

DERIVA INTRÍNSECA EN HELIOSTATOS**Martínez-Hernández A.*, Bravo I.*, Romero M.*, González-Aguilar J.***

*Unidad de Procesos a Alta Temperatura. Instituto IMDEA Energía. Ramón de la Sagra, 3.
28935 Móstoles, Madrid, España. jose.gonzalez@imdea.org

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2048>

RESUMEN

En este trabajo se analiza numéricamente, mediante simulaciones de trazado de rayos basadas en el método de Montecarlo, la deriva intrínseca en heliostatos debida al hecho de que el rayo central no necesariamente coincide con el centro de gravedad del mapa de flujo. La instalación de torre ubicada en el Instituto IMDEA Energía, Móstoles, Madrid (España), se ha usado como caso de prueba. La deriva se evalúa simulando los mapas de flujo de cada heliostato a distintas horas del día y calculando posteriormente sus centros de gravedad. La influencia en la deriva de la distancia focal de los heliostatos y del ángulo de proyección de la distribución de flujo sobre el blanco es investigada en detalle. Los resultados muestran la relevancia de la deriva intrínseca en heliostatos con distancias focales cortas y cómo ésta puede ser minimizada al acomodar la distancia focal del heliostato a su distancia al receptor.

PALABRAS CLAVE: Energía solar de concentración, heliostatos, deriva, trazado de rayos

ABSTRACT

In this work, we numerically evaluate with Monte Carlo ray-tracing simulations the intrinsic drift in heliostats. This drift is associated to the fact that the central ray does not necessarily coincide with the center of gravity of the flux map. For this investigation, the solar tower facility located at IMDEA Energy in Móstoles, Madrid (Spain) is used as a test case. By simulating flux maps at different times of the day and representing their centers of gravity the intrinsic drift is evaluated. The influence on the drift of the focal length of the heliostats and the projection angle of the flux distribution on the target is investigated in detail. Results show the relevance of the intrinsic drift in heliostats with short focal lengths and how this drift can be reduced by making the focal length of the heliostat closer to its slant range.

KEYWORDS: Concentrated solar energy, heliostat, drift, ray-tracing

INTRODUCCIÓN

Para lograr un elevado rendimiento en las centrales solares de torre se requiere una correcta alineación de los heliostatos, con el fin de reflejar la radiación solar con precisión al lugar deseado dentro del área del receptor. Los principales problemas técnicos en este tipo de instalaciones están relacionados con la precisión y estabilidad del apunte de los heliostatos y, en especial, con la variación del punto de apunte a lo largo del día, conocido como deriva. La deriva puede surgir de muchas fuentes, como las desalineaciones en el sistema de seguimiento, los errores de cero en los motores de este, o incluso a diferencias entre la hora solar real y la empleada para orientar a los heliostatos. Además, en un heliostato ideal sin ningún tipo de error ni desalineación, existe una deriva intrínseca asociada al hecho de que el rayo central, entendiéndose como tal aquel que se refleja en el centro la faceta, no necesariamente coincide con el centro de gravedad del mapa de flujo (Escobar-Toledo *et al.*, 2014). En la literatura se pueden encontrar numerosos estudios de deriva donde se investigan las posibles causas de la misma, principalmente desalineaciones en el sistema de seguimiento (Bonanos, 2012; Carretero *et al.*, 2019; Escobar-Toledo *et al.*, 2014; Guo *et al.*, 2013; Iriarte-Cornejo *et al.*, 2014; Jones y Stone, 1999; Lara-Ceredo *et al.*, 2016). Sin embargo, la gran mayoría de estos estudios se han realizado empleando la aproximación del rayo central. Esta aproximación supone que el punto de impacto del rayo central coincide con el centro de gravedad del mapa de flujo, por lo que se desprecia el error de apunte intrínseco y por lo tanto la curva de deriva asociada al mismo. En (Escobar-Toledo *et al.*, 2014), los autores estudiaron ligeramente este efecto, pero los autores consideraron que la deriva intrínseca era despreciable y la investigación se llevó a cabo utilizando la aproximación del rayo central. En este trabajo se investiga numéricamente esta deriva tan particular asumiendo heliostatos ideales, es decir, sin ningún tipo de error ni desalineación. La deriva intrínseca es evaluada para diferentes heliostatos del campo solar de IMDEA Energía, ubicado en Móstoles, Madrid (España) (Romero *et al.*, 2017; Romero *et al.*, 2019), mediante simulaciones de trazado de rayos basadas en el método de Montecarlo. El estudio se focaliza en la influencia sobre la deriva del ángulo de proyección de la distribución de flujo sobre el blanco y de la distancia focal de los heliostatos.

