

Estudio del impacto en la desalineación por desfase de ubicación y rotación en campos de heliostatos

Job Ordaz-Castillo ¹, Héctor Daniel García-Lara ^{1,*}, Abraham Andrade-Puente ² y José Dhair Arredondo-Hernandez ²

¹ Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE), Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

² Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

* Autor de correspondencia: hector.garcialra@uanl.edu.mx

Energía Solar (Modelado y simulación computacional)

Recibido: 27 de mayo de 2025

Aceptado: 22 de julio de 2025

Publicado: 24 de febrero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.460>

Resumen: Uno de los principales problemas en proyectos termosolares son las pérdidas de energía. Para mitigar estas pérdidas es necesario realizar una correcta instalación de los heliostatos. Estudios previos han demostrado que desplazamientos de pocos milímetros reducen la concentración solar en un 10-20 %. En el presente trabajo se realizó una simulación de desfase lineal y de rotación de campo. En la simulación de desfase lineal se prueba la sensibilidad que tienen los sistemas de concentración solar a los errores de posicionamiento en los ejes "X" e "Y". Se concluyó que el impacto del error es acumulativo en ambas direcciones, es decir, los errores combinados en ambos ejes intensifican aún más la disminución de la eficiencia. Mientras que los resultados de la simulación de rotación de campo confirman que la eficiencia de concentración en un campo de heliostatos es altamente sensible a la rotación del sistema. En pequeñas desviaciones no representan un problema crítico, pero conforme aumenta el valor de desviación comienza a reducir significativamente la eficiencia de captación de energía, generando pérdidas de hasta un 65% cuando la desviación supera los 2°. El estudio sugiere que es indispensable configurar estrategias de implementación y control que ayuden a mitigar los errores de desviación, asegurando de esta manera un óptimo desempeño de las plantas solares de torre central.

Palabras clave: heliostato, desalineación, eficiencia, energía solar, simulación, trazado de rayos

Study of the impact of misalignment due to positioning and rotation offset in heliostat fields

Abstract: One of the primary issues in solar thermal projects is energy loss, which impacts the overall performance of the system. To mitigate these losses, it's necessary to ensure the correct installation of heliostats. Previous studies have shown that displacements of just a few millimeters can reduce solar concentration by 10-20%. This study simulated both linear and field rotation misalignment. The linear misalignment simulation tested the sensitivity of solar concentration systems to position errors along the "X" and "Y" axes. It was concluded that the impact of these errors are cumulative in both directions; that is, combined errors in both axes further accelerate the decrease in efficiency. Meanwhile, the field rotation simulation confirmed that the concentration efficiency in a heliostat field is highly sensitive to system rotation. Small deviations don't pose a critical problem, but as the deviation value increases, the energy capture efficiency begins to decrease significantly, leading to losses of up to 65% when the deviation exceeds 2°. The study suggests that it is essential to implement setup and control strategies to help mitigate deviation errors, thereby ensuring optimal performance of central tower solar plants.

Keywords: heliostat, misalignment, efficiency, solar energy, simulation

Introducción

En una planta termosolar, para reflejar la radiación solar a un punto donde es necesario concentrarla, se utilizan heliostatos, los cuales son un conjunto de espejos o un solo espejo modular. Durante el funcionamiento de una planta termosolar, es probable tener pérdidas de energía, ocasionadas por la imprecisión del seguimiento, la gravedad y el viento. Según Mancini (2000), a medida que los errores se acumulan, estos pueden causar un desplazamiento de la imagen del heliostato, alejándose del punto de mira previsto con el tiempo.

En un estudio realizado por Jones y Stone (1999), examinaron y detallaron fuentes distintas de error en el seguimiento de los heliostatos en la planta Solar Two, entre estas se incluían la flexión debido a la gravedad, el desplazamiento de pivote y la refracción atmosférica, entre otros. Otros errores como el desplazamiento angular en la posición de referencia de los mecanismos de seguimiento, la nivelación imperfecta del pedestal del heliostato y la falta de

perpendicularidad entre los ejes de seguimiento fueron identificados por Díaz-Félix *et al.* (2014). Adicionalmente, Gross y Balz (2020) detectaron discrepancias entre sistemas de coordenadas provenientes de diferentes fuentes, así como errores generales de seguimiento, los cuales pueden afectar el desempeño de cualquier sistema solar que dependa de esta precisión.

