

CORRECCIÓN DE LA DERIVA EN SISTEMAS DE SEGUIMIENTO SOLAR A TRAVÉS DE CONTROL DE LAZO CERRADO

González-Camarillo H.*, Calleja R.****,** Pérez-Enciso R.A.****,** Pérez-Rábago C.A.***,** Estrada-Gasca C.A.*

*Instituto de Energías Renovables, UNAM, Priv. Xochicalco, Temixco, 62580, (Morelos), México,
hgoca@ier.unam.mx

** Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Sonora, Blvd. Encinas y Rosales, Hermosillo, 83000, (Sonora), México, ramiro.calleja@unison.mx

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2071>

RESUMEN

Los sistemas de seguimiento solar de dos ejes en aplicaciones de concentración solar requieren una mayor precisión en el seguimiento automático de la posición aparente del Sol, esto con el fin de mantener la radiación solar concentrada en una posición fija en el receptor del sistema, ya que una mínima variación se traduce en un desplazamiento (deriva) del spot de concentración de la zona de interés. Este trabajo se centra en la discusión de los métodos implementados para la solución de los problemas de deriva y corrección de los ángulos de elevación y acimut en los dispositivos de seguimiento solar. Para llevar a cabo la evaluación de la corrección de la deriva, se emplearon dos dispositivos de seguimiento solar de dos ejes de movimiento. Un Helióstato de 36 m² (E3) ubicado en la Plataforma Solar de Hermosillo, Sonora, México. El segundo es un concentrador solar reflectivo de no imagen tipo Fresnel para la caracterización de celdas fotovoltaicas ubicado en el IER-UNAM en Temixco, Morelos, México. El análisis planteado en este documento se basa principalmente en la comparativa de los resultados obtenidos a partir de implementar una estrategia de control de lazo abierto y cerrado. El control de lazo abierto consiste en un código de programación que realiza el cálculo de la posición del Sol mediante algoritmos propuestos por distintos autores, y que permiten enviar señales de comando a los actuadores de los ejes de acimut y elevación en ambos dispositivos de seguimiento. Para la metodología de lazo cerrado se utiliza un sistema óptico de retroalimentación que trata de un dispositivo de visión (CCD) que permite observar la posición del Sol en tiempo real.

PALABRAS CLAVE: Seguimiento Solar, Lazo Abierto y Cerrado, Corrección Posición, Procesamiento Imágenes.

ABSTRACT

Two axis solar tracking systems require high precision regarding automatic tracking of apparent sun position for solar concentration applications. This, with the aim of maintaining the concentrated solar radiation in a fixed position in the system's receiver. This is so, because a minimum variation results in a deviation (drift) of the solar image concentrated in the area of interest. This work focuses on a discussion of implemented methods for solving drift problems and a correction of elevation and azimuth angles in solar tracking devices.

Two sun tracking devices of two axes movement were used in order to evaluate drift correction. The first one was a 36 m² heliostat (named E3), located in the Solar Platform in Hermosillo, Sonora, México. The second tracking device was a solar concentrator Fresnel type for characterizing photovoltaic cells (FRESNEL) located at IER-UNAM, Temixco, Morelos, México. The analysis of this document is mainly based on the comparison of obtained results from implementing an open-loop and close-loop control strategy. Open-loop control consists of a program code that calculates the Sun's position using algorithms suggested by different authors, it allows send command signals to elevation and azimuth axis actuators on both tracking devices. Closed-loop methodology uses an optical feedback system, which refers to a vision device (webcam) that allows observing in real time the Sun's position.

KEYWORDS: Tracking Sun, Open Loop Control, Close Loop Control, Correct Position, Image Processing.

INTRODUCCIÓN

El seguimiento solar es un método para mantener el colector solar, ya sea fotovoltaico (PV) o fototérmico, en una posición perpendicular a la radiación solar, para aumentar la energía colectada y recibir la máxima radiación solar en todo momento (Sidek et al., 2017). En general, existen dos tipos fundamentales de sistemas de seguimiento solar clasificados según sus grados de libertad y que pueden implementarse como estructuras de un solo eje y estructuras de doble eje para sistemas que requieren mayor precisión. El sistema seguimiento de eje único con un grado de libertad rastrea el movimiento del Sol en una orientación Este – Oeste a lo largo del día, mientras que un sistema de seguimiento de doble eje también rastrea el ángulo de elevación (Kumar, 2011), por lo que tendrá una mayor eficiencia en comparativa con el de un solo eje debido a que sus dos ejes de rotación permiten mantener la superficie del colector perpendicular a los rayos de luz y así obtener la máxima energía del Sol, como se muestra en la Fig. 1. La detección de la posición del Sol y la construcción de dispositivos capaces de guiar las estructuras de seguimiento para que se capture la mayor cantidad de luz solar desempeña un papel fundamental en el uso de la energía solar (Melo, Filho, De Oliveira Júnior, Zolnier, & Ribeiro, 2017). El dispositivo utilizado para llevar a cabo esta tarea se denomina sistema de control, el cual permite rastrear la posición del sol y seguirla mediante una metodología de control.