METODOLOGÍA

Este estudio se ha llevado a cabo utilizando como caso de prueba cuatro heliostatos del campo solar ubicado en el Instituto IMDEA Energía (40.3393 N, 3.8804 W) (Romero *et al.*, 2017; Romero *et al.*, 2019). La instalación, denominada ACES/VHCST (Alta Concentración de Energía Solar/Very High Concentration Solar Tower Facility), consta de 169 heliostatos distribuidos en 14 filas. Los heliostatos de las filas 1 a la 8 tienen una distancia focal nominal de 20 m, mientras que los heliostatos de las filas 9 a 14 tienen una distancia focal nominal de 30 m. Cada heliostato tiene como superficie reflectante una única faceta de 3 m² (1,6 m × 1,9 m) con curvatura esférica. La deriva intrínseca se investiga para los heliostatos de focal corta ubicados en el centro de las filas impares, es decir, las filas 1, 3, 5 y 7. Nos referiremos a estos heliostatos como 1-4, 3-5, 5-6 y 7-7, donde el primer número indica el número de fila y el segundo número indica la posición del heliostato en la fila. En la Fig. 1(a) se muestra el plano de la instalación y los cuatro heliostatos empleados para este estudio.

La deriva intrínseca de estos cuatro heliostatos se investiga mediante la simulación de sus mapas de flujo a diferentes horas del día. Cada curva de deriva se obtiene simulando nueve mapas de flujo desde 4 horas antes hasta 4 horas después del mediodía solar, es decir, uno por cada hora. Esto se hace para aquel día del año en el que el vector solar (\vec{u}_s) y el rayo central (\vec{u}_t) son paralelos a mediodía solar. Este día, que es distinto para cada heliostato debido a su diferente orientación con respecto del blanco, hace que el astigmatismo (Igel y Hughes, 1979) sea nulo a mediodía solar, permitiendo, por tanto, investigar el efecto del ángulo de proyección de la distribución de flujo sobre el blanco y el efecto de la distancia focal de los heliostatos sin la influencia de aquel. Tras simular los nueve mapas de flujo, se calculan los centros de gravedad de dichos mapas, obteniendo así la curva de deriva. Con el objetivo de obtener los resultados más generales posibles se ha excluido el efecto de los bloqueos y de las sombras de los heliostatos colindantes al simular los mapas de flujo.

Los mapas de flujo se han generado con un software de trazado de rayos personalizado desarrollado con Matlab (Gonzalo *et al.*, 2019; Matlab R2020a) y que ha sido previamente validado con TracePro® (TracePro 2020). Este programa funciona dividiendo la superficie reflectante del heliostato en pequeños elementos cuadrados y trazando un haz de rayos desde cada uno de ellos. Para todas las simulaciones aquí realizadas se han trazado 10 000 rayos por cada elemento reflectante de la superficie del heliostato, con un total de 1 216 elementos reflectantes cuadrados de 5 cm de lado. Esto da como resultado un total de 12,16 millones de rayos por cada mapa de flujo. El vector normal de cada elemento reflectante se orienta de acuerdo con la curvatura esférica de la faceta, es decir, se desprecia el error óptico de la misma y se supone que es perfectamente esférica. Además, cada rayo del haz se desvía de la dirección principal del vector solar reflejado de acuerdo a la distribución solar empleada, que en este caso es la distribución *limb-darkened* (Romero *et al.*, 2016). Las simulaciones se realizan sobre un blanco de 5 m × 5 m con una irradiancia normal directa de 900 W/m² y una reflectividad de las facetas del 90%. Las dimensiones del blanco garantizan que todos los rayos impactan en él, para así calcular correctamente el centro de gravedad del mapa de flujo.

