del Sol basada en Ecuaciones Solares a modo de prealimentación (al igual que en las estrategias anteriores), a la cual se le añade una corrección dinámica proporcionada por un estimador (ver Figura 12).

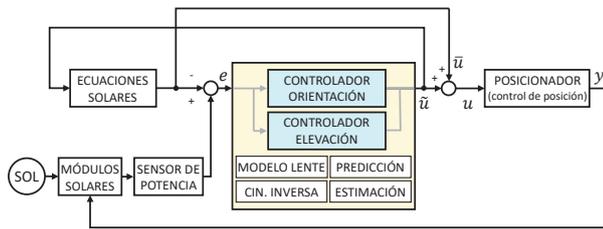


Figura 12: Diagrama de bloques del control de apuntamiento BC-P.

En esta estrategia también se realizan movimientos de apuntamiento en adelante, como en las estrategias BA-A y BC-OA. Pero a diferencia de las anteriores, durante la ejecución de esos movimientos se almacenan las trayectorias de la potencia medida para su posterior análisis. De dicho análisis se obtiene una estimación de cuál era la posición del Sol durante el transcurso de los barridos de orientación y elevación. Para ello, tras realizar un filtrado de la potencia generada, se estima que la posición del Sol (en la coordenada en la que se realiza el movimiento) se encuentra en el punto de máxima potencia, salvo que a lo largo del movimiento la potencia caiga por debajo de un umbral, establecido en el 90 % respecto al máximo. Si esto último no sucede, el estimador trabaja en bucle abierto en el sentido de que no hay corrección externa de la posición real del Sol. Sin embargo, en el caso de que se produzca una pérdida excesiva de potencia durante el movimiento, ésta se produciría porque el error de apuntamiento ha superado el semiángulo de aceptación, lo cual no debería suceder nunca si el estimador fuera perfecto. Esta información esporádica adicional es utilizada, mediante unas reglas heurísticas, para resetear la estimación de la posición del Sol. La gran ventaja de esta estrategia es que no necesita calibración previa del sistema, siendo capaz de adaptarse a las fuentes de error mencionadas anteriormente.

5. Resultados de simulación

A fin de comparar las distintas estrategias de control en igualdad de condiciones, se ha creado un simulador detallado del seguidor solar, incluyendo las dinámicas de los actuadores de bajo nivel, el sistema de transmisión mecánica, el sistema de generación de energía, y el modelo del sensor electro-óptico.

Este simulador también incluye una serie de parámetros a modo de incertidumbres, permitiendo simular descalibraciones en el sistema. En la Tabla 1 se muestran los valores de los ángulos de Euler (*RPY*: Roll, Pitch y Yaw) que permiten construir las matrices de rotación, y que han sido utilizados en las simulaciones a fin de testear el comportamiento proporcionado por las distintas estrategias. En la primera columna se muestran los datos utilizados en el simulador del sistema. En la segunda, los datos ideales usados por los controladores en caso de no haber utilizado la calibración. Finalmente, en la tercera se muestran los datos proporcionados por el proceso de calibración expuesto

en la Sección 3, y que son los usados por las distintas estrategias suponiendo el seguidor calibrado.

Tabla 1: Ángulos de Euler utilizados para las simulaciones.

	Real [°] (R,P,Y)	Ideal [°] (R,P,Y)	Estimada [°] (R,P,Y)
${}^G R_0$	(0, 0, 179.3)	(0, 0, 180)	(0, 0, 179.255)
${}^{Mi} R_M$	(0.70, -0.55, 0)	(0, 0, 0)	(0.667, -0.457, 0)
${}^{3i} R_3$	(1.0, 0.75, -0.5)	(0, 0, 0)	(0.962, 0.737, 0)