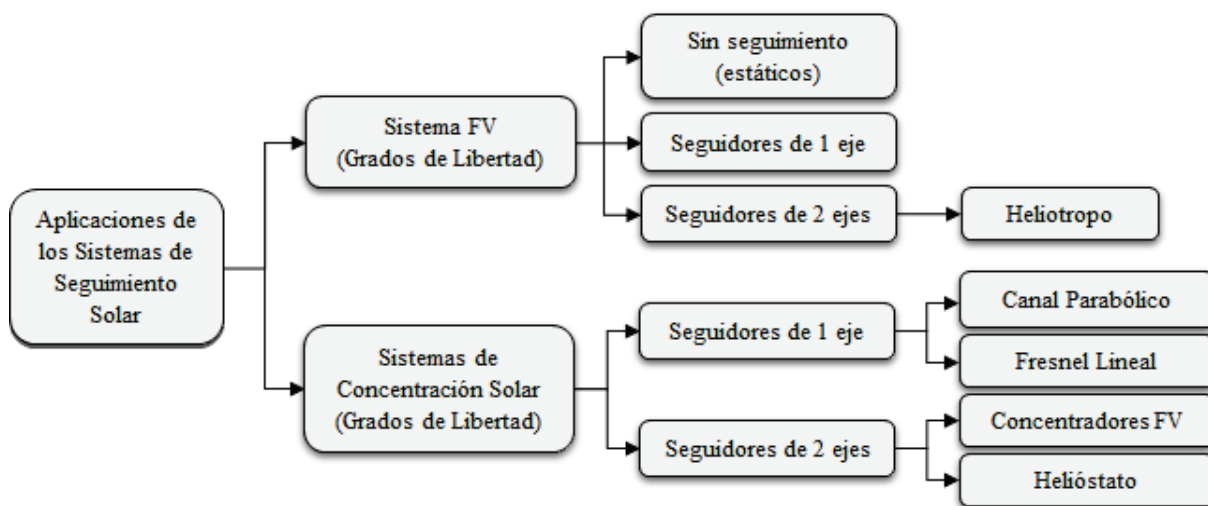


Fig. 1. Clasificación de sistemas de seguimiento solar.

Referente a la metodología de control, existen tres tipos principales: sistemas pasivos, sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado, como se observa en el diagrama de la Fig. 2. Los sistemas de control pasivos realizan la predicción de la posición solar mediante distintas propiedades de las materias (control de presión, disposiciones mecánicas o expansión térmica) por lo que no utilizan sensores electrónicos ni actuadores. El sistema pasivo no mide la posición solar con precisión, aunque son confiables y de diseño simple debido a la exclusión de cualquier dispositivo electrónico de control o motores, y son casi libres de mantenimiento (Foundation et al., 2015). No obstante, el sistema puede conducir a movimientos impredecibles debido a la mecánica, por lo que tal movimiento, ocurre especialmente en días nublados, cuando el Sol es visible e invisible por estar cubierto aleatoriamente por nubes (Chowdhury, Khandakar, Hossain, & Abouhasera, 2019).

En los sistemas de control de lazo abierto una computadora o microprocesador realiza el cálculo de posición del movimiento aparente del Sol por medio de algoritmos o fórmulas matemáticas para enviar comandos a los actuadores para posicionar el seguidor solar. Estos sistemas dependen de la ubicación geográfica y el tiempo estándar. En esta estrategia de control realizará el cálculo de la posición del Sol independientemente de las condiciones de nubosidad y posicionarán el generador en función de los valores calculados (Melo et al., 2017). El método de seguimiento solar por lazo abierto no requiere como base sensores de seguimiento solar puesto que no observa la salida de los procesos que está controlando. Por consiguiente, un sistema de control de lazo abierto no puede corregir ningún error y por lo tanto no puede compensar las perturbaciones en el sistema (Azizi & Ghaffari, 2013).

La metodología de control en los sistemas de lazo cerrado tiene una mayor precisión en la ubicación del punto de máximo rendimiento y se basa principalmente en obtener la información de sensores electroópticos que estiman la posición real del Sol. Esta información se transfiere a un controlador desde estos sensores que detectan parámetros relevantes inducidos por el Sol, se manipulan en el controlador y producen una salida. Esta salida se produce mediante la iluminación diferencial de los sensores electroópticos que a su vez envía una señal de control diferencial que se encarga de comandar la estructura del seguidor y orientarlo en una determinada dirección a tal modo que la iluminación de los sensores electroópticos se equilibra. La implementación de estos sistemas es muy popular, ya que

tienen un efecto positivo en el aumento de la eficiencia en días soleados, sin embargo, estos sistemas tienen el inconveniente de no poder detectar la posición del Sol en un día nublado o un día soleado intermitente.