Como se ha mencionado anteriormente, la deriva intrínseca se debe al hecho de que el rayo central no necesariamente coincide con el centro de gravedad del mapa de flujo. De aquí se deduce que cualquier factor que modifique la forma de los mapas de flujo modificará su centro de gravedad y, por lo tanto, también modificará la curva de deriva. Los parámetros que más repercuten en la forma de un mapa de flujo son el ángulo de proyección de la distribución de flujo sobre el blanco, la distancia focal del heliostato y el astigmatismo. Este último es el responsable de la deriva, ya que depende de la inclinación con la que los rayos solares incidan en el heliostato, es decir, depende de la hora del día, mientras que los otros dos modifican las curvas de deriva producidas por aquel. Para estudiar el efecto del ángulo de proyección de la distribución de flujo se han calculado las curvas de deriva de los 4 heliostatos empleando siete ángulos de inclinación del blanco distintos: 0 (vertical), 15, 30, 45, 60, 75 y 90 (horizontal) grados sexagesimales. Todas estas curvas se han calculado empleando la distancia focal nominal de los 4 heliostatos (20 metros). En cuanto al efecto de la distancia focal, se han calculado las curvas de deriva sobre un blanco vertical, como el representado en la Fig. 1(b), empleando las siguientes siete distancias focales: 14, 16, 18, 20, 22, 24 y 26 metros.

Las distancias heliostato-blanco, las distancias focales nominales, las inclinaciones del blanco para las cuales éste es perpendicular al rayo central y el día del año en el que se han calculado las curvas de deriva se muestran, para cada uno de los 4 heliostatos, en la Tabla 1.

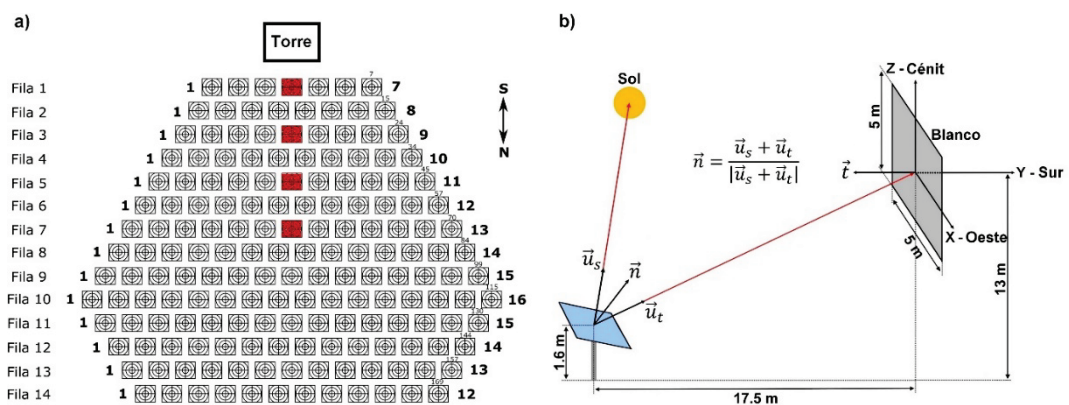


Fig. 1. a) Distribución de los heliostatos en la instalación ACES. Los heliostatos empleados para el estudio de la deriva intrínseca aparecen marcados en rojo. b) Geometría del problema para el heliostato 7-7 con el blanco en posición vertical.

Tabla 1. Parámetros relativos a los 4 heliostatos bajo estudio

Heliostato	1-4	3-5	5-6	7-7
Distancia focal nominal (m)	20	20	20	20
Distancia heliostato-blanco (m)	12,1	14,1	17,2	20,8
Ángulo de proyección con blanco vertical (0°)	70,5°	53,0°	41,0°	32,8°
Día del año (DD/MM)	15/07	12/09	13/10	06/11

RESULTADOS

Efecto del ángulo de proyección de la distribución de flujo sobre el blanco

La Fig. 2 muestra las curvas de deriva intrínseca de los 4 heliostatos obtenidas para las 7 inclinaciones distintas del blanco. Se observa que el error de apunte intrínseco es inferior a 1,2 mrad en todos los casos, siendo más grande cuanto mayor es la diferencia entre la distancia focal del heliostato y la distancia heliostato-blanco (heliostato 1-4). Esto es de esperar, ya que cuanto mayor sea esta diferencia menos convergerán los rayos, por lo que el mapa de flujo tendrá unas dimensiones mayores y será más probable encontrar desviaciones mayores de su centro de gravedad con respecto del centro del blanco. En el apartado siguiente se estudia en detalle este fenómeno.