El control en bucle abierto (BA) se ha configurado para realizar movimientos de apuntamiento a intervalos de tiempo fijo igual a 120 segundos. El resto de estrategias se configuraron para mantener el vector solar dentro de una zona definida por un ángulo α_c igual a 0.5 grados. En las Figuras 13 y 14 se muestran los resultados de simulación cuando los controladores utilizan la calibración del sistema y cuando no lo hacen, respectivamente. Asimismo, en la Tabla 2 se muestran los datos de la energía captada con las distintas estrategias en los experimentos presentados en las Figuras 13 (segunda columna) y 14 (tercera columna). Nótese que en todos ellos se utiliza la misma curva de irradiancia. Respecto a la Figura 13, como puede observarse en la primera y tercera gráfica, tanto la energía captada como los errores de apuntamiento obtenidos con todos ellos son bastante similares, lo cual puede corroborarse numéricamente en la segunda columna de la Tabla 2. De esto puede concluirse que si se realiza una calibración adecuada y mantenida en el tiempo, cualquiera de las estrategias podría ser relativamente válida. Sin embargo, de las gráficas de la Figura 14 se deduce que solo el control BC-P es suficientemente robusto como para proporcionar errores de apuntamiento (y por tanto, energía captada) similares a los resultados anteriores. De hecho, comparando los resultados de la segunda y tercera columna de la Tabla 2, puede observarse que sólo esta estrategia mantiene una energía captada similar, mientras que para el resto, ésta se reduce drásticamente en la tercera columna.

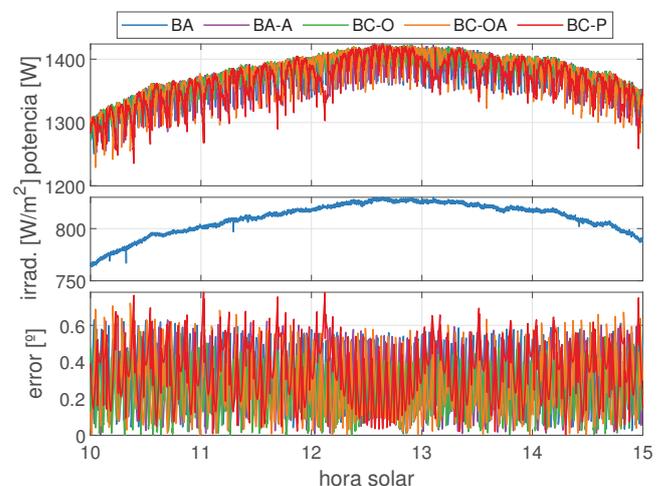


Figura 13: Resultados de las estrategias de control cuando el control utiliza calibración.

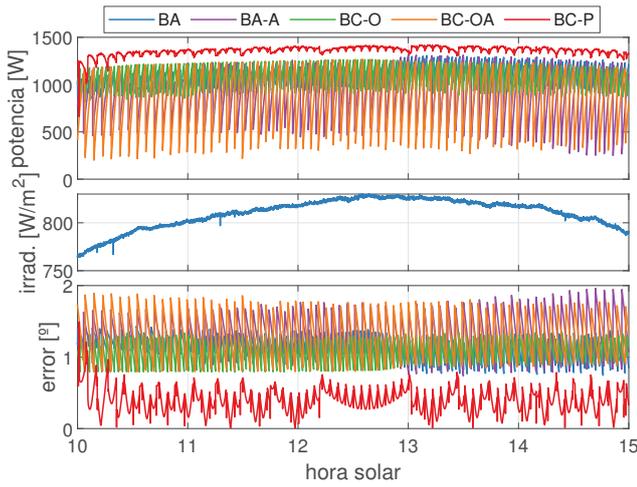


Figura 14: Resultados de las estrategias de control cuando el control no utiliza calibración.

Tabla 2: Energía eléctrica producida en resultados de simulación.

Estrategia de control	Wh prod. Con calibración	Wh prod. Sin calibración
BA	6851.91	5472.31
BA-A	6863.76	4611.50
BC-O	6893.69	5427.07
BC-OA	6863.24	4274.92
BC-P	6818.40	6787.35

6. Resultados experimentales

Para comparar las distintas estrategias de control de apuntamiento se ha realizado un experimento en el cual se va cambiando el controlador cada cierto tiempo a lo largo del mismo día. Esto se ha realizado aprovechando un día claro, donde las condiciones meteorológicas no cambien de manera apreciable, lo cual permite comparar el comportamiento de las estrategias, en términos de desempeño por apuntamiento, en condiciones similares. La Figura 15 muestra los datos experimentales obtenidos el día 31/10/2020. Inicialmente se ha probado la estrategia en bucle abierto (BA), se conmuta tras una serie de inicializaciones a la estrategia en bucle cerrado con realimentación de potencia (BC-P). Sobre las once hora solar se inician las pruebas con el control en bucle cerrado con sensor electro-óptico (BC-O). Seguidamente se prueban de manera consecutiva estas dos últimas estrategias pero utilizando el adelanto (BA-A y BC-OA), para finalizar con una prueba adicional de la estrategia BA, ya que tanto la radiación solar como la temperatura de los módulos era baja al inicio de los experimentos. En la figura se pueden observar las gráficas de las trayectorias de la potencia captada, de la irradiancia normal directa, de la eficiencia real (η) y de la eficiencia normalizada (η_n). La eficiencia se ha definido por la expresión (9) como la relación entre la potencia instantánea generada por el sistema de captación, $P(t)$, y la recibida por el mismo, siendo $Irr(t)$ la irradiancia instantánea y A_c el área de los paneles instalados.

