



HELIÓSTATOS: CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE UN SISTEMA CSP DESARROLLADO EN COLOMBIA

Jhojan Stiwén Galeano Gómez.
Jhojan.galeano742@pascualbravo.edu.co

Asesor:
Yuhan Arley Lenis Rodas.

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
Facultad de Ingeniería
Departamento de Mecánica
Ingeniería Mecánica.
11/06/2024

Tradición - Transformación - Innovación



SC 7134-1



Resolución 012512 del MEN. 29 de junio de 2022 - 6 años.
Calle 73 No. 73A - 226, Vía El Volador
Apartado aéreo: 6564 / Línea única de atención: 604 448 0520 / Medellín - Colombia



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Marco teórico	4
1.2	Estado de arte	6
2	OBJETIVOS.....	9
2.1	Objetivo general	9
2.2	Objetivos específicos	9
3	METODOLOGÍA	10
4	RESULTADOS	16
4.1	Rastreamiento solar	16
4.2	Caracterización energética.....	24
4.3	Simulación por trazado de rayos	31
5	CONCLUSIONES	42
6	BIBLIOGRAFÍA.....	43

1 INTRODUCCIÓN

Las energías no renovables, a pesar de su papel crucial en el desarrollo industrial y económico, conllevan consigo una serie de problemáticas ambientales y sociales. Estas, abarcan desde la emisión de gases de efecto invernadero y la alteración de ecosistemas, hasta la generación de residuos tóxicos y agotamiento de recursos no renovables, como el petróleo y el gas natural [1]. Estos asuntos deben ser analizados detenidamente, antes de cualquier implementación tecnológica, pues la preocupación latente relacionada con la seguridad energética que obliga a la transición hacia fuentes energéticas sostenibles, podría ocasionar que se termine causando un impacto ambiental superior al que se busca evitar al transitar hacia estas fuentes sostenibles.

Entre las fuentes renovables exploradas, la energía solar se destaca por tener un gran potencial debido a su disponibilidad en prácticamente cualquier lugar del planeta. Aunque los sistemas más comunes para el aprovechamiento de este recurso, son los sistemas solares fotovoltaicos para generación de electricidad, la radiación solar también se puede convertir en calor, para suplir la demanda de procesos tanto domésticos como industriales.

La importancia de la energía solar radica en su capacidad para proporcionar una fuente de energía sostenible y limpia. A diferencia de los combustibles fósiles, la energía solar no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni otros contaminantes de forma directa, lo que la convierte en una importante opción para mitigar el cambio climático y mejorar la calidad del aire. Además, la energía solar contribuye a la independencia energética de los países, reduciendo la dependencia de las importaciones de combustibles fósiles y fomentando el desarrollo de tecnologías locales [2].

Como se mencionó, las aplicaciones de la energía solar son diversas y abarcan desde la generación de electricidad en grandes plantas solares hasta el calentamiento de agua en sistemas domésticos. La energía solar también se utiliza en la iluminación de calles y parques, así como en zonas rurales sin acceso a la red eléctrica, proporcionando una fuente de energía confiable y asequible.

A pesar de sus múltiples beneficios, la energía solar enfrenta desafíos como la intermitencia, ya que la producción de energía varía según las condiciones climáticas y la hora del día. Además, los costos iniciales de instalación pueden ser altos, aunque estos se han disminuido significativamente en los últimos años.

Considerando el amplio potencial que tiene el uso del recurso solar, en este trabajo se explora la caracterización de un sistema solar térmico por concentración, en el que se aprovecha el recurso solar para el calentamiento de agua, empleando dispositivos de bajo costo. A continuación, se describen algunos conceptos útiles para el análisis de este trabajo y posteriormente se presenta la revisión del estado del arte.

1.1 Marco teórico

El aprovechamiento de la energía solar se da principalmente en dos tecnologías: la fotovoltaica y la energía solar de concentración. La tecnología fotovoltaica convierte la luz solar directamente en electricidad a través de células solares hechas de materiales semiconductores como el silicio [3]. Estas células generan electricidad mediante el efecto fotovoltaico, donde la luz solar excita a los electrones, creando una corriente eléctrica.

Por otro lado, la energía solar por concentración (CSP, por sus siglas en inglés) utiliza la radiación solar para calentar un fluido, que puede ser agua, aceite especializado o sales. Este calor se puede utilizar directamente para purificar, calefacción o para generar electricidad en plantas termosolares a través de turbinas de vapor [4].

Las energías de concentración solar se basan en la captura y focalización de la radiación solar mediante sistemas de concentración. Estos sistemas utilizan espejos o lentes para enfocar la radiación solar en un punto, aumentando considerablemente su temperatura, lo que permite una mayor eficiencia en la conversión de la energía solar en electricidad.

Existen varios tipos de tecnologías de concentración solar, cuyo diseño depende de los procesos ópticos para la captación de energía y el uso final del calor obtenido. El propósito de estas tecnologías es incrementar el flujo de radiación solar sobre los receptores diseñados para absorberla eficientemente. El calor captado se transfiere a un fluido caloportador, que puede alcanzar temperaturas entre 250°C y 2000°C. Estas tecnologías se clasifican en los siguientes cuatro sistemas principales [5]:

- **Sistemas de Torre Central:** utilizan numerosos heliostatos para concentrar la luz solar en un receptor situado en lo alto de una torre central. El receptor calienta un fluido, que puede ser aire, agua, sales fundidas o aceite térmico, para generar vapor y producir electricidad en una máquina térmica.

- Sistemas cilindro - parabólicos: emplean espejos en forma de canal parabólico para enfocar la luz solar en un tubo receptor. El tubo contiene un fluido de transferencia de calor que se calienta y se usa para generar vapor y electricidad.
- Sistemas de Fresnel Lineal (Fresnel): utilizan filas de espejos planos o ligeramente curvados para concentrar la luz solar en un receptor fijo. El fluido calentado en el receptor genera vapor que se emplea en la producción de electricidad.
- Sistemas de Disco Parabólico: consisten en un reflector parabólico en forma de plato que concentra la luz solar en un receptor en el punto focal. Este sistema, acoplado a un motor Stirling o microturbina, convierte el calor en electricidad con alta eficiencia.

Cada uno de estos sistemas está diseñado para maximizar la captación de radiación solar y su conversión en energía térmica y eléctrica, adaptándose a distintas aplicaciones y escalas de operación (ver Figura 1) [5].

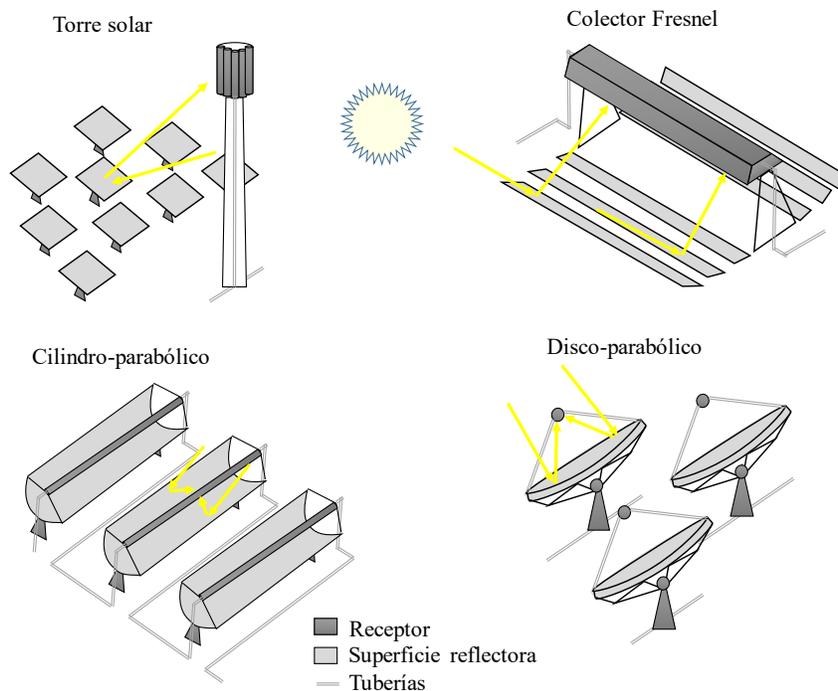


Figura 1. Principales Tecnologías CSP

Los siguientes conceptos ayudan a comprender el funcionamiento de los sistemas solares térmicos por concentración:

- CSP: La Energía Solar de Concentración es la columna vertebral de este estudio, marcando la transición hacia una energía más sostenible.
- Helióstatos: Estos dispositivos, encargados de dirigir la radiación solar, son el enfoque central de nuestra investigación.
- Eficiencia Energética: Un término que resuena en el corazón de la problemática, buscando maximizar la conversión de la radiación solar en electricidad.

1.2 Estado de arte

La energía solar de concentración, ha sido un tema de interés creciente en la búsqueda de fuentes renovables y sostenibles de energía. Los heliostatos, que hacen parte de la llamada tecnología de torre central, han demostrado ser una tecnología efectiva para concentrar la energía solar y generar calor. Sin embargo, la precisión y eficiencia de estos dispositivos dependen en gran medida de su capacidad para seguir el movimiento del sol y mantener una orientación óptima. En este sentido, la caracterización de cada los heliostato, resulta ser una actividad crucial en el camino de mejora de la eficiencia de la tecnología [6] [7].

Los heliostatos están conformados por facetas, permitiendo que un conjunto de espejos se mueva de manera coordinada durante el transcurso del día. Estas facetas son espejos casi planos que requieren una leve curvatura para lograr que el foco solar sea más preciso que el de un espejo completamente plano [5].

Como se menciona en [8], los sistemas solares térmicos demandan un seguimiento solar preciso para optimizar su eficiencia y rendimiento. En este contexto, es crucial implementar un algoritmo de alta precisión que garantice un bajo porcentaje de error. Entre los algoritmos desarrollados para este propósito se destaca el de NREL, el cual mejora significativamente la operación al calcular el azimut solar [8]. Es importante señalar que dicho algoritmo ha experimentado mejoras adicionales para mantener su efectividad en el periodo comprendido entre los años 2020 y 2050 [9].

En la actualidad, existen dos métodos de seguimiento solar del helióstato: aquellos que utilizan el método de azimut y elevación (AE) y los que se basan en el método de rotación y elevación (SE). Independientemente del método utilizado, todos los helióstatos comparten características fundamentales que los definen. Consta típicamente de dos ejes de rotación (azimut y elevación), así como espejos, mecanismos de control y sistemas de sujeción [10].