Una característica común a todos los heliostatos es que sus curvas de deriva son simétricas respecto del mediodía solar. Esto se debe a que los 4 heliostatos bajo estudio se encuentran en el eje central del campo, por lo que el movimiento del sol es simétrico respecto de dicho instante de tiempo. Es por este mismo motivo que el error de apunte a dicha hora solo tiene componente vertical (eje Z), ya que los mapas de flujo correspondientes al mediodía solar son simétricos respecto de dicho eje, haciendo que el centro de gravedad a lo largo del eje X se encuentre justo en el origen ($x = 0$).

Por otro lado, si atendemos al signo de la componente vertical del error de apunte a mediodía solar, se observa que, si el blanco está en posición vertical (0°), éste es negativo si la distancia focal del heliostato es mayor que su distancia al blanco (heliostatos 1-4, 3-5 y 5-6), siendo positivo cuando ocurre lo contrario (heliostato 7-7). Esto es debido a que, cuando el blanco está en posición vertical, los rayos que impactan por debajo del centro recorren una distancia menor que los que impactan por la parte superior. Entonces, si la distancia focal es superior a la distancia al blanco, los rayos que impactan por debajo del centro del blanco están menos focalizados que los que impactan por encima, provocando que las dimensiones del mapa de flujo se agranden en su parte inferior en comparación con la superior, desplazándose así el centro de gravedad hacia abajo. Por otro lado, se observa que la componente vertical del error de apunte a mediodía solar invierte su signo justo cuando la inclinación del banco es tal que éste es perpendicular al rayo central del heliostato (\vec{u}_t), es decir, cuando \vec{u}_t y \vec{t} son paralelos, lo que corrobora la explicación anterior. De aquí se deduce que el error de apunte intrínseco solo será nulo cuando el vector solar (\vec{u}_s), el rayo central (\vec{u}_t) y el vector normal al blanco (\vec{t}) sean colineales, debido a la perfecta simetría del mapa de flujo con respecto del centro del blanco. En la Fig. 3 se muestran los mapas de flujo del heliostato 1-4 a mediodía solar con el blanco en posición vertical (0°) y horizontal (90°) para mostrar más claramente el efecto del desplazamiento del centro de gravedad. Se aprecia que, cuando el blanco se encuentra en posición vertical, el mapa de flujo se agranda en su parte inferior debido al elevado ángulo de proyección ($70,5^\circ$). Cuando el blanco se encuentra en posición horizontal, el efecto se invierte y el mapa se agranda por su parte superior, pero el efecto es menos notable debido al reducido ángulo de proyección ($19,5^\circ$). Cabe destacar que esta deformación de los mapas de flujo debida al ángulo de proyección no se aprecia en los mapas de la Fig. 2 debido a su representación angular.

En cuanto a la componente horizontal del error de apunte (eje X), se observa una característica común a todos los heliostatos. Ésta es positiva antes del mediodía solar y negativa después, lo que produce que todas las curvas de deriva vayan de oeste a este. Esto se debe a que la variación diaria del ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la faceta, a pesar de no ser exactamente la misma para cada heliostato, tiene una característica común a todos ellos: los rayos solares inciden desde el este antes del mediodía solar y desde el oeste después, por lo que el astigmatismo les afecta de manera similar. Merece la pena señalar que, como ya se dijo en el apartado anterior, es justo esa variación del ángulo de incidencia de los rayos solares la que produce la deriva intrínseca.