$$\eta(t) = \frac{P(t)}{Irr(t) \cdot A_c} \tag{9}$$

Teniendo en cuenta que no se dispone de información de la posición real del Sol, el desempeño de los controladores se evaluará utilizando como medida indirecta la eficiencia, la cual depende, entre otros factores, del grado de precisión en el apuntamiento al Sol. Así, para el análisis del *desempeño por apuntamiento*, en el cálculo de la eficiencia hay que tener en cuenta que la potencia que producen los módulos solares disminuye con la temperatura de la célula fotovoltaica. Este hecho se corrobora, por ejemplo, en las gráficas de Figura 15. En la segunda gráfica se muestra, junto a la irradiancia, la evolución de la temperatura de un módulo solar. Se puede observar cómo el cambio a la estrategia BA al final del experimento produce un rendimiento menor que esa misma estrategia al inicio del experimento, cuando las temperaturas eran menores. A fin de independizar el desempeño de la estrategia por apuntamiento del rendimiento real, en la cuarta gráfica de esta figura se presenta la *eficiencia normalizada*, en la que se ha corregido el efecto de la temperatura sobre el rendimiento de la célula.

Tabla 3: Ángulos de Euler estimados tras la calibración.

	Ideal [°] (R,P,Y)	Estimada [°] (R,P,Y)
${}^G R_0$	(0, 0, 180)	(-0.069, 0.103, 179.15)
${}^{Mi} R_M$	(0, 0, 0)	(0.004, 2.374, -0.159)
${}^{3i} R_3$	(0, 0, 0)	(-0.481, 0.505, 0)

Para las estrategias de control en bucle abierto mediante Ecuaciones Solares (BA y BA-A) y de control en bucle cerrado mediante sensor óptico (BC-O y BC-OA), se utilizan las rotaciones estimadas obtenidas mediante el proceso de estimación descrito la Sección 3. En la Tabla 3 se muestran los valores de los ángulos de Euler (*RPY: Roll, Pitch y Yaw*) que permiten construir las matrices de rotación. En el caso del control en bucle cerrado por realimentación de potencia (BC-P) el sistema no se calibra previamente, es decir, se mantienen valores teóricos o ideales para esas rotaciones. Por lo tanto, en esta gráfica se muestran los comportamientos correspondientes a los presentados en la Figura 13, salvo el de BC-P, que se correspondería al de la Figura 14.

Tabla 4: Eficiencia media.

Estrategia de control	Wh prod.	Wh recib.	Eficiencia	Eficiencia corr. T^{ra}
BA	970.87	5522.03	0.1758	0.1767
BC-O	1198.73	6921.86	0.1733	0.1771
BA-A	1143.68	6868.85	0.1665	0.1710
BC-OA	1117.05	6852.71	0.1630	0.1681
BC-P	961.08	5541.37	0.1734	0.1761
BA	364.73	2209.03	0.1651	0.1706

Al igual que en los resultados de simulación, el control en bucle abierto (BA) se configuró para realizar movimientos de apuntamiento a intervalos de tiempo fijo igual a 120 segundos; mientras que el resto de estrategias se configuraron para mantener el vector solar dentro de una zona definida por un ángulo α_c igual a 0.5 grados. El rizado de la curva de potencia se debe a que el error del apuntamiento varía a medida que el Sol se va moviendo estando el seguidor parado. De hecho, se puede deducir de estas curvas que el seguidor realiza un movimiento