A nivel mundial la capacidad de energía solar instalada ha aumentado en un 25% en el 2022 con respecto al 2021, llegando a casi 1200 GW de capacidad, de los cuales 6.3 GW pertenecen a los sistemas CSP, lo anterior representa un crecimiento del 152% de los sistemas CSP con respecto al año 2012. España es el país con mayor capacidad instalada de CSP a nivel mundial, con 2.3 GW, sin embargo, los países que más capacidad instalaron del 2021 al 2022 fueron China y Emiratos Árabes Unidos [11].

En América sur y centro, se encuentran muy pocos registros de investigaciones sobre estas tecnologías, sin embargo, en países como México se avanza en esta área como lo demuestra [6], donde se incorporan pruebas de seguimiento solar con ayuda de algoritmos y cámaras, que sirven para realizar en canteo del heliostato y registrar vibraciones en la estructura. Allí, utilizan LabVIEW y sistemas de adquisición de datos para el control del sistema. También, se han registrado estudios en universidades de México que incorporan metodologías numéricas para evaluar el funcionamiento de los sistemas CSP, determinando la configuración ideal con 7, 4 o 1 facetas para cada heliostato [12].

Al igual que en la mayoría de los países del mundo, en Colombia se tiene poca evidencia documentada de investigaciones similares que involucren sistemas de CSP, siendo un campo muy amplio por explorar. A pesar de esto, se han registrado simulaciones de estos sistemas para zonas específicas de Colombia. Un estudio publicado en [13] evalúa un sistema CSP en el departamento del Magdalena, determinando que una planta CSP en esta zona puede tener una capacidad eléctrica de 88 MW y operar durante 5 horas sin influencia directa del sol, gracias a su capacidad de almacenamiento térmico. Esto es posible debido a la radiación solar diaria promedio de aproximadamente 5.28 kWh/m² [13]. Esta radiación es respaldada en [14], que muestra que la zona atlántica de Colombia tiene un promedio anual de radiación solar entre 5 y 6 kWh/m², haciendo que esta región sea ideal para el avance de proyectos que involucren la energía solar como principal fuente energética.

Considerando lo anterior, y partiendo de los estudios previos desarrollados en la I.U. Pascual Bravo, este trabajo abordó la caracterización energética de un helióstato

de un sistema CSP, explorando el desarrollo de los mismos como una respuesta urgente para la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. La problemática central de este estudio radica en la necesidad de optimizar la eficiencia de estos dispositivos, maximizando así la captación de energía solar y su conversión en energía térmica, energía eléctrica, entre otras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad de concentración y transmisión de energía solar de un heliostato de bajo costo desarrollado en Colombia, mediante un análisis de primera ley aplicado al receptor del sistema termosolar.

2.2 Objetivos específicos

- Implementar un sistema de seguimiento solar en dos ejes aplicable a un heliostato mediante seguimiento acimutal y de elevación buscando optimizar la eficiencia del sistema de concentración considerando sistemas de bajo costo.
- Analizar energéticamente el sistema de concentración solar, considerando como interacciones la radiación incidente y la capacidad de calentamiento de agua, identificando posibles pérdidas y áreas de mejora en la eficiencia del sistema.
- Simular el proceso de concentración solar mediante el método de trazado de rayos de Montecarlo buscando definir la estrategia de focalización del sistema que conduce a la mayor eficiencia a lo largo del día.

3 METODOLOGÍA

Con el objetivo de evaluar el potencial energético del sistema de concentración solar tipo heliostato, en trabajos previos se desarrolló un prototipo a escala real, considerando una potencia de concentración cercana a 1 kWh. El heliostato en cuestión se compone de una sólida estructura metálica diseñada para soportar 7 paneles hexagonales - facetas (ver figura 2). La estructura metálica no solo proporciona estabilidad y resistencia, sino que también facilita la óptima disposición de los espejos hexagonales, maximizando así la captación de energía solar. Aunque el heliostato fue desarrollado previamente, se destaca que el mismo, no disponía de la estrategia para el rastreamiento solar, y es desde allí que inicia el presente estudio.

El heliostato implementado en estudios anteriores no solo busca destacarse en términos de diseño, sino que también representa un enfoque integral para la implementación de tecnologías sostenibles usando materiales y sistemas disponibles localmente. La combinación de elementos estructurales robustos, paneles hexagonales estratégicamente posicionados y un algoritmo de rastreo solar avanzado, junto con el uso de materiales y sistemas de bajo costo, son algunos de los principales rasgos característicos de la tecnología.

El desarrollo del presente estudio, consideró tres fases metodológicas alineadas con los objetivos específicos. La descripción de cada fase se presenta a continuación:



Figura 2. Heliostato disponible para el proyecto

- **Fase 1. Sistema de rastreamiento y seguimiento solar.** Para asegurar un seguimiento solar preciso en dos ejes, el heliostato se equipa con el algoritmo solar que proporcionará seguimiento en tiempo real. Este algoritmo calcula la posición actual del sol, permitiendo ajustar dinámicamente el ángulo del heliostato para mantener una orientación óptima hacia el receptor. La implementación de un algoritmo de control es fundamental para garantizar un seguimiento continuo del sol a lo largo del día.

Este algoritmo considera variables como la hora, el día, la latitud y la longitud geográfica, con lo que se calcula constantemente el posicionamiento del heliostato para maximizar la focalización de la radiación solar. La retroalimentación en tiempo real y el ajuste dinámico del ángulo no solo mejorarán la eficiencia del heliostato, sino que también lo adaptarán de manera precisa a las variaciones en la posición solar, asegurando un rendimiento óptimo en términos de concentración solar y producción de energía.

La información recopilada es vital para comprender la variabilidad de la radiación a lo largo del día y la reflexión del heliostato de manera eficiente a estas fluctuaciones. Para facilitar la recolección y registro de datos, se implementa un sistema de adquisición de datos. Este sistema permite registrar la radiación solar en intervalos regulares, generando un conjunto de datos completo que refleja la dinámica diaria de la radiación incidente.

Para el cálculo del lugar al que debe dirigirse la normal del heliostato con el fin de direccionar la radiación a un objetivo previamente definido, se hace uso de geometría de vectores. Inicialmente se define el vector solar con ayuda del algoritmo de cálculo de posición solar (ver figura 3). Este arroja como resultado los componentes unitarios de dicho vector. El vector del objetivo se define considerando el mismo sistema de coordenadas, y también se expresa en términos de los componentes del vector unitario. La suma de los vectores unitarios de posición solar y del objetivo, permiten definir el vector de posicionamiento del heliostato, es decir, la dirección a la que debe apuntar el vector normal al área de apertura del heliostato con el fin de llevar la radiación solar al punto deseado.

```

MathScript Node
1 %% Código posicion solar - Matlab-labview
2 % Create Time-stamp vector in the format [Year, Month, Day, Hour, Minute, Second]
3 %year=2023;month=10;day=30;
4 %hour=12;min=0;sec=0;
5 %UTC=-5;
6 TS = [year, month, day, hour-UTC, min, sec];
7 %Lat = 6.2745256; % [degrees]
8 %Long = -75.5871645; % [degrees]
9 % Author: A. Bonanos, May 2020, abonanos@gmail.com
10 %
11 % For algorithm details see: , M.J. Blanco, K. Milidonis, A.M. Bonanos,
12 % "Updating the PSA Sun Position Algorithm", Solar Energy, 2020.
13 %
14 % Function to evaluate PSA+ algorithm for evaluating the solar vector.
15 % Default coefficients are valid for predicting the true solar vector
  
```

Figura 3. Entradas del cálculo del vector de posición solar

- Fase 2. Caracterización energética.** Para la caracterización energética del sistema, se direccionó la radiación solar sobre un receptor por el que se hacía circular agua. El sistema completo, cuenta con medición de radiación mediante piranómetro, sensores de temperatura de entrada y salida de agua y un sistema de adquisición de datos para todas las variables. Con esto se logra una comprensión detallada de la disponibilidad de radiación solar y de la energía que alcanza el receptor del sistema. Esta información es la base fundamental para el análisis energético del sistema de concentración solar, contribuyendo así a la optimización del rendimiento del heliostato.

El proceso de análisis energético comienza con el desarrollo de un modelo termodinámico de diagnóstico, que establece la relación entre la radiación

solar incidente y el cambio de temperatura resultante del agua calentada. Este modelo es crucial para comprender cómo la energía solar capturada impacta directamente en el sistema térmico del receptor. Para ello, es necesario determinar el área real de incidencia en el helióstato, ya que el área total del helióstato no corresponde al área de incidencia efectiva.

Partiendo de los vectores unitarios y sus direcciones, tanto del vector solar como del vector del de posicionamiento, se logra establecer el área por la que incide la radiación solar sobre el helióstato. Esta área, multiplicada por la irradiación medida con ayuda del piranómetro adecuado con un sistema de sombra (Figura 4), permite calcular la energía que ingresa al sistema heliostato-receptor.



Figura 4. Piranómetro

Para la energía concentrada, como se mencionó, se hace uso de la primera ley de la termodinámica aplicada en el receptor. El esquema del sistema usado para caracterización, se presenta en la figura 5, y la figura 6 presenta una fotografía real.

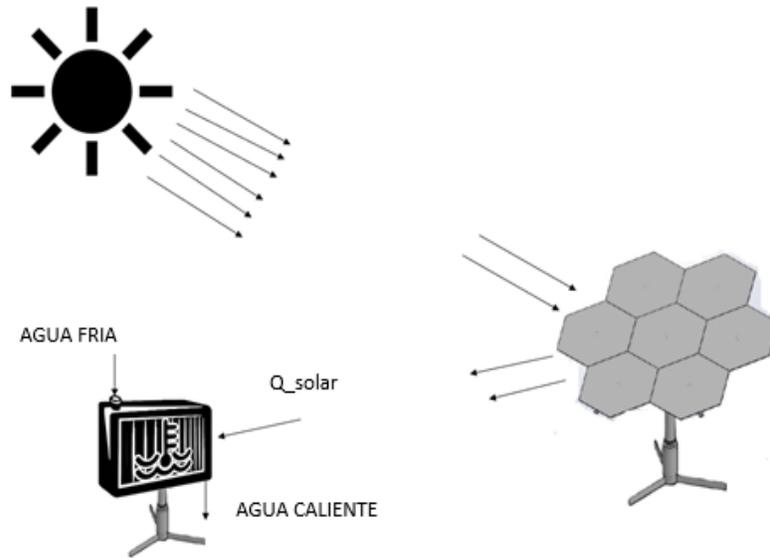


Figura 5. Esquema de sistema caracterizado



Figura 6. Foto general del Montaje experimental

Para validar los resultados teóricos, se llevan a cabo pruebas experimentales. Estas pruebas no sólo respaldaron la precisión del modelo termodinámico, sino que también permiten ajustes necesarios para mejorar la eficiencia del heliostato en la práctica. Este enfoque garantiza una evaluación completa del rendimiento energético del sistema de concentración solar. La eficiencia del sistema será cuantificada mediante el cálculo de la relación entre la energía solar concentrada y la energía transferida al agua.