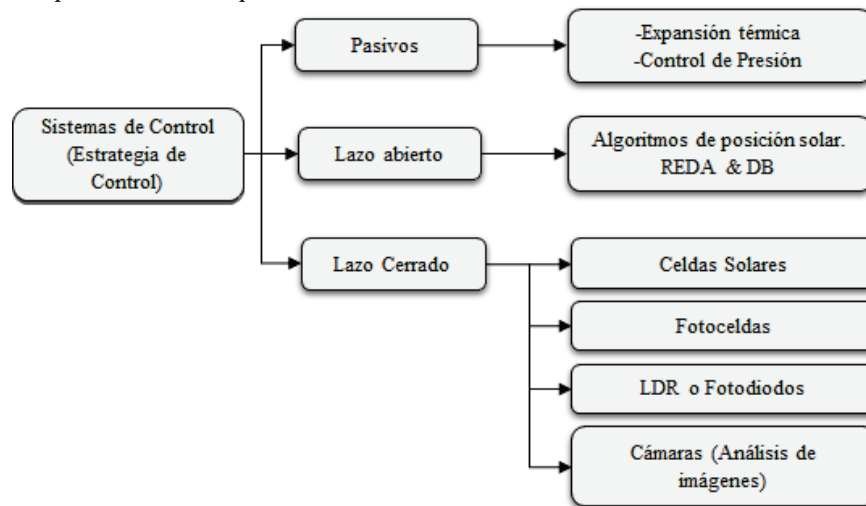


Fig. 2. Tipos de sistemas de control de seguimiento solar.

Los sistemas de control de lazo cerrado son complejos debido al uso de diferentes y/o numerosos sensores. Además, requiere una instalación muy precisa en la estructura (Chowdhury et al., 2019) . En estos sistemas de control se pueden implementar distintos dispositivos con sensores activos, como cámaras con dispositivos de carga acoplada (CCD: Charge-Couple Device, por sus siglas en inglés), fotoceldas, fotodiodos y/o resistencias dependientes de la luz (LDR), entre otros, tal y como se menciona en la clasificación de la Fig. 2. Estos sensores presentan diseños entre los cuales se encuentran los fotodiodos de efecto lateral, los cuales están hechos de un área de fotodiodo único con múltiples puntos de conexión, así como los detectores de cuadrante, hechos de cuatro fotodiodos de área igual (Mäkynen, 2000) . Ambos diseños determinan la posición tomando una medición diferencial. Los fotodiodos de efecto lateral utilizan el efecto fotoeléctrico lateral para producir una fotocorriente diferencial dependiente de la posición; los sensores de cuadrante dependen de la distribución espacial de cuatro fotodiodos o resistencias LDR para permitir la resta de áreas opuestas. Ambos diseños de dispositivos poseen aplicaciones que detectan de movimiento, la vibración, y alineación de los sistemas de seguimiento solar (Welch & Christen, 2015).

Este trabajo, propone el desarrollo de un sistema de control de lazo cerrado implementado en dos sistemas de concentración solar de doble eje, el primero se refiere a un helióstato de 36 m² ubicado en la plataforma solar de Hermosillo, Sonora. Mientras que el segundo se trata de un sistema de concentración solar fotovoltaica (CPV) tipo Fresnel para la caracterización de celdas de alta eficiencia, ubicado en la plataforma solar del IER-UNAM, en Temixco, Morelos (ver Fig. 3).



Fig. 3. Helióstato de 36 m² (a) y Concentrador tipo FRESNEL (b).

La configuración del sistema de control se basa en un controlador principal que realiza el cálculo de la posición solar mediante algoritmos que envían señales de comando a los actuadores de los ejes de acimut y elevación de ambos sistemas de seguimiento. Se utiliza un dispositivo de visión (CCD) para llevar a cabo el monitoreo del error de seguimiento a través del análisis de imágenes tomadas de manera continua en la proyección del sistema óptico en

ambos sistemas. Un segundo dispositivo de visión también se configura como un sensor de retroalimentación que permite corregir la deriva de seguimiento en ambos ejes de los seguidores solares y configurar el sistema de control como un sistema de lazo cerrado.