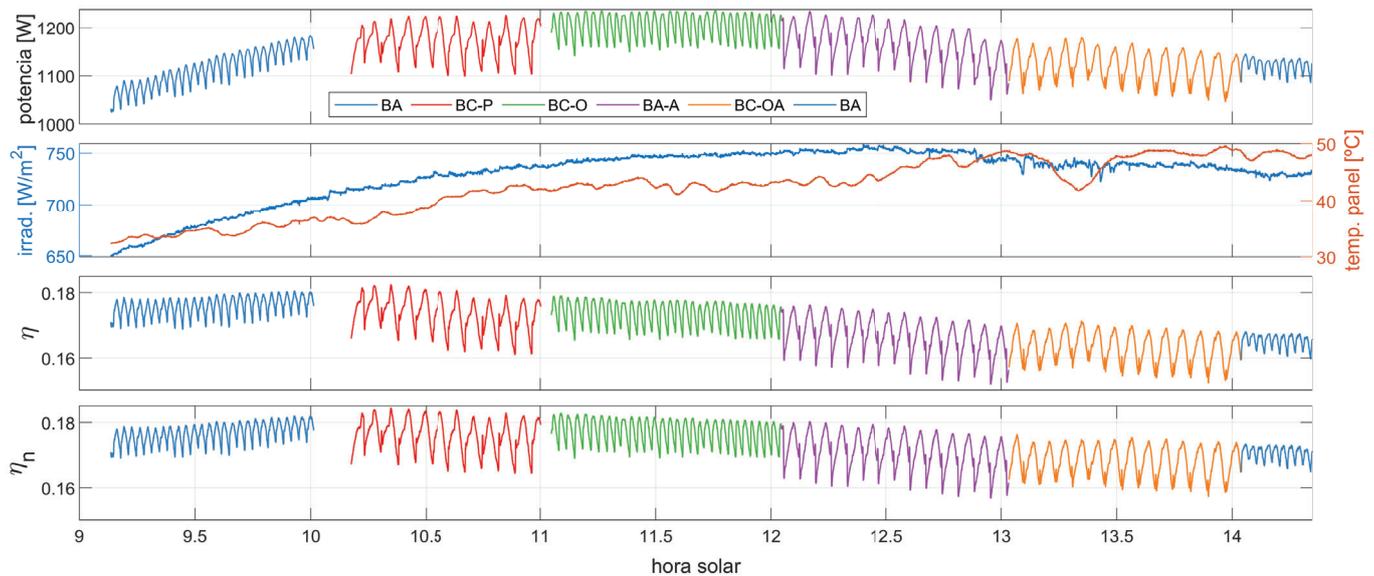


Figura 15: Resultados experimentales obtenidos con las distintas estrategias de control de apuntamiento.

de reajuste cuando la curva de potencia tiene un mínimo local en el rizado. A este respecto, nótese como el periodo del rizado en la estrategia en bucle abierto sin adelanto (BA) es fijo, e igual a 120 segundos, mientras que el del resto de estrategias con adelanto dependerá de las predicciones de cuando el error de apuntamiento supere el semiángulo de control α_c . Se puede observar cómo las estrategias BA y BC-O producen una trayectoria de potencia con una magnitud del rizado menor que el resto de estrategias. Esto se debe a que estas dos estrategias tratan de llevar el vector solar al origen del sistema de referencia asociado a los módulos solares en cada movimiento de apuntamiento, mientras que las demás estrategias tratan de aprovechar al máximo los límites de la zona cuadrada definida por α_c . Lo anterior implica que las estrategias sin adelanto realizan más movimientos de apuntamiento a lo largo de un día, lo cual puede producir desgaste prematuro de las partes mecánicas móviles o averías.

En la Tabla 4 se presentan los resultados medios (integrados en el tiempo y normalizados) obtenidos con las distintas estrategias. Como puede observarse, el desempeño por apuntamiento (reflejado a través de la eficiencia normalizada) es muy parecido para todas las estrategias. La principal causa de la diferencia de rendimiento, en realidad, se debe a los diferentes rizados que se obtienen con las estrategias que usan el apuntamiento en adelanto y las que no lo usan. Sin embargo, para hacer justa esta comparativa hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones. Tal como se concluyó con las simulaciones, si bien la estrategia de control en bucle cerrado mediante realimentación de potencia parece tener un desempeño similar respecto a las otras dos estrategias de control en adelanto, su robustez se puede visualizar cuando el sistema no está calibrado. En este sentido, la Figura 16 muestra una comparación entre el control mediante realimentación de potencia y el control en bucle abierto en adelanto cuando el sistema no está calibrado, es decir, en ambas estrategias se utilizan las rotaciones ideales de la Tabla 3. Este experimento, que se realizó el día 02/11/2020, sería equivalente a uno de los presentados en la Figura 14. Se puede observar cómo en este caso sí hay una caída de rendimiento muy significativa. Por tanto, la estrategia de control BC-P permite poner en funcionamiento el seguidor solar sin necesidad de costosas calibraciones (en tiempo y en dinero) manteniendo un nivel de rendimiento similar a otras estrategias de control con movimientos de apuntamiento en adelanto. Y a esta ventaja hay que sumarle el hecho de que estos sistemas se suelen descalibrar con el tiempo por distintos motivos.