- Fase 3 simulación.** Para esta etapa se emplea el método de trazado de rayos de Montecarlo, haciendo uso del programa Tonatiuh (de CENER - Centro Nacional de Energías Renovables). Se definen parámetros cruciales, como la reflectividad de los paneles, la geometría del heliostato y la posición solar, para simular de manera detallada el proceso de concentración solar. La estrategia de focalización se perfecciona mediante la ejecución de múltiples simulaciones, variando sistemáticamente los parámetros del sistema.

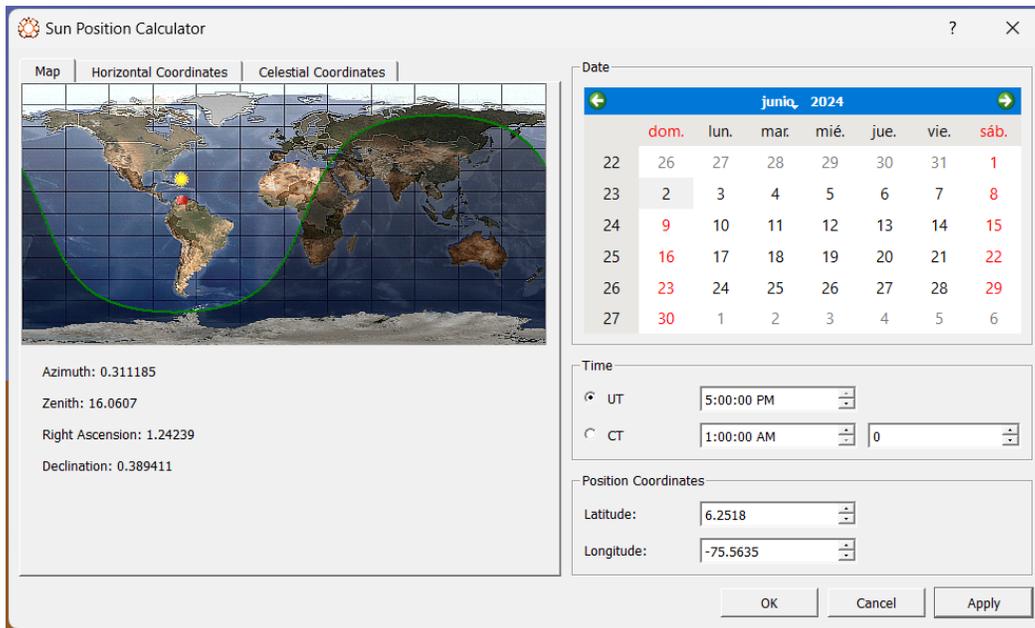


Figura 7. Geolocalización de posición solar - Tonatiuh

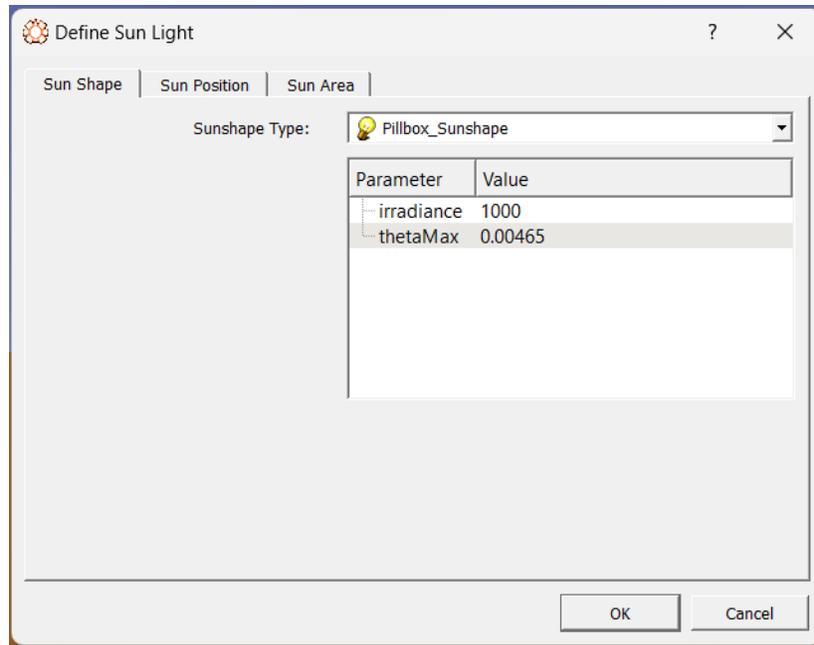


Figura 8. Configuración del sol, Tonatiuh.

La aplicación de software especializado permitirá simular de manera precisa el comportamiento térmico del sistema, considerando diversas condiciones de radiación solar y proporcionando una visión detallada de su rendimiento.

4 RESULTADOS

A continuación, se presentan los principales resultados del presente proyecto. Inicialmente se presentan detalles de la implementación del sistema de rastreamiento, posteriormente se presenta la caracterización y finalmente los resultados de la simulación.

4.1 Rastreamiento solar

Inicialmente se define los vectores unitarios en la dirección del sol y del receptor como se muestra a continuación.

- Vector del sol: determinado con ayuda del algoritmo de posición solar

La dirección del vector V se define tanto por sus componentes unitarios como por el ángulo θ que forma con el eje "z" y el ángulo ϕ que forma la proyección del vector V con el eje "y". El vector se descompone en una componente vertical en el eje z y

otra componente horizontal en el plano x-y; mostrada en la figura 9. Como resultado matemático de estas dos componentes tenemos.

$$V_z = V \cos \theta \quad (1) \quad y \quad V_h = V \sin \theta \quad (2)$$

Luego se descompone V_h en sus dos componentes rectangulares V_x y V_y en sus respectivos ejes. De esa manera se obtiene las siguientes expresiones para cada una de sus componentes.

$$V_y = V_h \cos \phi = V \sin \theta \cos \phi \quad (3) \quad y \quad V_x = V_h \sin \phi = V \sin \theta \sin \phi \quad (4)$$

Por último, definimos los vectores unitarios, no sin antes hallar la magnitud del vector como se muestra a continuación.

$$V^2 = V_z^2 + V_h^2 \quad (5) \quad y \quad V_h^2 = V_x^2 + V_y^2 \quad (6)$$

$$\therefore V^2 = V_z^2 + V_y^2 + V_x^2 = \sqrt{V_z^2 + V_y^2 + V_x^2} \quad (7)$$

$$U_V = \frac{V}{|V|} \quad (8) \quad \text{donde } V = \langle x, y, z \rangle$$

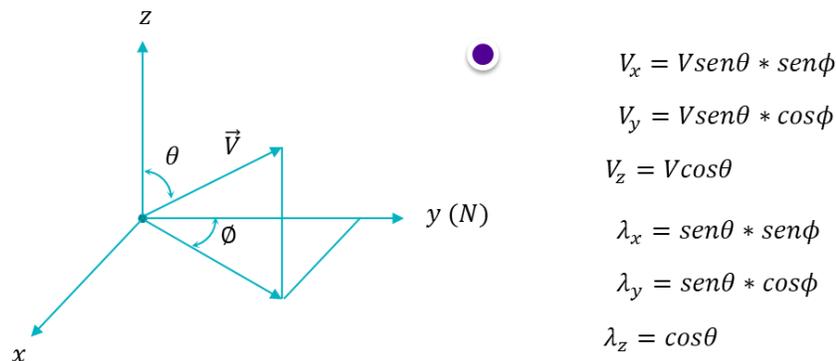


Figura 9 Vector solar

La descomposición del vector y las relaciones matemáticas usadas para sus proyecciones en los planos, se hacen, buscando estandarizar la forma de representar en vector, toda vez que el posicionamiento solar se suele dar en términos del ángulo cenital (θ) y acimutal (ϕ).

- Vector del receptor. Definido por el usuario

El vector del receptor se define con el mismo principio vectorial planteado en el vector solar, dando como resultado lo mostrado en la figura 10 y las siguientes ecuaciones.

$$B_z = B \cos \theta_2 \quad (9) \quad \text{y} \quad B_h = B \sin \theta_2 \quad (10)$$

$$B_y = B_h \cos \phi_2 = B \sin \theta_2 \cos \phi_2 \quad (11) \quad \text{y} \quad B_x = B_h \sin \phi_2 = B \sin \theta_2 \sin \phi_2 \quad (12)$$

$$B^2 = B_z^2 + B_h^2 \quad (13) \quad \text{y} \quad B_h^2 = B_x^2 + B_y^2 \quad (14)$$

$$\therefore B^2 = B_z^2 + B_y^2 + B_x^2 = \sqrt{B_z^2 + B_y^2 + B_x^2} \quad (15)$$

$$U_B = \frac{B}{|B|} \quad (16)$$

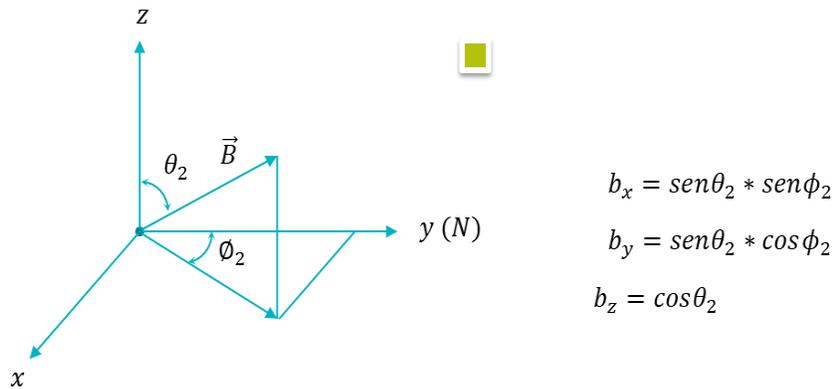
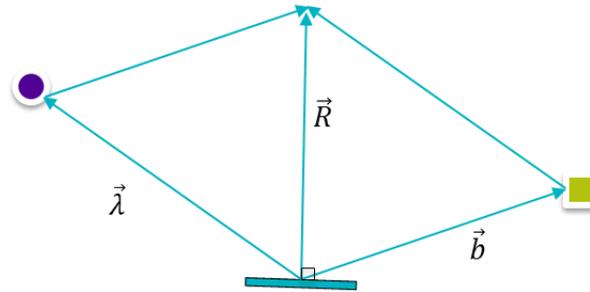


Figura 10 Vector receptor

- Vector de posicionamiento del heliostato. Vector que define hacia donde debe apuntar la normal del heliostato con el fin de direccionar la radiación al lugar deseado.