La estrategia de control de lazo abierto de esta propuesta se basa en algoritmos de posición solar para los cuales se desarrolló un código programado en un dispositivo embebido de tiempo real (NI myRIO de National Instruments) con E/S configurables para comandar los actuadores de los sistemas de seguimiento solar. Se tomó en cuenta el análisis comparativo desarrollado (Pérez-Enciso et al., 2015) para dos códigos propuestos por diferentes autores. El primer algoritmo se basa en las ecuaciones de Benford J. E. Bock (Duffie & Beckman, 2013), el segundo fue propuesto por Reda (Reda & Andreas, 2004) también conocido como Algoritmo de Posicionamiento Solar del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL's SPA, por sus siglas en inglés). Con la comparativa de los resultados obtenidos al realizar las pruebas de seguimiento con ambos algoritmos, se optó por utilizar el código propuesto por Reda, ya que la deriva que presenta es significativamente menor, por lo que resulta necesario aplicar una estrategia de circuito cerrado que permita corregir la deriva residual.

METODOLOGÍA

El sistema de control en lazo abierto consiste en un código de programación desarrollado en LabVIEW que realiza el cálculo de los ángulos del vector solar mediante un algoritmo de posición solar, que, para este caso, se utilizó como referencia el algoritmo de Duffie & Beckman, sin embargo, se propone de igual manera utilizar el algoritmo de REDA también conocido como Sun Position Algorithm, de NREL. Este código envía los comandos correspondientes a los actuadores para tener a lo largo del día un seguimiento de la posición aparente del Sol.

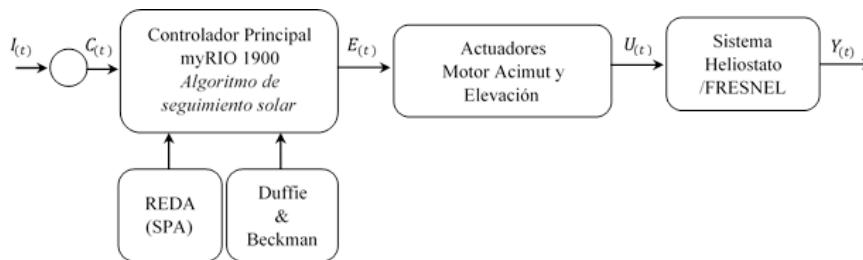


Fig. 4. Esquema del sistema de control en lazo abierto.

Puesto que el sistema en sí, es un sistema de control en lazo abierto, no existe retroalimentación alguna de la posición del heliostato, para implementar esta retroalimentación se desarrolló una estrategia de control de lazo cerrado (ver Fig. 5) la cual permite obtener señales de control que retroalimentan la posición de los dos ejes del concentrador FRESNEL con el fin de contener la deriva presentada a lo largo del tiempo y con ello corregir la posición objetivo de la proyección de la radiación concentrada sobre un blanco lambertiano.

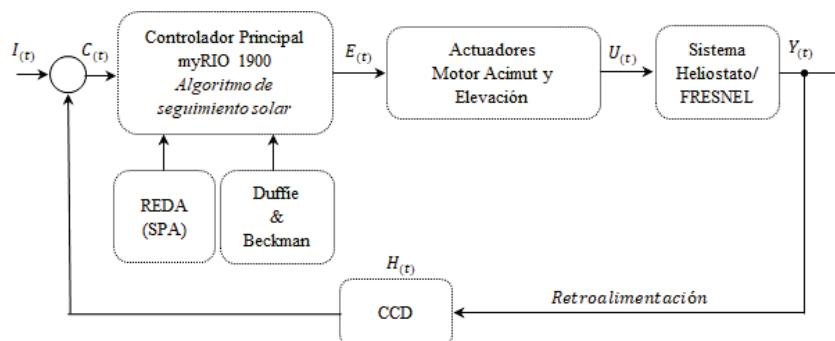


Fig. 5. Esquema del sistema de control en lazo cerrado.

Para la metodología de lazo cerrado se utiliza un sistema óptico de retroalimentación que trata de un dispositivo de visión (cámara CCD1) que permite observar la posición del Sol en tiempo real. Mediante un algoritmo de procesamiento de imágenes se establece una coordenada XY como referencia fija en la imagen de la cámara CCD1, posteriormente se obtiene la referencia dada por el centroide de la imagen formada por el Sol y se calcula el error generado por la desviación entre la posición actual del centroide y el punto de referencia fijo. Con este error se obtiene la señal de retroalimentación que proporciona los ángulos de corrección, los cuales se agregan a los ya calculados por el algoritmo de posición solar, esto con el fin de contener la deriva del dispositivo de seguimiento.