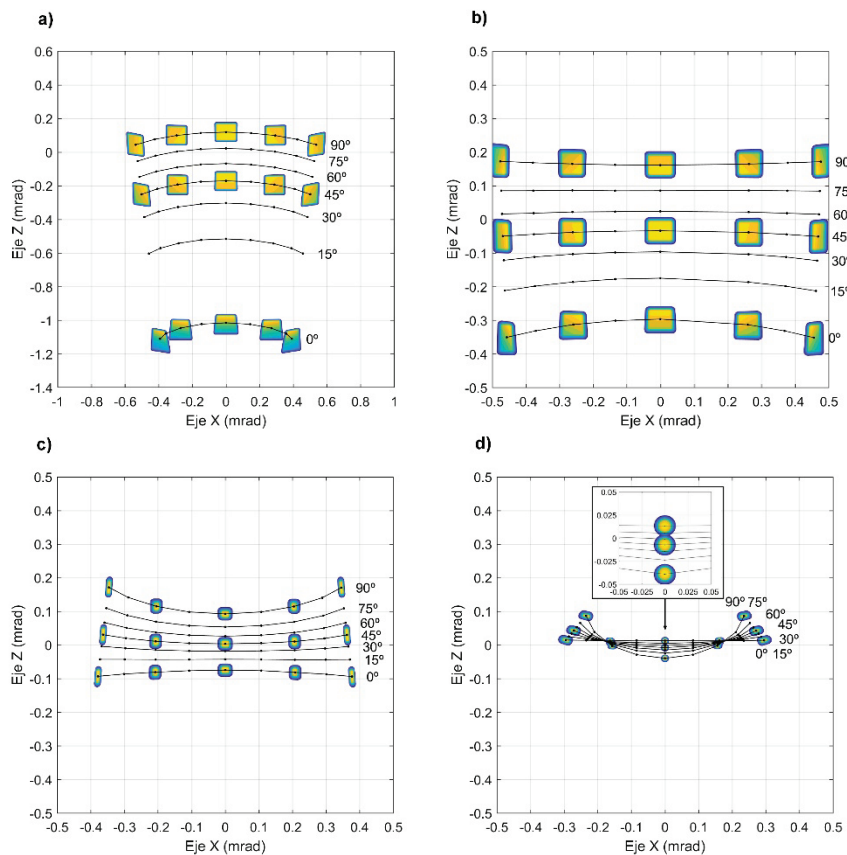


Fig. 2. Curvas de deriva intrínseca de los 4 heliostatos en función de la inclinación del blanco. La posición de la etiqueta que muestra el ángulo de inclinación indica el inicio de la curva. Se muestran, a escala 1:500, los mapas de flujo simulados a ± 4 h, ± 2 h y 0 h respecto del mediodía solar para 0° , 45° y 90° de inclinación del blanco.
a) Heliostato 1-4 (distintos ejes). b) Heliostato 3-5. c) Heliostato 5-6. d) Heliostato 7-7.

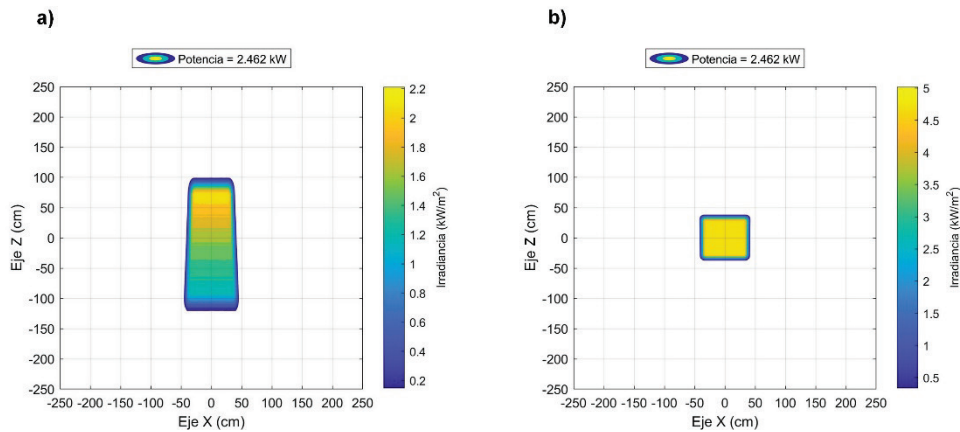


Fig. 3. Mapas de flujo del heliostato 1-4 a mediodía solar con el blanco en posición vertical (a) y horizontal (b).