Al sumar los vectores unitarios del vector solar y del vector del receptor, se obtiene una resultante que cumple con el criterio de coincidir con la bisectriz del ángulo entre el receptor y el sol, medido desde el heliostato, es decir, cuando la normal a la superficie del espejo apunten en la dirección de dicha resultante, el ángulo de incidencia de la radiación va a ser igual al ángulo de reflexión, tal como se muestra en la Figura 11.



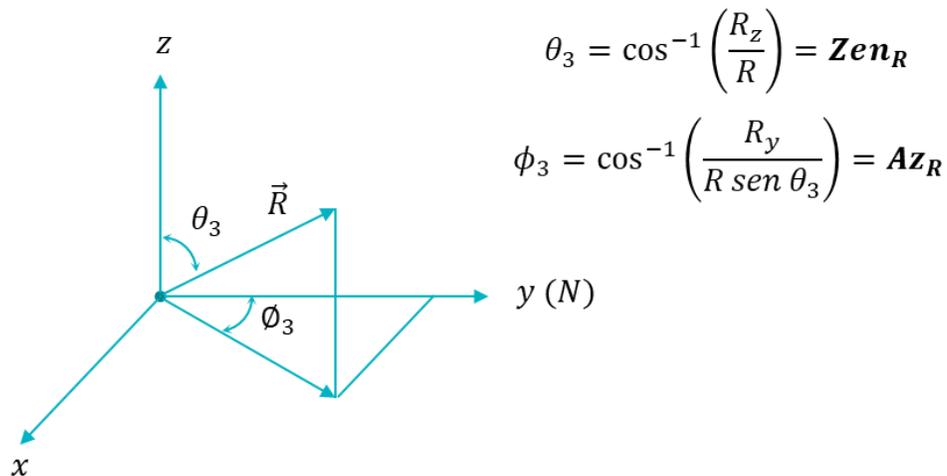
$$R_x = \text{sen}\theta_3 * \text{sen}\phi_3$$

$$R_y = \text{sen}\theta_3 * \text{cos}\phi_3$$

$$R_z = \text{cos}\theta_3$$

Figura 11. Cálculo de vector de posición del helióstato

Este vector se lleva a términos de ángulos de acimut y cenit, para facilitar la incorporación en el sistema de control.



$$\theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{R_z}{R}\right) = \mathbf{Zen}_R$$

$$\phi_3 = \cos^{-1}\left(\frac{R_y}{R \text{ sen } \theta_3}\right) = \mathbf{Az}_R$$

Figura 12 Dirección del vector helióstato

Para el movimiento del helióstato, los ángulos acimutal y cenital son llevados a través del sistema de control, a los motores paso a paso mostrados en las figuras 13 y 14 respectivamente.

Para el ángulo acimut se dispone de un motor inferior, en la estructura, el cual es el encargado de darnos la rotación del heliostato, permitiendo giros en ambas direcciones y de hasta 360 grados.



Eje vertical - **Az**

Figura 13. Movimiento acimut

Para ajustar el ángulo cenital, se utiliza otro motor, ubicado en la parte superior del heliostato. Este motor controla la inclinación del heliostato y también permite movimiento en dos direcciones. El sistema de movimiento de la estructura emplea un semiarco ensamblado con una cadena y sobre la salida del motor se dispone de un sprocket (ver Figura 14).

Eje horizontal - Zen



Figura 14 Movimiento cenit

Estos vectores y los cálculos de sus ángulos de posicionamiento se implementan en LabVIEW, el cual se encarga de controlar mediante una tarjeta Arduino y de drivers, el movimiento de los motores. LabVIEW se utiliza para programar y gestionar los comandos necesarios para el funcionamiento del sistema. La interfaz gráfica del programa, mostrada en la figura 15 y 16, permite a los usuarios visualizar y ajustar parámetros en tiempo real, facilitando la interacción y monitoreo del sistema. Esta configuración optimiza el control del heliostato.

En el modo manual, el sistema permite ingresar los ángulos de acimut y cenit para orientar el heliostato hacia un destino específico. Para enviar la posición deseada, y lograr el movimiento del heliostato, se introducen los ángulos correspondientes y se selecciona la opción "Enviar Posición". Bien sea enviando o no la posición, se pueden ingresar los ángulos de acimut y cenit correspondientes a la ubicación del receptor en relación con el heliostato, utilizando la opción "Almacenar Ubicación". Esta información va a ser la que emplea el sistema de control para calcular el vector de direccionamiento del heliostato en el momento que se busque el direccionamiento de la radiación.

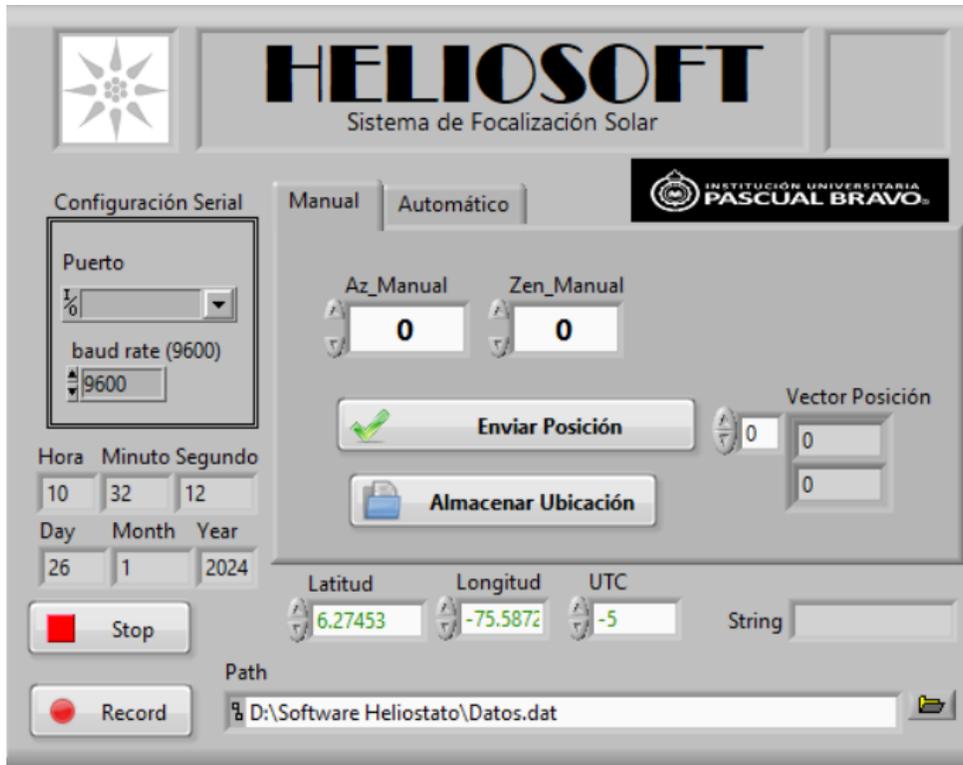


Figura 15 Interfaz del programa de LabVIEW implementado para el seguimiento solar (modo manual)

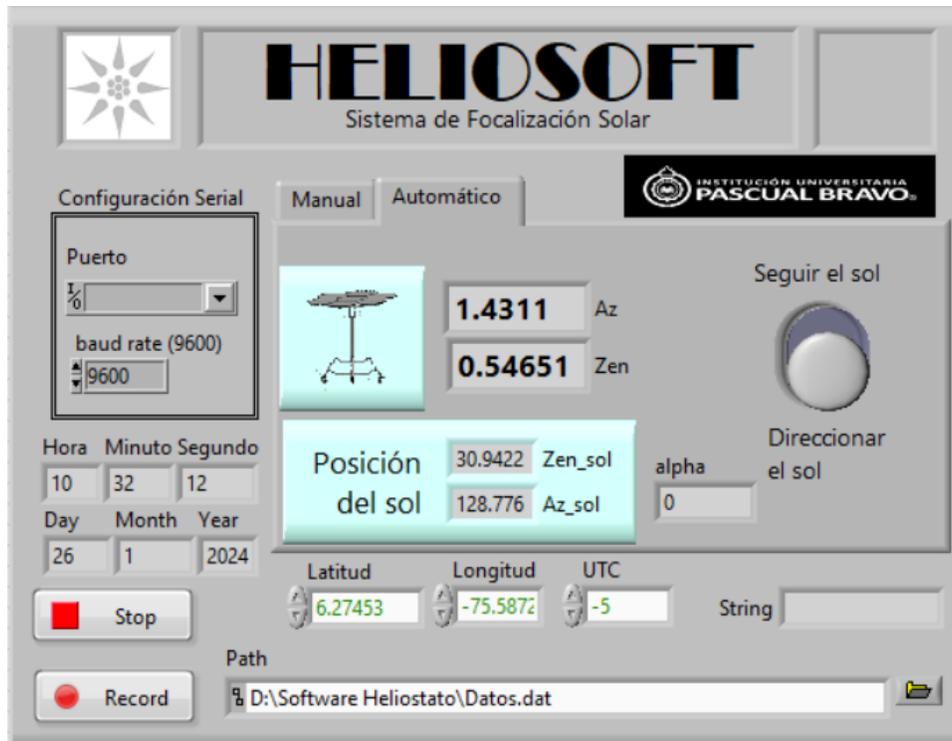


Figura 16. Interfaz del programa de LabVIEW implementado para el seguimiento solar (modo automático)

Una vez que se haya almacenado la ubicación del receptor, se puede cambiar al modo automático. En este modo, el sistema controla el heliostato para que funcione de acuerdo con el direccionamiento solar. Esto asegura que los rayos solares se reflejen directamente hacia el receptor. Además, el modo automático permite que el heliostato siga el movimiento del sol, lo cual es especialmente útil para aplicaciones en sistemas como el Stirling Dish (SDC). Este seguimiento solar captura la energía solar, permitiendo su uso en diversas aplicaciones energéticas. De esta manera, el sistema ofrece una operación efectiva y versátil, adaptándose a diferentes necesidades y mejorando el rendimiento del heliostato. Para mostrar la efectividad del sistema de direccionamiento se desarrollaron dos pruebas: i) con el sistema en automático con control y, ii) Sin el sistema de control. Los resultados de las pruebas, se muestran en la figura 17, donde se superponen las fotografías tomadas con y sin control. Luego de 1 hora, con el control activado, la mancha solar se desplaza cerca de 30 cm del punto deseado. Aunque debería haberse obtenido un desplazamiento menor, el error en el direccionamiento se explica debido al hecho de no haber contado con sistemas posicionamiento global de alta precisión para definir la ubicación del heliostato. El uso de un sistema de calibración de los ángulos de movimiento del heliostato usando decodificadores angulares, también podría haber ayudado a disminuir dicho error. Por su parte, en modo manual, sin el rastreamiento solar, el desplazamiento de la mancha solar es de aproximadamente 40 cm en 20 min. Lo anterior demuestra la efectividad del sistema de rastreamiento empleado.