En la evaluación de la deriva de ambos sistemas de concentración, (Heliostato de 36 m² y concentrador FRESNEL), se llevó a cabo el planteamiento de dos diseños experimentales, ya que, para llevar a cabo las campañas de experimentación, se tiene que seguir dos principios de funcionamiento distintos. El heliostato de 36 m² debe captar la radiación solar y proyectarla hacia un blanco lambertiano en lo alto de una torre, por lo que es necesario que el vector normal al plano del espejo bisecte el ángulo formado entre el vector de incidencia solar en función del tiempo $\widehat{R}_i(t)$ y el vector de proyección ($\widehat{R}_r(t)$), este último parte desde el centro del plano de espejo del heliostato hacia un punto objetivo de incidencia en el blanco lambertiano en lo alto de la torre. Es importante considerar que en este modo de operación el vector de proyección debe de apuntar siempre a la posición objetivo en el blanco lambertiano sin importar el ángulo de incidencia en este.

$$\widehat{n}(t) = \frac{\widehat{R}_r(t) + \widehat{R}_i(t)}{\|\widehat{R}_r(t) + \widehat{R}_i(t)\|}$$

Ec. (1)

El diseño experimental para el caso del heliostato de 36 m² (ver Fig. 6) consiste en colocar de manera estratégica el dispositivo óptico (cámara CCD1) sobre un pedestal fijo y en una posición que permita observar al Sol a través de una faceta del heliostato sin importar la posición que este vaya tomando en sus dos ejes de libertad. Esta posición del dispositivo permite mantener siempre el sensor de la cámara CCD1 y su campo de visión, sobre el vector de proyección (\widehat{R}_r) y observar la posición del Sol en todo momento. Con este principio se realiza el cálculo del error de posición el cual permite enviar la señal de retroalimentación a los actuadores para hacer la corrección en los ángulos de seguimiento del heliostato. También, se colocó un dispositivo de visión adicional (cámara CCD2) para monitorear en todo momento la posición de la proyección de la mancha solar en el blanco lambertiano en lo alto de la torre.

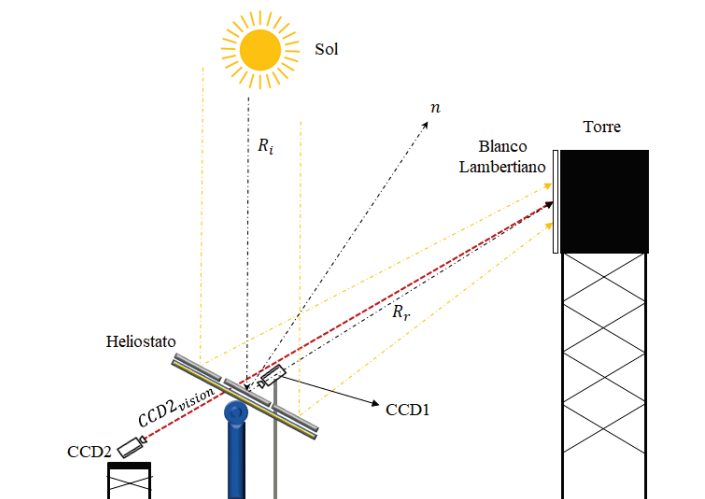


Fig. 6. Esquema experimental para la retroalimentación en el heliostato

El modo de funcionamiento del concentrador FRESNEL consiste en mantener el plano formado por el primer elemento óptico perpendicular al vector de incidencia de la radiación solar. Es decir, que la posición del eje óptico del concentrador estará siempre observando la posición del Sol a lo largo del día. Para el diseño experimental del concentrador FRESNEL (ver Fig. 7) se posicionó el dispositivo óptico (cámara CCD1) perpendicular al plano del concentrador, es decir se colocó en una posición paralela al eje óptico del concentrador a fin de mantener el vector de visión normal a la posición del Sol. La cámara CCD2 colocada sobre el eje óptico permite observar la proyección de la mancha solar sobre un blanco lambertiano a lo largo del tiempo de experimentación.

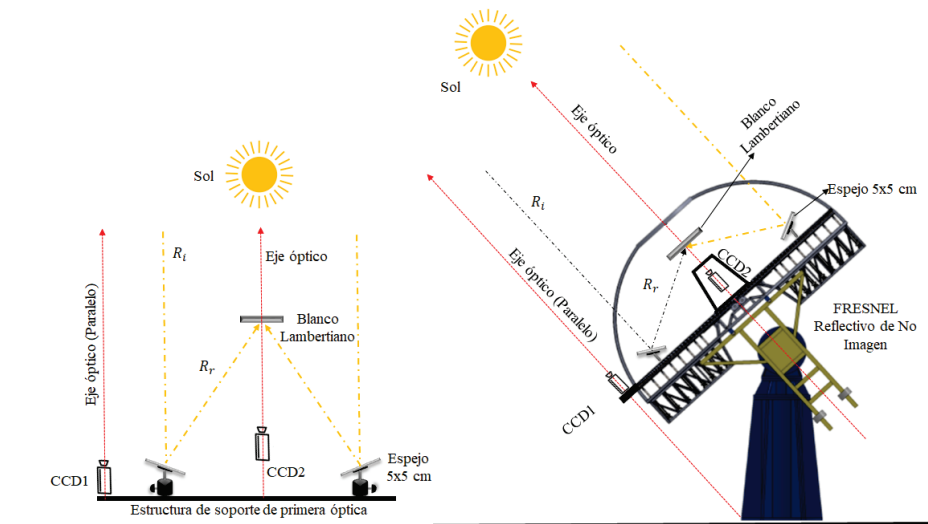


Fig. 7. Esquema experimental para la retroalimentación en el concentrador FRESNEL.