En un estudio realizado por Freeman *et al.* (2014), se encontraron que entre los errores de mayor impacto se encuentran los errores ocasionados por una mala instalación y por fallos de los componentes.

La deriva en los campos de heliostatos se refiere a la desviación no intencionada de los espejos respecto a sus posiciones óptimas. Esta desviación puede deberse a distintos factores siendo los errores geométricos uno de los más críticos.

En este estudio, a partir de simulaciones en MATLAB y TracePro, se analizan la pérdida de eficiencia de concentración solar causada por errores de desfase o desviación de los campos de heliostatos para distintos valores de desalineación, que provocan disminución en la precisión del heliostato hacia el objetivo.

Materiales y Métodos

Metodología

Se diseñó un algoritmo y pseudocódigo de control idealizando un movimiento con 2 grados de libertad que se originan en el centro del espejo del heliostato. El análisis se implementó haciendo uso de MATLAB y TracePro en su totalidad.

Se propone un prototipo, del cual se caracterizan a detalle sus dimensiones y mecanismos en la Figura 1. Las dimensiones mencionadas fueron documentadas a precisión con el fin de usarse en el modelado y simulación (Tabla 1).

Se estableció un sistema de referencia ubicado en el objetivo a nivel del suelo a partir del cual se miden las distancias de cada uno de los elementos (espejos), de este modo se determinó la distancia del prototipo al objetivo (receptor) y las dimensiones de este (0.5 x 0.65 m), dándole una posición de 2 metros de altura a partir del origen.

Configuración y diseño del campo de heliostatos

En un código de MATLAB, se diseñó un campo de heliostatos de una configuración cuadrada de 3x3, es decir, 9 heliostatos en total como se muestra en la Figura 2. La elección de esta configuración de campo de heliostatos de 3x3 se realizó con el propósito de ejemplificar de forma general la tendencia del impacto de los errores de desfase y rotación en la eficiencia, sirviendo como un modelo representativo para observar estas dinámicas. Es importante señalar que este estudio no se enfoca en la optimización o el análisis de las variables específicas del tamaño o la distribución del campo, sino en la sensibilidad del sistema ante desalineaciones.

Se aplicó un algoritmo de seguimiento que utiliza datos externos de la posición del sol correspondientes al día 21 de cada mes durante el año 2024 con incrementos de tiempo de 5 minutos, que se obtienen de datos georreferenciados

Tabla 1. Dimensiones del prototipo físico para la simulación

ARTICULACIÓN	LONGITUD
BASE-EJE	250 mm
EJE-ESPEJO	150 mm

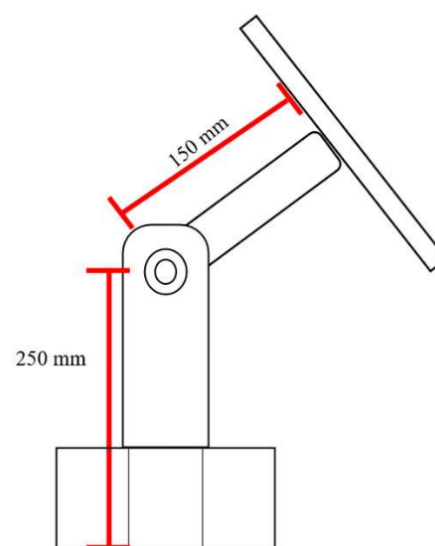


Figura 1. Dimensiones del heliostato

del lugar propuesto. El algoritmo calcula los ángulos para cada heliostato para que estos redirijan los rayos solares hacia el receptor predeterminado.