Efecto de la distancia focal

La Fig. 4 muestra las curvas de deriva intrínseca de los 4 heliostatos obtenidas sobre un blanco vertical (0°) para las 7 distancias focales. Fijémonos, de nuevo, en la componente vertical del error de apunte a mediodía solar, para así eliminar el efecto del astigmatismo. Se observa que, para los 4 heliostatos, el error de apunte es mínimo cuando la distancia focal es lo más próxima posible a su distancia al blanco. Esto es lógico, pues si la distancia focal es igual a la distancia al blanco todos los rayos convergerán al centro de éste, por lo que el error de apunte intrínseco será nulo. Igualmente, se observa el fenómeno explicado en el apartado anterior referente a la diferencia entre la distancia focal y la distancia al blanco. Por ejemplo, para el heliostato 1-4, la componente vertical del error de apunte es negativa para todas las distancias focales empleadas, ya que todas son superiores a su distancia al blanco (12,1 m).

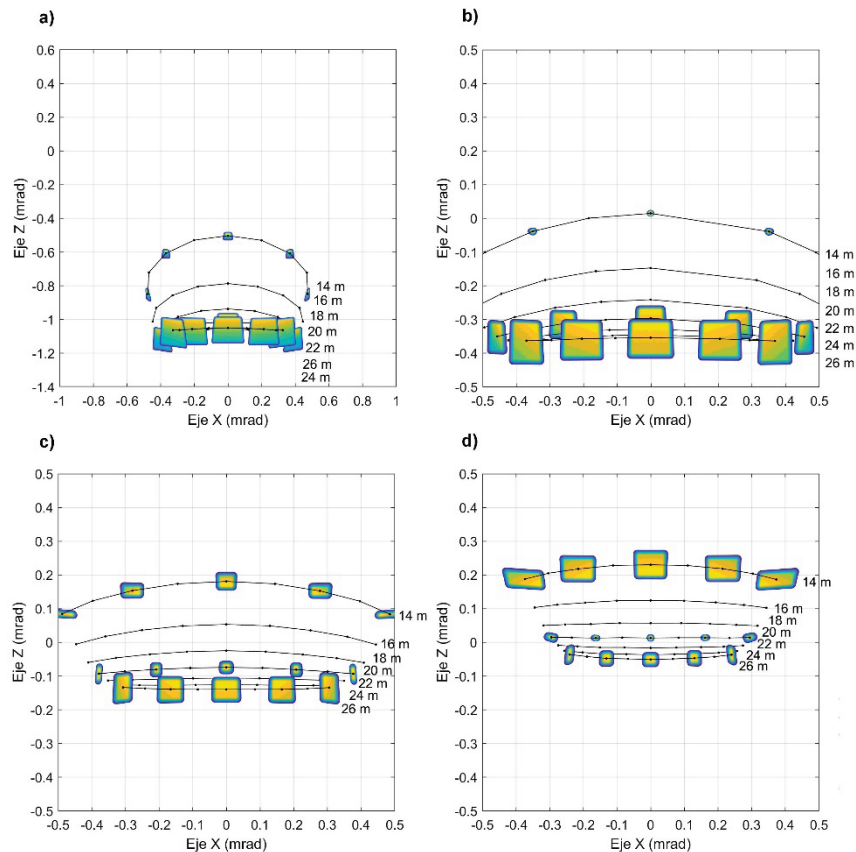


Fig. 4. a) Curvas de deriva intrínseca de los 4 heliostatos en función de la distancia focal. La posición de la etiqueta que muestra la distancia focal indica el inicio de la curva. Se muestran, a escala 1:500, los mapas de flujo simulados a ± 4 h, ± 2 h y 0 h respecto del mediodía solar para 14, 20 y 26 m de distancia focal. a) Heliostato 1-4 (distintos ejes). b) Heliostato 3-5. c) Heliostato 5-6. d) Heliostato 7-7.