Figura 17 Desplazamiento en automático

4.2 Caracterización energética

Para la caracterización energética del sistema, se hace necesario conocer el área efectiva o área de incidencia de la radiación solar sobre el heliostato. Luego de conocer dicha área, esta se multiplica por la radiación directa medida con el piranómetro, lo que da como resultado la energía que está entrando al heliostato (E_{in}). Los vectores y el área efectiva se muestran en la figura 18.

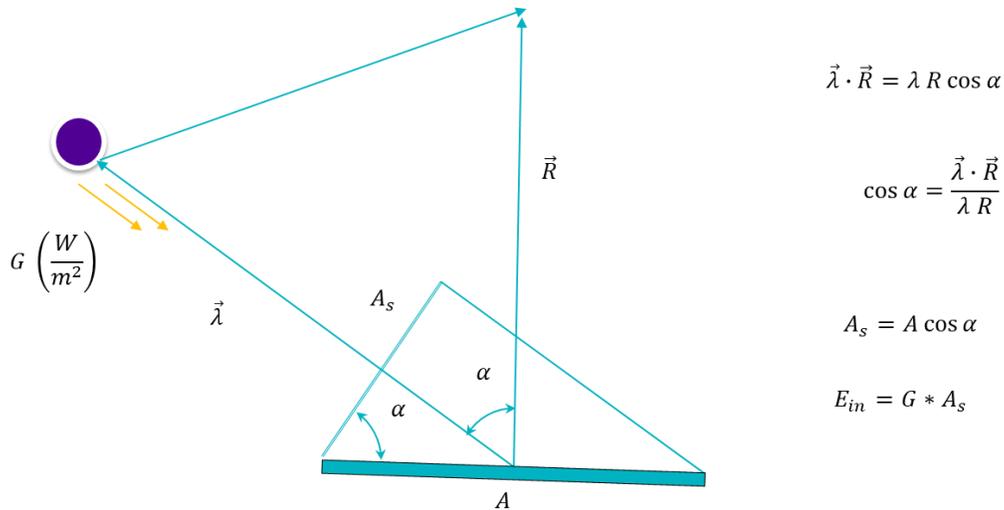


Figura 18. Esquema de vectores y área efectiva.

De las pruebas experimentales se obtienen datos de temperatura del agua, a la entrada y salida del receptor; radiación directa, tiempo, flujo volumétrico del agua y el coseno de α (porcentaje del área del heliostato por el que ingresan los rayos solares). Con estos datos se calcula; radiación efectiva y la energía que llega al agua debido al proceso de calentamiento. El flujo masico de agua se obtiene a partir del flujo volumétrico y de la densidad del agua, como se muestra en la ecuación 17.

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (17)$$

En el marco del análisis energético del sistema de concentración solar, se han considerado las interacciones clave entre la radiación solar incidente y la capacidad de calentamiento del agua. Las pruebas realizadas muestran que, de una radiación directa máxima de 980 W/m^2 medida por el piranómetro, se obtienen una entrada de energía efectiva de efectiva de aprox. 691 W por cada metro cuadrado de superficie de espejos. Con lo que se logra elevar la temperatura del agua de 25°C a un máximo de 63°C con un flujo volumétrico promedio de 0.31324 l/min . Es decir, se alcanza una eficiencia máxima del 90%. Los detalles de los resultados se presentan a continuación. Vale la pena aclarar que la energía efectiva va a cambiar en función de la disposición del heliostato y de la posición del sol relativa al sistema.

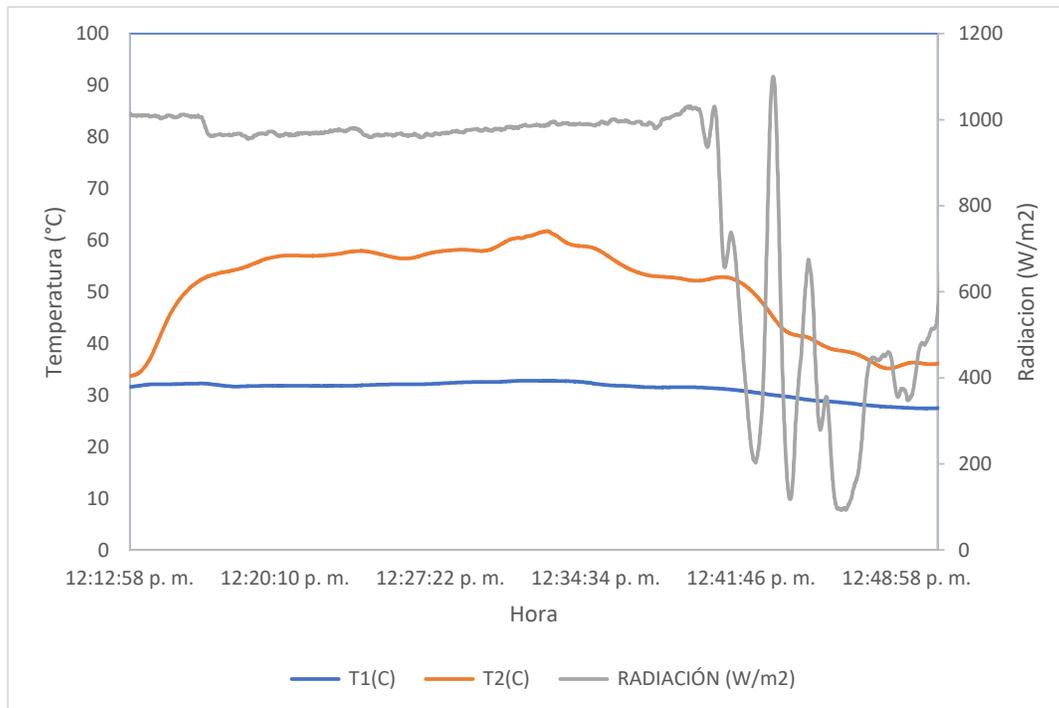


Figura 19. Intervalo de la prueba con baja nubosidad, de 12:12 a 12:48 horas

La variación en la temperatura del receptor, pese a que se tenía una radiación casi constante, se debe probablemente a ráfagas de viento que incrementaban el coeficiente de pérdidas desde el heliostato. También, vale la pena destacar que luego de la reducción de la radiación, la disminución de temperatura solo se veía reflejada un par de minutos después. Esto se explica por la inercia térmica del sistema. Ver figuras 19-20. La figura 21, muestra el intervalo completo de la prueba.