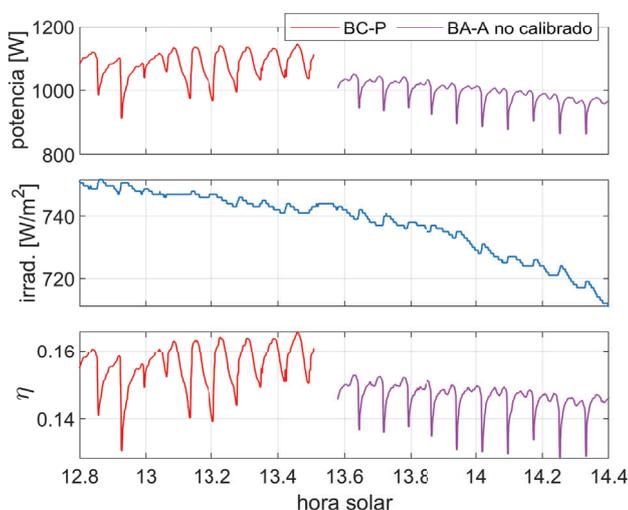


Figura 16: Comparación entre una estrategia de control en bucle cerrado mediante realimentación de potencia y una estrategia de control en bucle abierto mediante Ecuaciones Solares en adelanto cuando el sistema no está calibrado.

Respecto a la estrategia de control BC-OA, podría parecer que el sensor electro-óptico proporciona la misma información que trata de estimar el control por realimentación de potencia, y además de manera directa. Pero la realidad es que si la pose real del sensor óptico se desvía demasiado de la pose teórica, la medida que proporciona no tiene utilidad hasta que no se corrija, lo que implicaría la realización de nuevas calibraciones.

7. Conclusiones

Para obtener unas conclusiones realistas acerca de qué controlador permite una producción mayor de energía durante el año, sería necesario probar el funcionamiento con cada controlador durante periodos de tiempo del orden de varios meses como mínimo (debido a las condiciones climatológicas cambiantes), e incluso disponer de tantos seguidores solares como tipos de control a fin de que todos los ensayos se realicen bajo las mismas condiciones. Si bien este tipo de estudio queda fuera del alcance de este trabajo, la posibilidad de cambiar el tipo de control de manera prácticamente instantánea en la planta experimental permite extraer algunas conclusiones acerca del desempeño de los controladores y sus limitaciones.

Las estrategias de control en bucle abierto, tanto la de tiempo fijo como la de con adelanto, necesitan una calibración previa de los sistemas de referencia asociados a la plataforma y al conjunto de los módulos solares para obtener los mayores niveles de eficiencia energética. Si se tiene en cuenta que los sistemas mecánicos se suelen descalibrar con el tiempo, esto puede ser un inconveniente serio que puede afectar al mantenimiento del sistema. Además dependen de forma muy sensible de las Ecuaciones Solares, por lo que disponer de un algoritmo muy preciso es crucial. Por otra parte, existen fenómenos atmosféricos que hacen cambiar la posición aparente del Sol (Carballo et al., 2019) lo que hace que a veces exista una mayor discrepancia entre la posición del Sol obtenida mediante las Ecuaciones Solares y la posición que maximiza la irradiancia.

Las estrategias de control en bucle cerrado mediante realimentación con un sensor electro-óptico tienen adicionalmente el problema de la necesidad de calibración del sistema de referencia asociado al sensor. A modo de ejemplo, en la segunda fila de la Tabla 3 puede observarse cómo el ángulo de cabeceo (*pitch*) de la rotación del sensor respecto al ideal es del orden de 2,3 grados en el seguidor utilizado en este artículo. Si se tiene en cuenta que el semiángulo de aceptación de los módulos solares utilizados es de aproximadamente 1 grado, de no existir corrección de esta matriz no se estaría generando energía con esta estrategia. Por otra parte, los sensores electro-ópticos tienen el problema de que pueden perder la posición del Sol en días con condiciones climatológicas cambiantes. Por lo tanto, si a este control no se le incorpora información adicional (por ejemplo, mediante Ecuaciones Solares), el control resultaría menos robusto que el realizado en bucle abierto.