Por otro lado, se observa como la extensión de las curvas decrece a media que aumenta la distancia focal. En efecto, si la distancia focal fuese infinita, es decir, si la faceta del heliostato fuese un espejo plano, el error de apunte debería ser nulo a cualquier hora, pues el mapa de flujo sería simétrico respecto del centro del blanco al no darse ni el efecto explicado en el apartado anterior ni efectos astigmáticos. Para corroborar esto se han calculado las curvas de deriva de los 4 heliostatos con una distancia focal de 10^6 metros, obteniéndose, en efecto, que el error de apunte es nulo a cualquier hora del día. Además, se han calculado los errores de apunte a mediodía solar de los 4 heliostatos en función de su distancia focal. Los resultados se muestran en la Fig. 5.

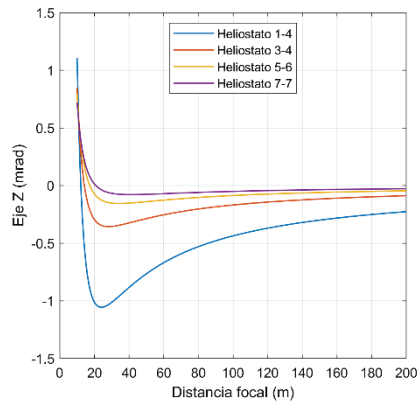


Fig. 5. Componente vertical del error de apunte intrínseco a mediodía solar de los 4 heliostatos en función de su distancia focal (rango 10-200 m).

Como puede verse en la Fig. 5, existe un comportamiento común a los 4 heliostatos que se divide en tres zonas:

- 1) Cuando la distancia focal es inferior a su distancia al blanco, la componente vertical del error de apunte es siempre positiva, siendo más grande cuanto menor sea la distancia focal. Esto se debe al fenómeno explicado en el apartado anterior. Si la distancia focal es inferior a la distancia al blanco los rayos focalizan antes de alcanzar a éste, por lo que los rayos que impactan en su parte superior, que están menos enfocados, provocan que las dimensiones del mapa de flujo se agranden en dicha parte del blanco, desplazando así el centro de gravedad hacia arriba.
- 2) Cuando la distancia focal es superior a la distancia al blanco el efecto anterior se invierte, ya que ahora los rayos que impactan en la parte superior están más focalizados que los que impactan en la parte inferior. Por lo tanto, la componente vertical del error de apunte es negativa. Ésta continúa incrementándose (en valor absoluto) a medida que aumenta la distancia focal, hasta que llega un punto en el que vuelve a decrecer (en valor absoluto).
- 3) Cuando la distancia focal es lo suficientemente grande la componente vertical del error de apunte empieza a decrecer (en valor absoluto), volviéndose nula para una distancia focal infinita. Esto se debe a que cuando la distancia focal es muy superior a la distancia al blanco la convergencia de los rayos es tan baja que el efecto anterior deja de ser relevante (los rayos focalizan prácticamente igual por la parte superior del blanco que por la inferior). Por lo tanto, el mapa de flujo se vuelve simétrico respecto del centro del blanco.

CONCLUSIONES

En este estudio se ha analizado en detalle el efecto del ángulo de proyección de la distribución de flujo sobre el blanco y de la distancia focal en el error de apunte intrínseco de los heliostatos. Este error de apunte surge de la discordancia entre el punto de impacto del rayo central y el centro de gravedad del mapa de flujo. La variación de dicho error de apunte a lo largo del día, debida a la variación del ángulo de incidencia de los rayos solares, es decir, debida a la variación de la aberración astigmática, produce las curvas de deriva intrínseca.

Todas las curvas de deriva se han simulado para aquel día en el que el vector solar (\vec{u}_s) y el rayo central (\vec{u}_t) son paralelos a mediodía solar, lo que hace que el astigmatismo sea nulo en dicho instante de tiempo, pudiendo así estudiar los otros dos factores sin la influencia de éste. Una característica común a los 4 heliostatos es que la componente horizontal del error de apunte es siempre positiva antes del mediodía solar, siendo negativa después, lo que produce que todas las curvas de deriva vayan de oeste a este. Esto sucede siempre con independencia del ángulo de proyección o de la distancia focal, por lo que se concluye que la aberración astigmática es el factor que más influye en el error de apunte intrínseco.