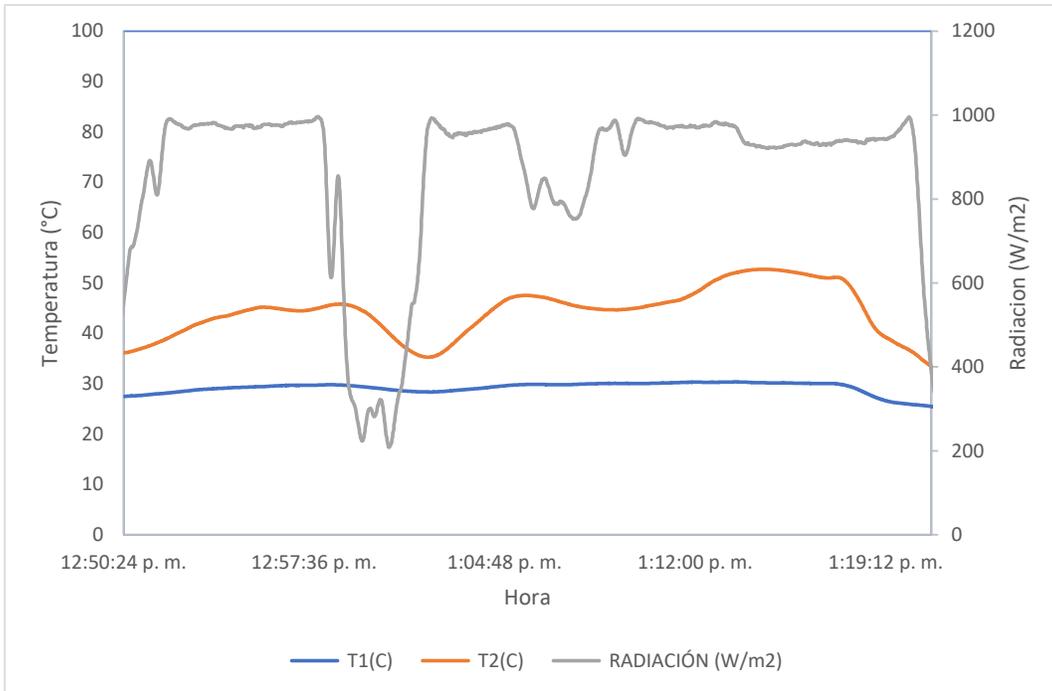


Figura 20. Intervalo de la prueba con nubosidad media, de 12:50 a 13:19 horas

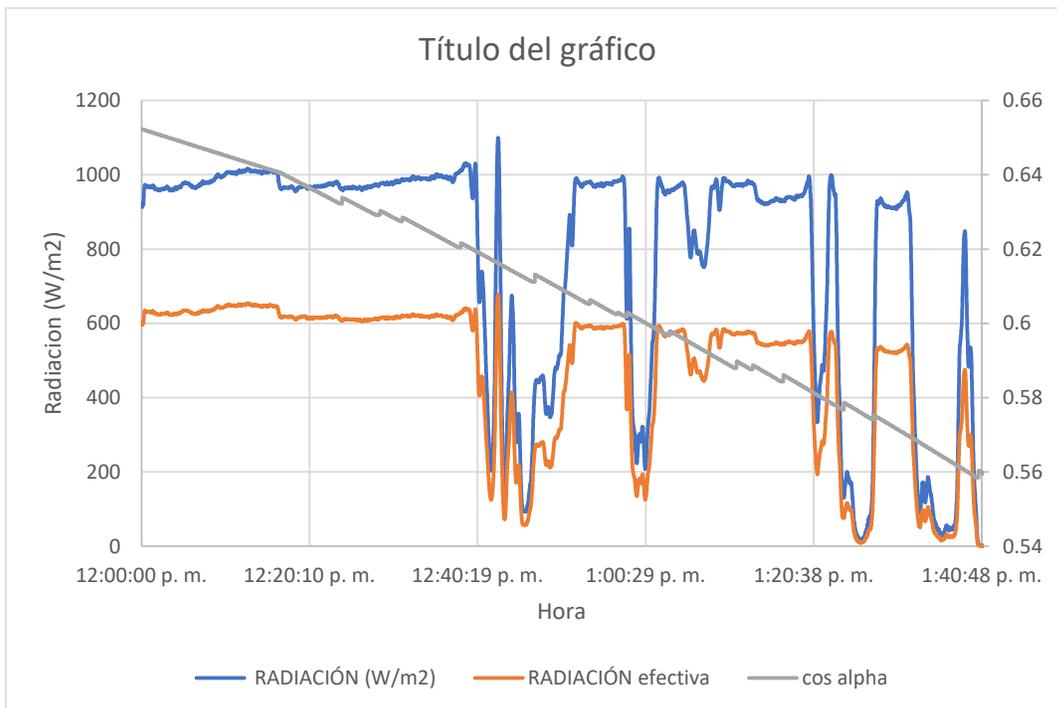


Figura 21. Prueba completa.

Partiendo de las anteriores medidas y luego de obtener la energía incidente en el heliostato se aplica la primera ley de la termodinámica en el receptor para evaluar la eficiencia del sistema. Sobre el receptor, se tienen las siguientes interacciones energéticas: la energía que proviene del heliostato (\dot{E}_{rad}), las pérdidas de calor por convección y la re-radiación, agrupadas como \dot{E}_{out} y el flujo de agua que atraviesa el sistema, ver figura 22.

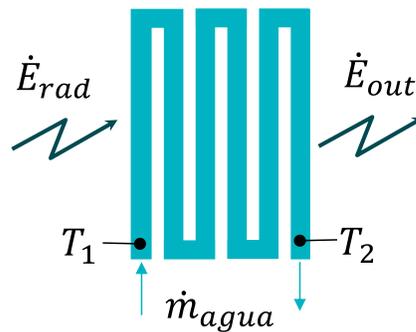


Figura 22. Esquema usado para el análisis de primera ley de la termodinámica

El balance de energía sobre el receptor queda entonces como

$$\dot{m} h_1 - \dot{m} h_2 + \dot{E}_{rad} - \dot{E}_{out} = 0$$

Ahora bien, el calor que efectivamente ingresa al agua, se obtiene de la resta entre $Q = \dot{E}_{rad} - \dot{E}_{out}$, y de un balance de energía directamente sobre el agua. Quedando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \dot{m} * Cp * (T_1 - T_2) + Q &= 0 \\ Q &= \dot{m} * Cp * (T_2 - T_1) \\ Q \text{ en [kW]} \end{aligned}$$

De allí, la eficiencia del sistema se calcula como,

$$Eff = \frac{Q}{E_{in}}$$

En la figura 23, se muestran los resultados de dicha eficiencia, donde se evidencia que, en el intervalo 12:13 -12:40, donde la radiación se mantiene casi estable, la eficiencia del sistema alcanza valores cercanos al 90%. Sin embargo, vale la pena destacar que se pueden tener valores incluso superiores al 100%, lo que se asume que son debidos a imprecisiones en la medida y al tipo de análisis efectuado sobre el sistema.

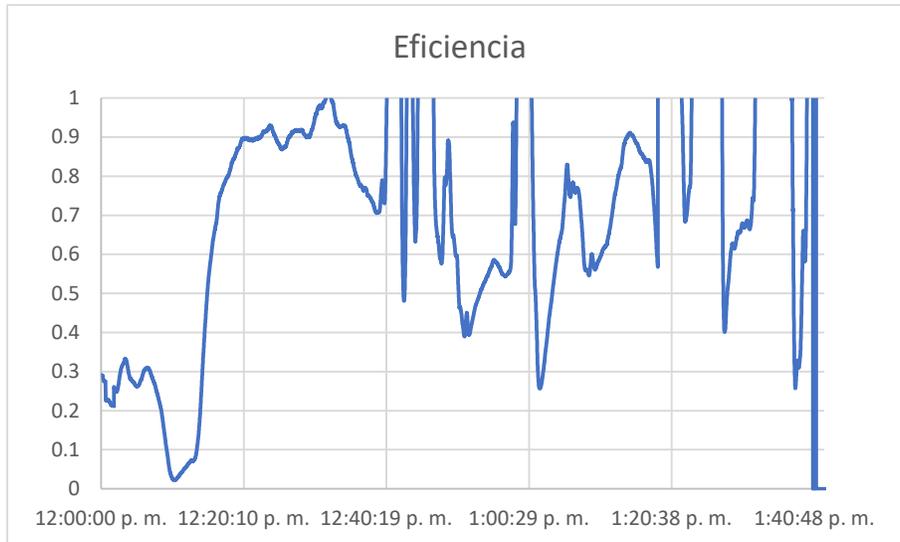


Figura 23. Eficiencia del sistema con análisis en estado estable

Los picos de eficiencia se deben a disminuciones súbitas de la radiación, mientras se mantiene una temperatura elevada en el receptor, por cuenta de la inercia del sistema. Por lo anterior se replantea el análisis, de energía. En lugar de asumir un estado estacionario, ahora se considera el análisis en dinámico, con cambio en la energía del sistema (agua del receptor) a lo largo del tiempo. El nuevo análisis tiene en cuenta el balance energético dinámico del receptor, permitiendo observar cómo la energía almacenada o liberada en el receptor varía con el tiempo. Esto proporciona una imagen más realista de la eficiencia del sistema, eliminando varios de los picos que se observaban anteriormente cuando la radiación disminuía con un receptor a alta temperatura. El balance de energía considerando solo el agua del receptor, es el siguiente.

$$\dot{m} h_1 - \dot{m} h_2 + Q = \frac{dE}{dt}$$

$$\dot{m} * Cp * (T_1 - T_2) + Q = \frac{d}{dt} (m_{agua} * Cp * T_2)$$

$$Q = \dot{m} * Cp * (T_2 - T_1) + \frac{d}{dt} (m_{agua} * Cp * T_2)$$

$$Q = \dot{m} * Cp * (T_2 - T_1) + m_{agua} * Cp \frac{dT_2}{dt} \quad [kW]$$

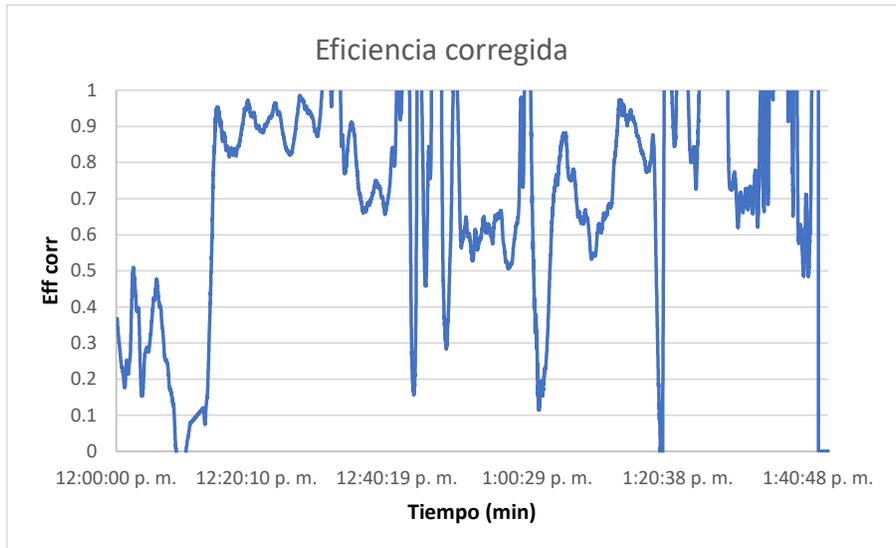


Figura 24. Eficiencia del sistema con análisis dinámico del receptor.

La figura 24 muestra el resultado de eficiencia con el análisis dinámico. El comportamiento observado, puede atribuirse a varios factores. En primer lugar, las pérdidas térmicas inherentes al sistema, como la reflexión imperfecta del espejo y la dispersión de la radiación, afectan la eficiencia global. Además, la transferencia de calor al agua no es completamente eficiente debido a posibles pérdidas por convección y re-radiación en el entorno del receptor. Por otro lado, las eficiencias superiores a 100% se deben a que, en el análisis dinámico, se considera el cálculo de la primera derivada sobre la temperatura del sistema, la cual se asume igual a la temperatura del agua de salida. La señal de temperatura presenta ruido electrónico considerable, lo que falsea el cálculo de la deriva y conduce a errores considerables en dicha estimación.

Por lo anterior, es de vital importancia el cálculo de la eficiencia durante periodos estables de radiación solar. El análisis dinámico, aunque permite un mayor acercamiento al fenómeno, requiere del uso de sensores de mayor precisión y menor ruido electrónico. La variación en la temperatura del agua sugiere que, aunque el sistema está recibiendo una radiación inestable, la conversión de esta energía en calor útil no es óptima. Esto indica áreas potenciales de mejora, como la optimización del diseño del receptor para minimizar pérdidas y mejorar la absorción y retención de calor.

Finalmente, la figura 25, presenta la estimación de energía total que llega al agua del receptor.