RESULTADOS

A partir de los experimentos diseñados, se realizaron pruebas de seguimiento en los dos sistemas de concentración. Para ambos casos las pruebas de seguimiento se realizaron durante tres ensayos, el primer ensayo corresponde a la prueba de seguimiento solar en lazo abierto controlada por el algoritmo de Duffie & Beckman, la segunda prueba de seguimiento corresponde a el sistema de control de lazo abierto controlado por el algoritmo de REDA, y como tercera prueba se llevó a cabo el seguimiento solar en modalidad de lazo cerrado con el algoritmo de REDA. Esta última prueba resulta de la decisión tomada a partir de observar que con el algoritmo de REDA, el seguimiento presenta una deriva menor en comparativa con el Duffie & Beckman.

Resultados Experimentales Heliostato 36 m²

El desplazamiento del centroide del spot en el blanco Lambertiano, fue captado con la CCD2(ver Fig.6) en un periodo aproximado de 4hrs. En la figura 8 se aprecia la deriva del heliostato E3 controlado en lazo abierto por el algoritmo REDA, donde el error de desplazamiento, con respecto a su posición inicial, estuvo en el rango de 0 a 25mrad en acimut y de -10 a 25mrad en elevación. Por otro lado, con el modo en lazo cerrado, se observa una disminución significativa en la deriva puesto que el centroide del spot, en el blanco lambertiano, se contuvo en el rango de 0 a 15 mrad en acimut y de -4 a 4mrad.

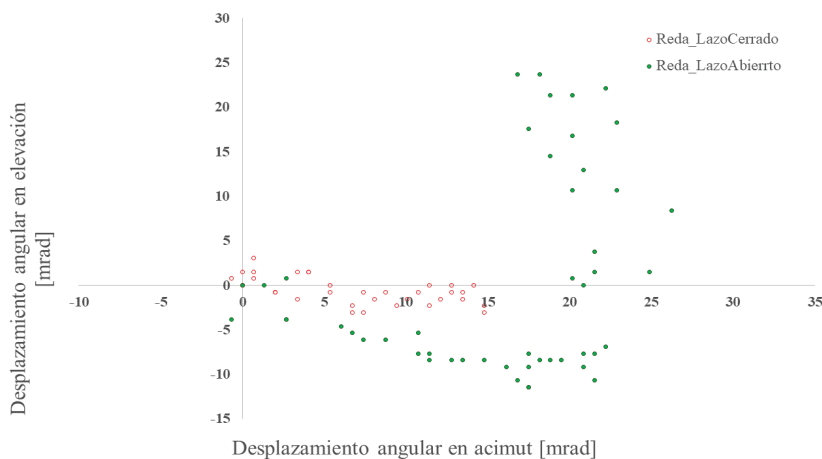


Fig. 8. Desplazamiento angular del centroide de la mancha solar reflejada en el blanco lambertiano de la torre por el Heliostato de 36 m².

Con la CCD1(ver Fig.6) se obtuvo desplazamiento de angular del centroide de la imagen del sol, reflejada por una faceta, en un periodo de 4hrs. Cuando el Heliostato E3 es controlado solamente por el Algoritmo de REDA el CCD1 muestra el desplazamiento del centroide del sol (ver Fig.9), el cual estuvo dentro del rango de 0 a 23 mrad en acimut

y de -6 a 27mrad en elevación. Cuando el CCD1 se utilizó como retroalimentación, en el control del heliostato E3, mantuvo el desplazamiento del centroide dentro del rango de 0 a 0.5 mrad en ambos ejes.

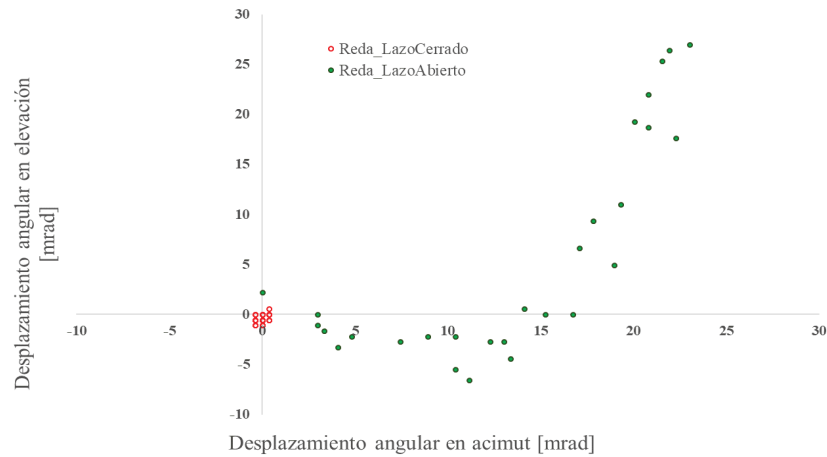


Fig. 9. Desplazamiento angular del centroide del Sol observado desde la cámara CCD1 a través de una faceta del Heliostato de 36 m²