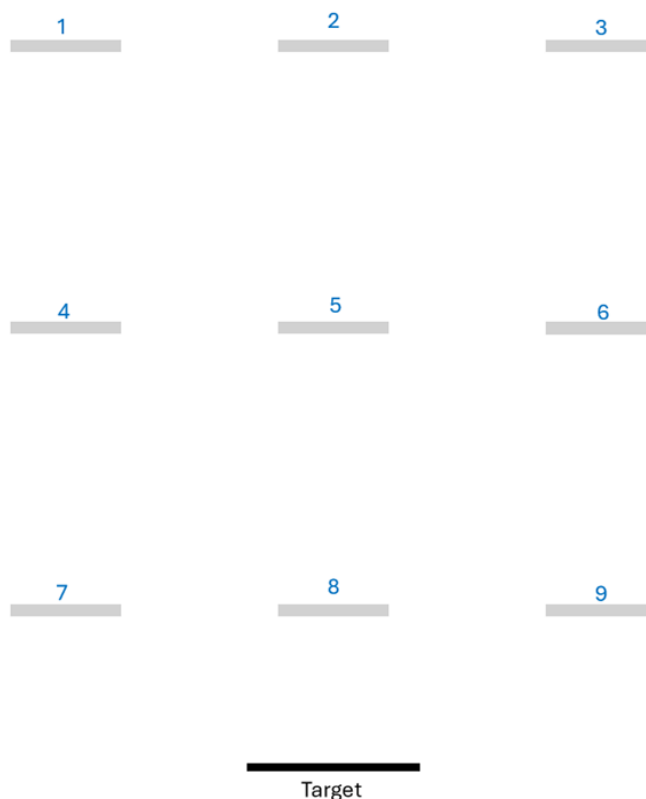


Figura 2. Diagrama representativo de la distribución del campo

Desfase de Campo 3x3

El desfase en un campo de heliostatos se refiere a la desviación de cada espejo respecto a la posición del diseño original. Este desfase es un error causado por varios factores como la inexactitud en la instalación, una incorrecta alineación inicial o diversos errores humanos de implementación. Se pretende analizar cómo estos desfases afectan la eficiencia de concentración de rayos solares sobre el receptor, con especial enfoque en el derrame de energía. Definiendo derrame de energía como pérdidas de concentración en el flujo energético que se dirigen al objetivo.

Con el objetivo de evaluar el impacto provocado por el desfase, se realizaron simulaciones en MATLAB y TracePro considerando el campo 3x3 mencionando con anterioridad. Esta vez se agregaron errores en las coordenadas de cada heliostato respecto a su ubicación original en el diseño, se varían los desplazamientos en un rango de 0 a 1000mm, específicamente usando los valores mencionados a continuación :

- Desplazamiento en eje X: 0,10,20,30,40,50,100,250,500,750,1000 mm.
- Desplazamiento en eje Y: 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50,100, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 750, 1000 mm.

En cada simulación se mantuvieron constantes el algoritmo de seguimiento, los parámetros de radiación solar, posición del receptor y condiciones de reflexión del espejo, de esta manera, se observa exclusivamente el efecto del desfase en la eficiencia de concentración.

Rotación de Campo 3x3

La rotación involuntaria del campo de heliostatos puede ocurrir debido a diversos factores como las imprecisiones en la calibración de la estructura de montaje o deformaciones mecánicas que afectan la orientación global del conjunto de heliostatos.

Para evaluar el efecto de rotación de campo sobre la eficiencia de concentración de rayos solares, se realizaron simulaciones en MATLAB y TracePro aplicando un giro uniforme en cada uno de los heliostatos:

- Ángulos de rotación: -2.25°, -2.00°, -1.75°, -1.50°, -1.25°, -1.00°, -0.75°, -0.50°, -0.25°, 0°, 0.25°, 0.50°, 0.75°, 1.00°, 1.25°, 1.50°, 1.75°, 2.00°, 2.25°.

Se realizó la simulación de la respuesta del campo en los mismos instantes del día y demás parámetros que la simulación de la sección anterior, manteniendo constantes posición del objetivo y condiciones de radiación. Igual que con la sección anterior, se evalúan el flujo energético y la eficiencia de concentración en cada caso, esta vez causada por la desalineación progresiva del campo.

Eficiencia normalizada

Se define la eficiencia normalizada del sistema como la energía captada por el receptor en un campo con desalineaciones dividida por la energía captada por el receptor en campo con implementación ideal. Es decir, el escenario con eficiencia máxima atribuida específicamente a este factor de pérdida y sin tomar en cuenta otros factores que perjudican al sistema.

$$\eta = \frac{E_s}{E_i} \quad (1)$$

Donde: η es la eficiencia normalizada de concentración; E_s es la energía captada por el receptor en un campo con desalineaciones; E_i es la energía captada por el receptor en campo con implementación ideal.

Resultados y Discusión

Simulación de desfase lineal de campo 3x3

Para los resultados de este apartado, se analizaron los datos del flujo energético incidente en el receptor en cada caso, identificando pérdidas de concentración en forma de desbordamiento en el receptor.