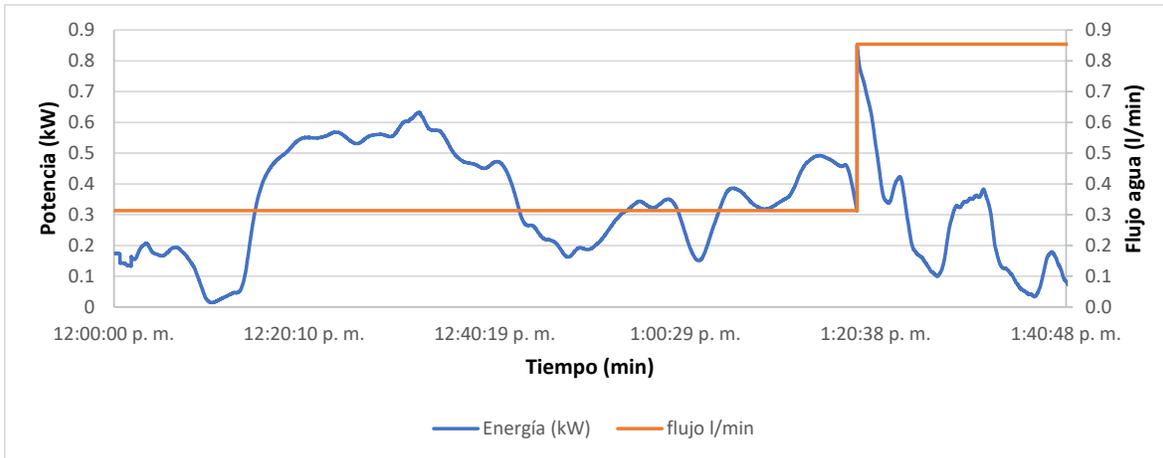


Figura 25. Energía total recolectada en el calentamiento del agua.

4.3 Simulación por trazado de rayos

Para simular el proceso de concentración solar mediante el método de trazado de rayos de Montecarlo, se mantuvo los parámetros reales de las pruebas experimentales en el programa Tonatiuh, es estas simulaciones, el receptor se encuentra ubicado en la posición $x = 0, y = 2.4, z = 0$ con distribución de las coordenadas observadas en la figura 26. El receptor apunta a una dirección de 56° al oeste con respecto del norte, apuntando al receptor que se encuentra a una distancia de 11.7m medidos desde su base. El receptor está constituido igualmente con 7 facetas hexagonales, cada una de 0.5 m.

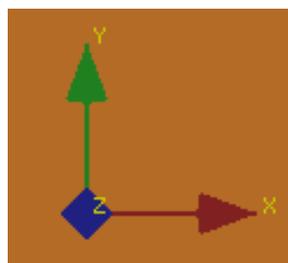


Figura 26

Para esta simulación se canteo las facetas a las 12 del mediodía, del 2 de junio del 2024, con coordenadas, latitud de 6.2518 y longitud de -75.5695. Al igual se definió la luz del sol con forma tipo pillbox con irradiancia de 1000 W/m².

Se considera para el canteo 3 facetas distintas, las cuales se encuentran identificadas en la figura 27. El primer canteo se realizó con respecto a la faceta del

centro identificada con el #1, el segundo con respecto de la faceta #2 y por último se realizó el conteo con respecto a la faceta #5.

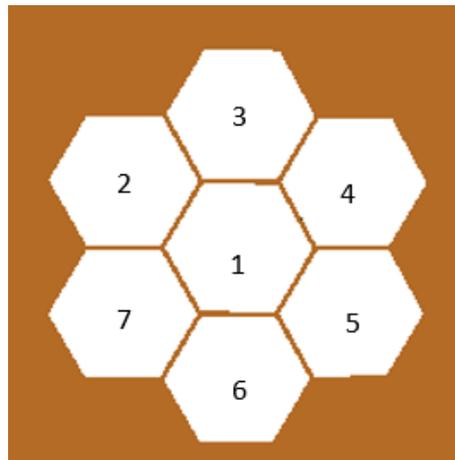


Figura 27 Identificación de facetas.

También se optó por simular en 8 horas distintas del día para cada uno de los conteos realizados, a partir de las 9 am hasta las 4 pm con intervalos de una hora.

Al simular el proceso, se modela el comportamiento de los rayos solares al incidir en el heliostato y ser reflejados hacia el receptor (figura 28). Esta simulación permite visualizar y analizar la distribución de la radiación solar concentrada en diferentes momentos del día, considerando variables como el ángulo de incidencia solar y las características ópticas del sistema.

En primera instancia se simula para el conteo #1 (con respecto a la faceta del centro) mostrando los siguientes resultados mostrados en las figuras 29, 31, 33 y 35.