Resultados Experimentales Concentrador FRESNEL

En la Figura 10 se muestran los desplazamientos angulares de la proyección del spot de concentración del FRESNEL sobre el blanco lambertiano. En esta figura se puede apreciar la comparativa de los tres ensayos, en color verde se muestra la deriva de la mancha solar con el algoritmo de Duffie & Beckman, para este caso se presentó un desplazamiento angular máximo de aproximadamente 40 miliradianes en el ángulo acimut, y aproximadamente 23 miliradianes en el ángulo de elevación, correspondientes a 2.39° y 1.31° respectivamente. El desplazamiento de la mancha solar sobre el blanco lambertiano desde el punto de referencia para este algoritmo, correspondió a 4.6 cm en la coordenada X (acimut) y de 2.5 cm en la coordenada Y (Elevación).

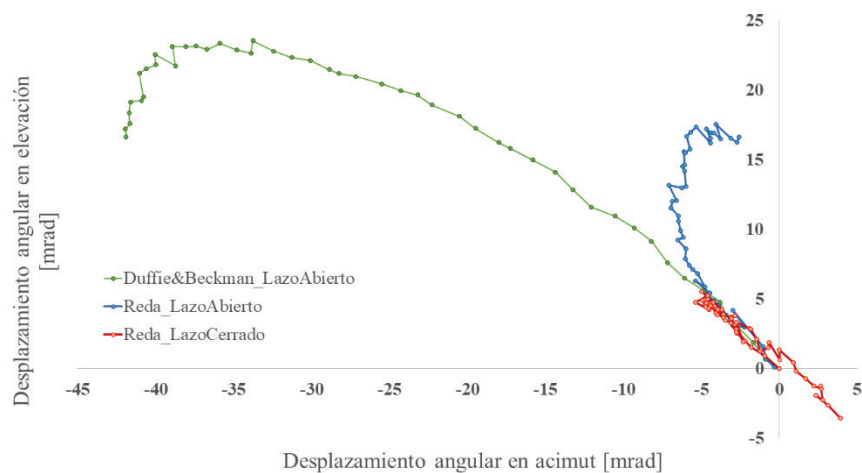


Fig. 10. Desplazamiento del centroide de la mancha solar reflejada en el blanco lambertiano en el concentrador FRESNEL (Cámara CCD 2).

En la Figura 11 se representa de igual manera la deriva del Sol observada desde la cámara CCD1 colocada sobre la estructura del concentrador FRESNEL; se realiza seguimiento solar para los algoritmos de Duffie & Beckman y Reda en lazo abierto y para el algoritmo de Reda con retroalimentación, es decir en lazo cerrado. Es importante señalar que el muestreo que realiza la cámara en la toma de imágenes en cada experimento corresponde a un periodo de 5 horas de operación del sistema en intervalos de 1 segundo, comenzando desde las 10:00 h hasta las 15:00 h.

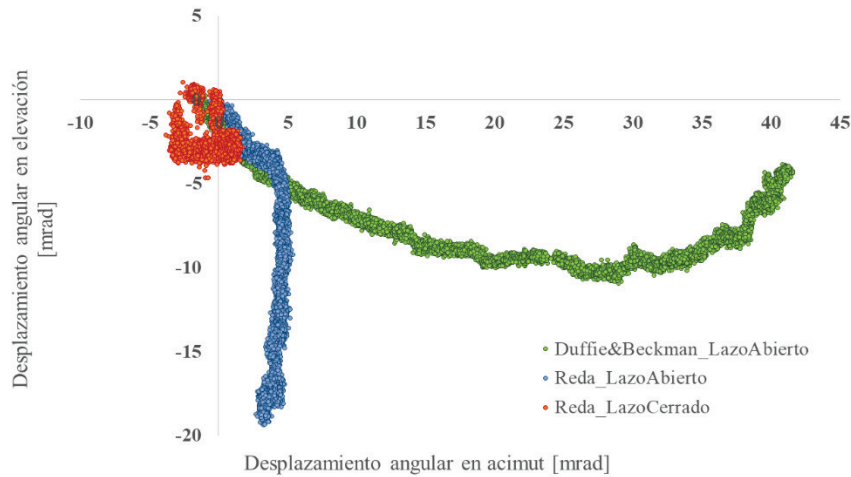


Fig. 11. Desplazamiento de la imagen del sol observada desde la cámara CCD1 en el concentrador FRESNEL.