Por último, la estrategia de control en bucle cerrado mediante realimentación de potencia aporta un compromiso óptimo entre eficiencia y robustez en el seguimiento solar, puesto que permite el funcionamiento en días con condiciones nubosas, siendo su mayor ventaja respecto de las otras estrategias de control que no necesita una calibración previa del sistema para funcionar. Por su forma de estimar la posición del Sol, este tipo de control está limitado en cuanto al ángulo α_c que define la región de máxima potencia en el plano $x_3 - y_3$ asociado al conjunto de los módulos solares. Esto se traduce en que no permite disminuir el rizado de la potencia por debajo de un cierto límite, el cual es mayor que el que se puede alcanzar con las otras cuatro estrategias de control.

Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2020-115561RB-C32, financiado por Ministerio de Ciencia e Innovación/ Agencia Estatal de Investigación/10.13039/501100011033/ "FEDER Una manera de hacer Europa".

Referencias

- Ben Or, A., Appelbaum, J., 2013. Estimation of multi-junction solar cell parameters. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21 (4), 713–723.
DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.2158>
- Berenguel, M., Rubio, F., Valverde, A., Lara, P., Arahal, M., Camacho, E., López, M., 2004. An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant. *Solar Energy* 76 (5), 563–575.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.006>
- Blanco-Muriel, M., Alarcón-Padilla, D. C., López-Moratalla, T., Lara-Coira, M., 2001. Computing the solar vector. *Solar Energy* 70 (5), 431–441.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00156-0)
- Carballo, J. A., Bonilla, J., Berenguel, M., Fernández-Reche, J., García, G., 2019. New approach for solar tracking systems based on computer vision, low cost hardware and deep learning. *Renewable Energy* 133, 1158–1166.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.101>
- Chiesi, M., Franchi Scarselli, E., Guerrieri, R., 2017. Run-time detection and correction of heliostat tracking errors. *Renewable Energy* 105, 702–711.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.093>
- Chowdhury, M., Khandakar, A., Hossain, B., Abouhasera1, R., 2019. A low-cost closed-loop solar tracking system based on the sun position algorithm. *Journal of Sensors* 2019, 1–11.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/3681031>
- 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.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.071>
- Mems, S., 2016.
URL: <http://www.solar-mems.com/solar-tracking>
- Pérez-Higueras, P., Muñoz, E., Almonacid, G., Vidal, P., 2011. High concentrator photovoltaics efficiencies: Present status and forecast. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (4), 1810–1815.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.046>
- Rodrigo, P., Gutiérrez, S., Velázquez, R., Fernández, E. F., Almonacid, F., Pérez-Higueras, P., 2015. A methodology for the electrical characterization of shaded high concentrator photovoltaic modules. *Energy* 89, 768–777.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.143>
- Rubio, F., Ortega, M., Gordillo, F., López-Martínez, M., 2007. Application of new control strategy for sun tracking. *Energy Conversion and Management* 48 (7), 2174–2184.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.12.020>
- Satú, M. G., Castaño, F., Ortega, M. G., Rubio, F. R., 2020a. Auto-calibration method for high concentration sun trackers. *Solar Energy* 198, 311–323.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.073>
- Satú, M. G., Castaño, F., Ortega, M. G., Rubio, F. R., 2020b. Power feedback strategy based on efficiency trajectory analysis for hcpv sun tracking. *Renewable Energy* 161, 65–76.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.031>
- Tien, N., Shin, S., Sep 2016. A novel concentrator photovoltaic (CPV) system with the improvement of irradiance uniformity and the capturing of diffuse solar radiation. *Applied Sciences* 6 (9), 251.
DOI: 10.3390/app6090251
- Yavrian, A., Tremblay, S., Levesque, M., Gilbert, R., 2013. How to increase the efficiency of a high concentrating pv (HCPV) by increasing the acceptance angle to +3.2°. *AIP Conference Proceedings* 1556 (1), 197–200.
DOI: 10.1063/1.4822230
- Zubi, G., Bernal-Agustín, J. L., Fracastoro, G. V., 2009. High concentration photovoltaic systems applying iii-v cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (9), 2645–2652.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.002>