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en MATLAB y TracePro de la sección de desfase lineal permiten evaluar el impacto de los errores en la eficiencia del campo. En esta sección, se analizaron desplazamientos desde el origen en los ejes X y Y, variando las posiciones de los heliostatos. El objetivo es evaluar como dichos desplazamientos afectan a la eficiencia normalizada de concentración (η) como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Eficiencia normalizada en función del desfase en "X" y "Y"

X, Y (mm)	0	10	20	30	40	50	100	250	500	1000
0	1.0000	0.9997	0.9946	0.9885	0.9807	0.9710	0.9247	0.7596	0.4808	0.2955
50	0.9929	0.9900	0.9879	0.9813	0.9728	0.9612	0.9084	0.7484	0.4784	0.2998
100	0.9638	0.9539	0.9575	0.9540	0.9499	0.9439	0.8861	0.7201	0.4807	0.3127
200	0.7001	0.6957	0.6958	0.6939	0.6941	0.6921	0.6690	0.5574	0.4214	0.3106
250	0.5130	0.5125	0.5132	0.5122	0.5122	0.5135	0.5110	0.4480	0.3659	0.2819
300	0.3243	0.3259	0.3298	0.3348	0.3342	0.3351	0.3468	0.3409	0.3070	0.2497
350	0.1657	0.1675	0.1696	0.1733	0.1732	0.1790	0.2000	0.2525	0.2435	0.2328
400	0.0565	0.0595	0.0643	0.0687	0.0719	0.0758	0.1116	0.1851	0.1999	0.2234
500	0.0110	0.0125	0.0149	0.0189	0.0234	0.0290	0.0507	0.1216	0.1318	0.1980
750	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	0.0600	0.0283	0.1217
1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0069	0.0423	0.0238

Los resultados muestran que la eficiencia normalizada se mantiene por encima de 0.95 para desplazamientos menores a 50 mm en cualquier eje, lo que sugiere que pequeños errores de instalación no afectan significativamente el rendimiento del sistema.

A partir de los 100 mm, la eficiencia cae por debajo de 0.75 en la mayoría de los casos, siendo más sensible el eje Y. En particular, desplazamientos superiores a 250 mm provocan una caída abrupta, llegando a valores cercanos al 0.5, y a partir de 500 mm, el sistema pierde más del 60% de su capacidad de concentración.

En el escenario más extremo (1000 mm), la eficiencia se aproxima a cero, indicando que la radiación reflejada no impacta en el receptor de forma efectiva. Estas tendencias reflejan una alta sensibilidad del sistema a errores acumulados de instalación, y refuerzan la necesidad de estrategias precisas de alineación desde la etapa de montaje. Con el objetivo de mostrar los resultados de manera visual, se proporcionará una gráfica del impacto del desfase de la eficiencia (Figura 3).

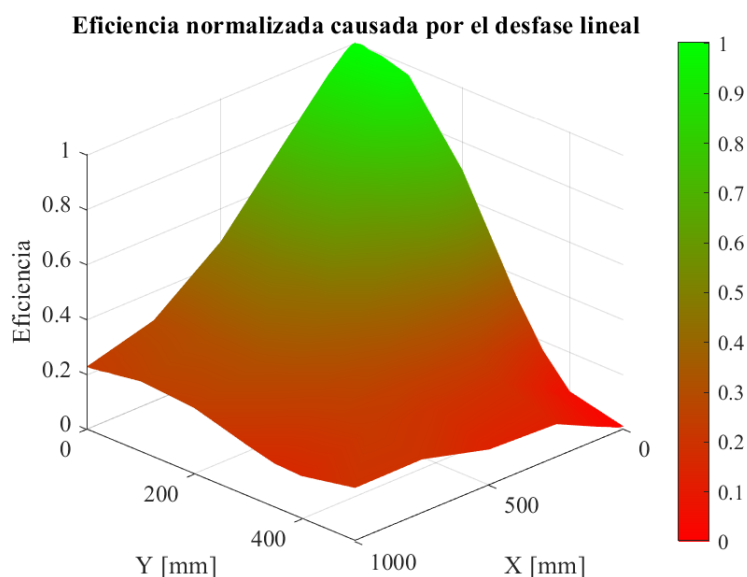


Figura 3. Resultados obtenidos en la simulación de desplazamiento lineal del campo 3X3

Pueden identificarse los siguientes patrones:

- Mapa de eficiencia en función del desfase en "X": A medida que el desplazamiento de desfase aumenta en el eje "X", se observa como la se aleja de valores altos (verde) a valores bajos (rojo), destacando una caída considerable a partir de los 250 mm.
- Mapa de eficiencia en función del desfase en "Y": el comportamiento es similar al desfase en el eje "X", la disminución de la eficiencia es muy gradual, la caída de eficiencia es más evidente en valores de desplazamiento mayores a 300 mm en "Y".
- Mapa tridimensional de eficiencia (X e Y): Se observa en el punto central (X = 0, Y = 0) una región de máxima eficiencia, esta región se reduce de manera simétrica a medida que el desfase aumenta su desplazamiento en cualquier dirección. En las regiones donde "X" y "Y" superan los 500 mm de desplazamiento se les considera zonas de baja eficiencia (Figura 4).

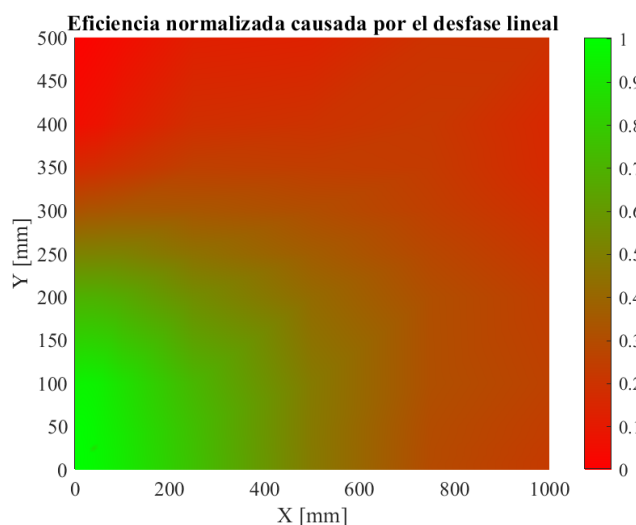


Figura 4. Resultados obtenidos en la simulación de desplazamiento lineal del campo 3X3

Simulación de rotación de campo 3x3

En la Tabla 3, se muestran los resultados obtenidos de la simulación que se realizó en MATLAB y TracePro, estos datos demuestran la relación entre la eficiencia de concentración solar y la rotación del campo de heliostatos. La eficiencia (η) es máxima cuando la rotación en el azimut del campo es de 0° , la eficiencia disminuye conforme el campo se inclina en cualquiera de las direcciones, ya sea positiva o negativa.

Se entiende por azimut ángulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo. (REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, n.d.)

Tabla 3. Valores de azimut (Az), energía total (E Tot), eficiencia (η) y número de rayos (#Rayos)

Az	E Tot [W]	η	#Rayos
-2.25	15.128	0.3513	186624
-2.0	17.543	0.4073	186624
-1.75	20.72	0.4811	186624
-1.5	24.83	0.5765	186624
-1.25	29.48	0.6845	186624
-1.0	34.257	0.7954	186624
-0.75	38.382	0.8912	186624
-0.5	41.365	0.9605	186624
-0.25	42.827	0.9944	186624
0.0	43.067	1.0	186624
0.25	43.058	0.9998	186624
0.25	43.058	0.9998	186624
0.5	41.612	0.9662	186624
0.75	38.775	0.9003	186624
1.0	34.37	0.7981	186624
1.25	29.47	0.6843	186624
1.5	24.813	0.5761	186624
1.75	20.69	0.4804	186624
2.0	17.638	0.4095	186624
2.25	15.117	0.351	186624

Los resultados se muestran visualmente en la Figura 5, que corresponde a una gráfica en forma de campana donde el punto de máxima eficiencia ocurre cuando la rotación es de 0° . Solo cuando la energía solar reflejada por los heliostatos es dirigida con la máxima precisión hacia el objetivo, se muestra la eficiencia más alta. Cuando el campo de heliostatos disminuye su precisión hacia el objetivo, también disminuye la eficiencia debido a la pérdida de alineación óptica en la reflexión de la radiación solar.

Para rotaciones menores a $\pm 0.5^\circ$, la eficiencia se mantiene alta ($\eta \approx 0.96$), este resultado indica que pequeñas desviaciones no alteran significativamente el rendimiento del sistema.