En la Tabla 1. se muestra el comparativo de los desplazamientos de la mancha solar para los dos algoritmos en lazo abierto y en lazo cerrado de la proyección de la mancha solar sobre el blanco lambertiano del concentrador FRESNEL observado a partir de la cámara CCD1.

Tabla 1. Comparativo del desplazamiento de la mancha solar proyectada sobre el blanco lambertiano en el concentrador FRESNEL.

Grado de libertad	Desplazamiento [mrad]	Desplazamiento [°]	Desplazamiento [m]
<i>a) Algoritmo Duffie & Beckman en Lazo Abierto</i>			
Acimut	42	2.4	0.046
Elevación	23	1.31	0.025
<i>b) Algoritmo Reda en Lazo Abierto</i>			
Acimut	7	0.40	0.0076
Elevación	18	1.03	0.0197
<i>c) Algoritmo Reda en Lazo Cerrado</i>			
Acimut	5	0.28	0.0054
Elevación	6	0.34	0.0065

CONCLUSIONES

La estrategia de control de lazo cerrado propuesta en este trabajo permitió contener la deriva de la mancha solar que se proyecta en el blanco lambertiano para ambos sistemas de seguimiento. Para el caso del sistema FRESNEL la contención de la deriva presentó una mejora de aproximadamente el 89.3% en el ángulo de acimut y aproximadamente 74% en el ángulo de elevación respecto al mayor desplazamiento presentado aplicando la estrategia de control de seguimiento solar en lazo abierto. Así, el sistema de control de seguimiento solar permite realizar el seguimiento de la posición aparente del sol con una precisión tal que se tenga la certidumbre de que la proyección de la mancha solar se mantendrá fija en un rango permisible sobre la zona de interés en el blanco lambertiano.

En el caso del heliostato E3, tomando como base los resultados del desplazamiento de la mancha solar en el blanco lambertiano, la contención de la deriva en acimut mejoró un 40% y un 77% en elevación, sin embargo, al ser el heliostato un sistema “off axis” se deben considerar los efectos de la distancia al blanco lambertiano, la proyección de los rayos reflejados en el periodo de prueba y que los ejes de giro (acimut, elevación) están desplazados de sus ejes de origen. Estos efectos provocan que el sistema presente un mayor desplazamiento del vector de proyección de la mancha solar sobre el blanco lambertiano a lo largo del tiempo, por lo que es prescindible considerar obtener una mayor precisión en los ángulos de corrección de la posición solar.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo en la plataforma Solar de Hermosillo de la Universidad de Sonora y en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM. Hector González-Camarillo agradece al Fondo CONACYT-SENER por la beca de posgrado. Claudio A. Estrada agradece a DGAPA la beca PAPIIT para estancia sabática en la Universidad de Arizona.

REFERENCIAS

- Azizi, K., & Ghaffari, A. (2013). Design and manufacturing of a high-precision sun tracking system based on image processing. *International Journal of Photoenergy*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/754549>
- 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*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3681031>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Retrieved from <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470873663.html>
- Foundation, C., Lee, S. K., Han, Y. H., Lee, W., Ryu, W., & Foundation, C. (2015). *Passive solar tracking system to enhance solar cell output*.
- Kumar, V. S. S. (2011). Automatic Dual Axis Sun Tracking System using LDR Sensor. *International Journal of Current Engineering and Technogy*, 4(5), 3214–3217. <https://doi.org/10.14741/ijcet/4/5/2014/22>
- Mäkynen, A. (2000). Position-sensitive devices and sensor systems for optical tracking and displacement sensing applications (University of Oulu). Retrieved from <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9514257804.pdf>
- Melo, A. G., Filho, D. O., De Oliveira Júnior, M. M., Zolnier, S., & Ribeiro, A. (2017). Development of a closed and open loop solar tracker technology. *Acta Scientiarum - Technology*, 39(2), 177–183. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i2.29306>
- Pérez-Enciso, R., Brito-Bazan, E., Pérez-Rábago, C. A., Arancibia-Bulnes, C. A., Riveros-Rosas, D., & Estrada, C. A. (2015). Correction of the concentrated sunlight spot's drift of the IER-UNAM's solar furnace. *Applied Thermal Engineering*, 75, 1187–1191. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.045>
- Reda, I., & Andreas, A. (2004). Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy*, 76(5), 577–589. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003>
- Sidek, M. H. M., Azis, N., Hasan, W. Z. W., Ab Kadir, M. Z. A., Shafie, S., & Radzi, M. A. M. (2017). Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control. *Energy*, 124, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.001>