Referente a la distancia focal se ha demostrado que, si esta es igual a la distancia al blanco, el error de apunte intrínseco es nulo con independencia del ángulo de proyección, ya que todos los rayos impactan en el centro del blanco. De aquí se deduce la importancia de acomodar correctamente la distancia focal de los heliostatos a su distancia al blanco, para así eliminar el efecto de ambos factores. No obstante, las aberraciones astigmáticas siempre estarán presentes, por lo que siempre habrá errores de apunte intrínsecos. Sin embargo, estos decrecen a medida que se aumenta la distancia focal. Para los heliostatos aquí estudiados dichos errores de apunte son del orden de 0,5 mrad, valor nada despreciable. Estos errores de apunte podrían, por ejemplo, modificar sustancialmente las curvas de deriva producidas por cualquier otro factor, imposibilitando, por tanto, detectar dichos factores para su posterior corrección. Se concluye, por tanto, que, para campos solares con heliostatos con distancias focales cortas donde se requiera una gran precisión de apunte, el error de apunte intrínseco es relevante.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención No 823802 (SFERA III). Los autores desean agradecer a la Comunidad de Madrid y Fondos Estructurales por su apoyo financiero al proyecto ACES2030-CM (S2018 / EMT-4319). AMH también agradece el apoyo de la Comunidad de Madrid (España) a través del Programa de Empleo Joven (PEJD-2017-PRE / AMB-4951).

REFERENCIAS

- Bonanos, A. M. (2012). Error analysis for concentrated solar collectors. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(6), 063125.
- Carretero, E., Preciado, J., Salinas, I., Ayora, I., & Heras, C. (2019). Evaluation and measurement of heliostat misalignment in solar power plant using vector model. *Optics express*, 27(8), A257-A268.
- Escobar-Toledo, M., Arancibia-Bulnes, C. A., Iriarte-Cornejo, C., Waissman, J., Riveros-Rosas, D., Cabanillas, R. E., & Estrada, C. A. (2014). Heliostat image drift behavior for different error sources. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6(2), 023117.
- Gonzalo, I. B., Martínez-Hernández, A., Romero, M., & González-Aguilar, J. (2020). Efficient Ray-Tracing Program to Simulate the Optical Performance of Heliostats in Concentrated Solar Power Facilities. In *Proceedings ISES Solar World Congress 2019*.
- Guo, M., Wang, Z., & Sun, F. (2013). Simulations of reflected sun beam traces over a target plane for an azimuth-elevation tracking heliostat with fixed geometric error sources. *Solar energy*, 97, 102-111.
- Igel, E. A., & Hughes, R. L. (1979). Optical analysis of solar facility heliostats. *Solar Energy*, 22(3), 283-295.
- Iriarte-Cornejo, C., Arancibia-Bulnes, C. A., Salgado-Transito, I., Waissman, J., Cabanillas, R. E., & Estrada, C. A. (2014). Compensation of heliostat drift by seasonal sampling. *Solar Energy*, 105, 330-340.
- Jones, S. A., & Stone, K. W. (1999). Analysis of solar two heliostat tracking error sources (No. SAND99-0239C). Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, and Livermore, CA.
- Lara-Cerecedo, L. O., Moreno-Cruz, I., Pitalúa-Díaz, N., & Arancibia-Bulnes, C. A. (2016). Modeling of drift effects on solar tower concentrated flux distributions. *International Journal of Photoenergy*, 2016.
- Matlab (Matlab R2018a). www.mathworks.com
- Romero, M., González-Aguilar, J. & Zarza, E. Concentrating solar thermal power. In *Energy efficiency and renewable energy handbook*, Chapter 42, edited by D. Y. Goswami, F. Kreith (ROUTLEDGE in association with GSE Research., Florida, USA, 2016), pp. 1237-1345.
- Romero, M., González-Aguilar, J., & Luque, S. (2017, June). Ultra-modular 500m² heliostat field for high flux/high temperature solar-driven processes. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1850, No. 1, p. 030044). AIP Publishing LLC.

Romero, M., Gonzalez-Aguilar, J., Sizmann, A., Batteiger, V., Falter, C., Steinfeld, A., ... & Liefstink, D. (2019, November). Solar-Driven Thermochemical Production of Sustainable Liquid Fuels from H₂O and CO₂ in a Heliostat Field. In *Proceedings ISES Solar World Congress 2019*.

TracePro (2018). www.lambdares.com