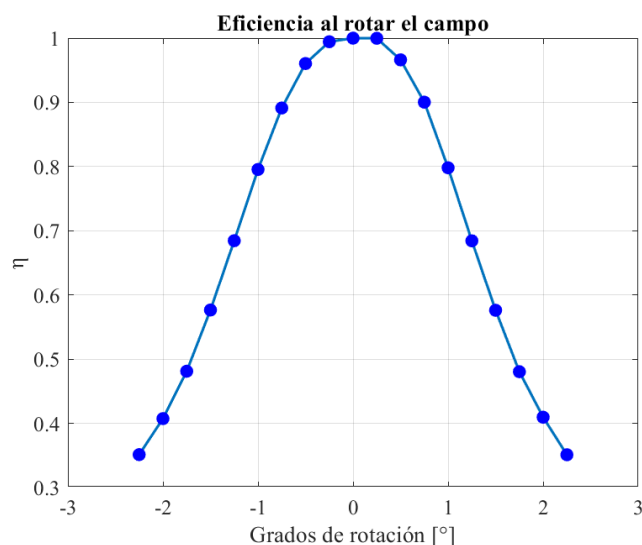


Figura 5. Resultados obtenidos en la simulación de rotación del campo 3X3

A $\pm 1^\circ$ de rotación, la eficiencia cae aproximadamente un 20%, alcanzando valores cercanos a $\eta = 0.80$, lo que indica que entre mayor sea la desviación la pérdida de rendimiento es cada vez mayor.

Cuando las desviaciones son de $\pm 2^\circ$ o superiores, la eficiencia disminuye hasta por debajo del 50% y por debajo del 35% para cuando la desviación es de $\pm 2.25^\circ$ o mayor de rotación, evidenciando pérdidas significativas en la concentración de energía

Conclusiones

En el análisis de los resultados de la simulación de desfase lineal se demuestra la sensibilidad que tienen los sistemas de concentración solar a los errores de posicionamiento en los ejes X y Y. Las pérdidas de eficiencia son despreciables para errores menores a 50 mm. Sin embargo, cuando el error es superior a los 100 mm la eficiencia se ve comprometida de manera significativa. En los casos donde los errores de posicionamiento alcanzan los 500 mm la eficiencia presenta una caída drástica, lo que demuestra que en estos escenarios la radiación reflejada no impacta correctamente en el receptor.

Las gráficas tridimensionales muestran que el impacto del error es acumulativo en ambas direcciones (X e Y), es decir, cuando se presentan errores combinados en ambos ejes aceleran aún más la disminución de la eficiencia. Los resultados obtenidos demuestran la necesidad de procedimientos de calibración rigurosos al momento de instalar y dar mantenimiento a un campo de heliostatos.

Los análisis realizados en la simulación de rotación de campo confirman que la eficiencia de concentración en un campo de heliostatos es altamente sensible a la rotación del sistema. En pequeñas desviaciones de hasta 0.5° no representan un problema crítico, pero conforme aumenta el valor de desviación comienza a reducir significativamente la eficiencia de captación de energía, llegando a generar pérdidas de hasta un 65% cuando la desviación supera los 2° .

Esto nos sugiere que es indispensable implementar estrategias de control y mantenimiento ayuden a mitigar los errores de desviación, asegurando de esta manera un óptimo desempeño de las plantas solares de torre central

Agradecimientos y financiamiento: Los autores agradecen al Programa de Apoyo a la Ciencia, Tecnología e Innovación PROACTI de la Universidad Autónoma de Nuevo León por el soporte financiero del proyecto 92-IDT-2024

Bibliografía

- Díaz-Félix, L., Escobar-Toledo, M., Waissman, J., Pitalúa-Díaz, N., & Arancibia-Bulnes, C. (2014). Evaluation of Heliostat Field Global Tracking Error Distributions by Monte Carlo Simulations. *Energy Procedia*, 49, 1308–1317. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.140>
- Freeman, J., Kiranlal, E., & Rajasree, S. (2014). Study of the errors influencing heliostats for calibration and control system design. *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014)*, 1–8. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2014.6909113>
- Gross, F., & Balz, M. (2020). Potentially confusing coordinate systems for solar tower plants. *SOLARPACES 2019: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*, 2303. AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0028942>
- Jones, S., & Stone, K. (1999). Analysis of solar two heliostat tracking error sources. *ASME International Solar Energy Conference*. ASME.
- Mancini, T. (2000). *Catalog of solar heliostats*. IEA-Solar Power and Chemical Energy Systems, Köln.
- Real Academia Española. (s.f.). *Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 26 de mayo de 2025 de <https://dle.rae.es/acimut?m=form>