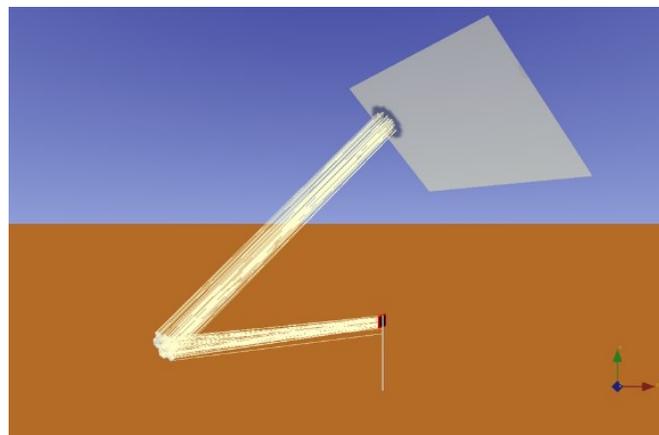


Figura 28 Posición solar 9 am

9 am

Incident Flux Distribution

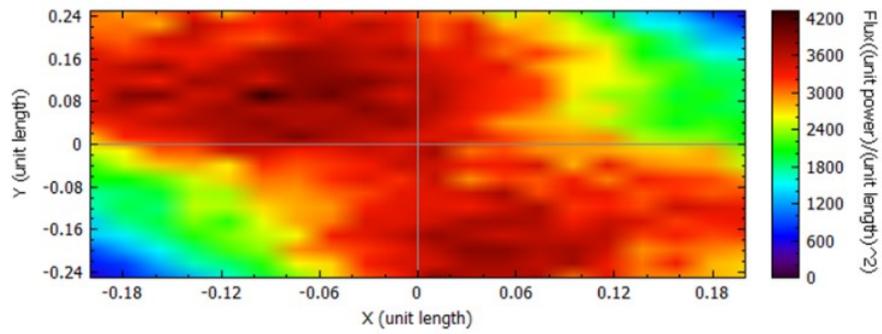


Figura 29 Diagrama de flujo en el receptor 9am

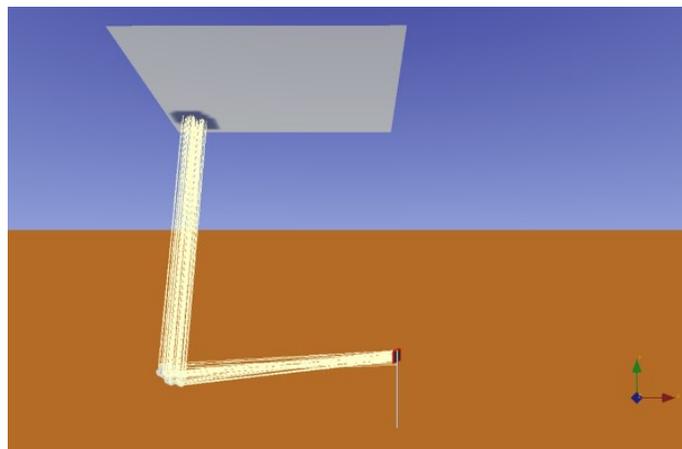


Figura 30 Posición solar 12pm

12 pm

Incident Flux Distribution

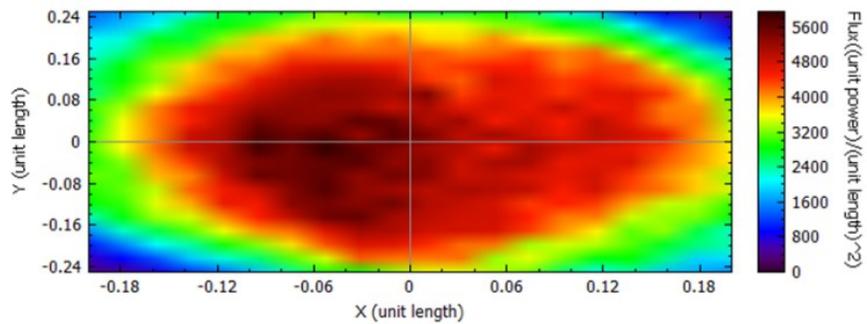


Figura 31 Diagrama de flujo en el receptor 12pm

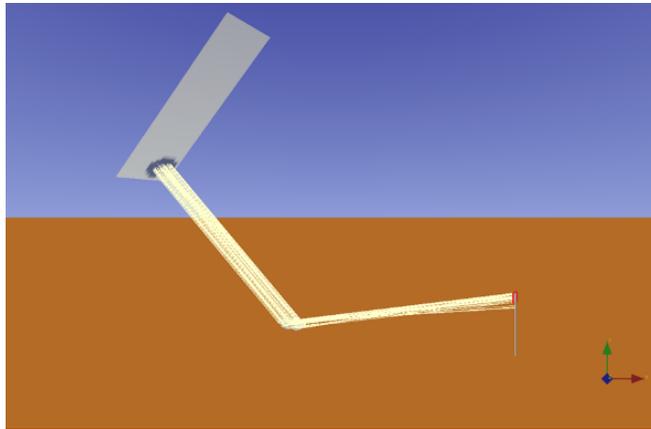


Figura 32 Posición solar 3pm

3 pm

Incident Flux Distribution

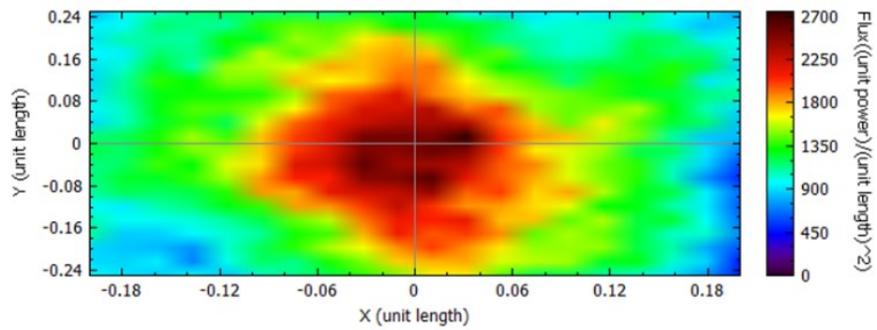


Figura 33 Diagrama de flujo en el receptor 3pm

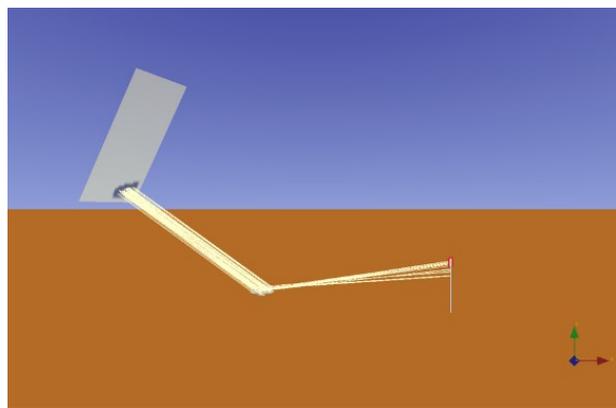


Figura 34 Posición solar 4pm

4 pm

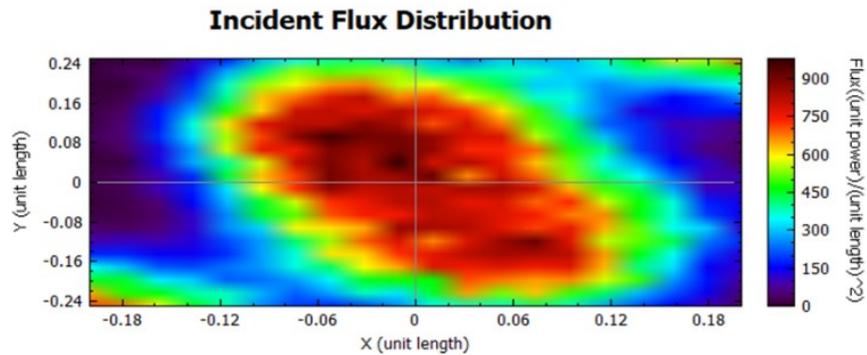


Figura 35 Diagrama de flujo en el receptor 4pm

La eficiencia concentración de radiación máxima se evalúa a lo largo de un día completo, considerando las variaciones en la posición del sol y las condiciones atmosféricas. Los resultados muestran que la concentración máxima se alcanza durante el mediodía con valores de hasta 5600 W/m^2 , cuando el sol está en su punto más alto y la radiación incidente es más intensa, además en este momento se realizó el canteo de las facetas. Sin embargo, la implementación de la estrategia de seguimiento solar permitió mantener una alta eficiencia incluso durante las horas de la mañana y la tarde, lo que aumentaría el rendimiento global del sistema.

Para identificar la estrategia de canteo más adecuado en diferentes facetas y maximizar la eficiencia del sistema, se realizarán dos canteos adicionales, manteniendo las mismas condiciones establecidas en el canteo inicial. La variación principal en estos canteos adicionales radica en la faceta específica en la cual se efectuarán los canteos. Primero, se selecciona una faceta #2 y, sin alterar las condiciones previamente definidas, se procede a realizar el canteo en esta nueva faceta. Esto permite evaluar el impacto de la variación del flujo solar de la faceta en el receptor. Luego, se escoge la faceta #5, nuevamente distinta a las usadas en el canteo inicial y en el primer canteo adicional. Con las mismas condiciones originales, se realiza el segundo canteo adicional en esta nueva faceta, permitiendo así una comparación más amplia de los resultados obtenidos al cambiar la faceta de canteo. Los datos recopilados de los tres canteos (el inicial y los dos adicionales) se analizan para determinar cuál de las facetas proporciona una mejora significativa de la concentración solar en el receptor. Este enfoque comparativo permite identificar las facetas más adecuadas para el canteo y ajustar las condiciones iniciales para optimizar aún más el proceso, asegurando una evaluación detallada que facilite la identificación de las estrategias de canteo más efectivas. Los

resultados de concentración en el receptor debido a los canteos con respecto a las facetas #2 y #5 se muestran a continuación.

Canteo faceta #2:

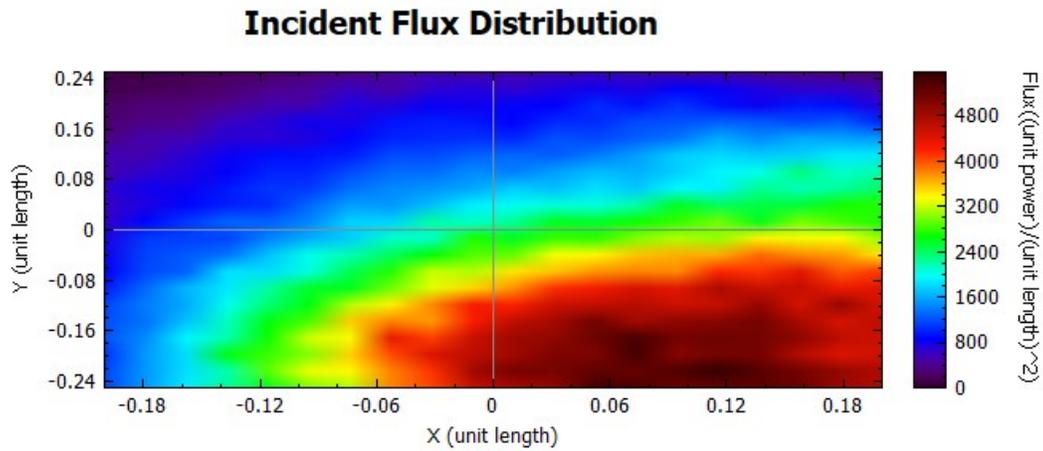


Figura 36 Diagrama de flujo en el receptor 9am

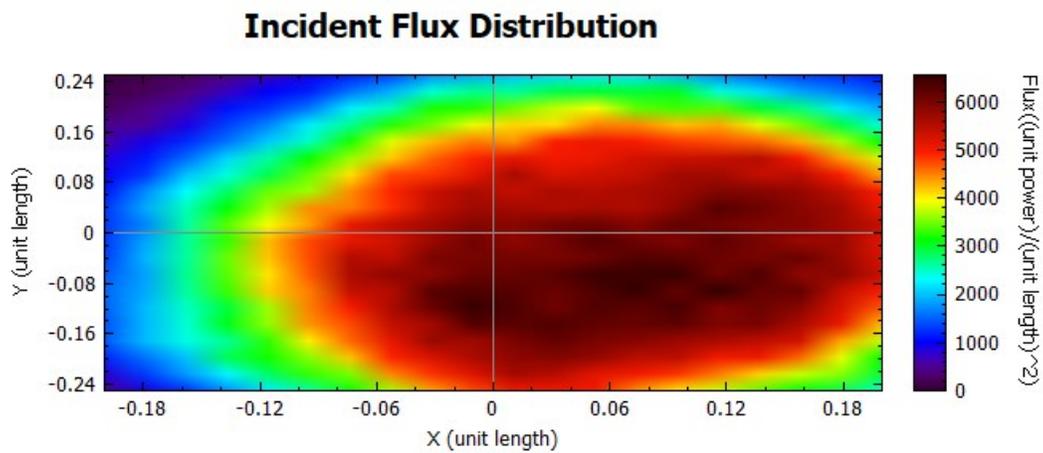


Figura 37 Diagrama de flujo en el receptor 12pm

Incident Flux Distribution

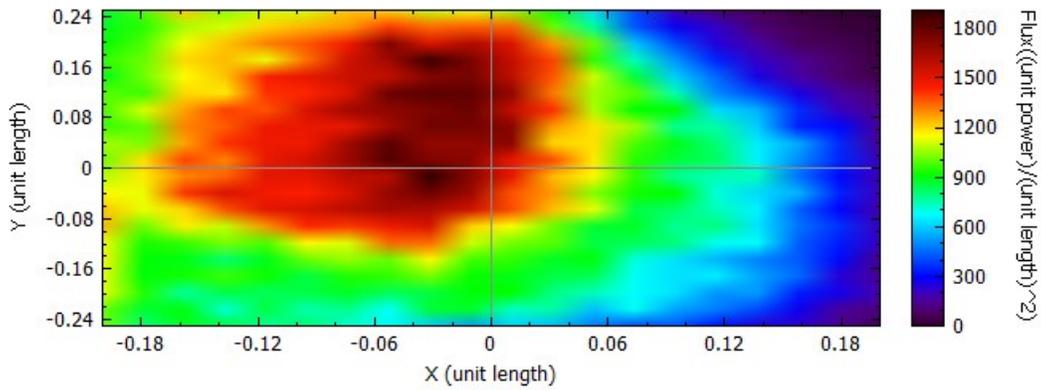


Figura 38 Diagrama de flujo en el receptor 3pm

Incident Flux Distribution

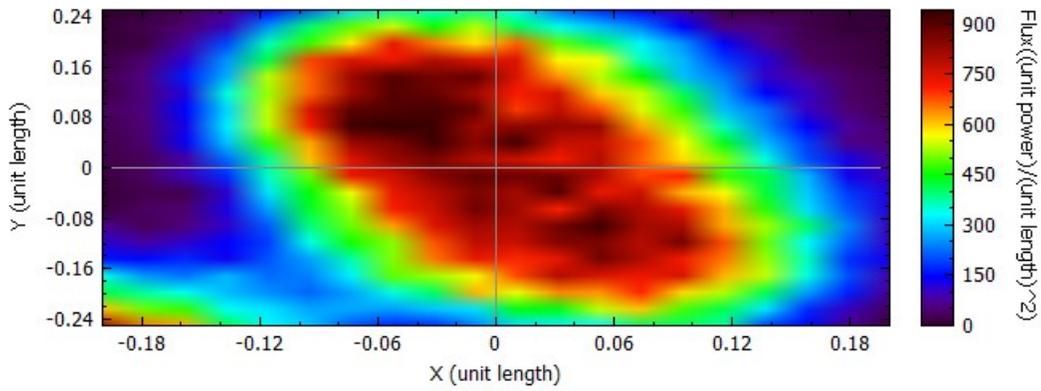


Figura 39 Diagrama de flujo en el receptor 4pm

Canteo faceta #5

Incident Flux Distribution

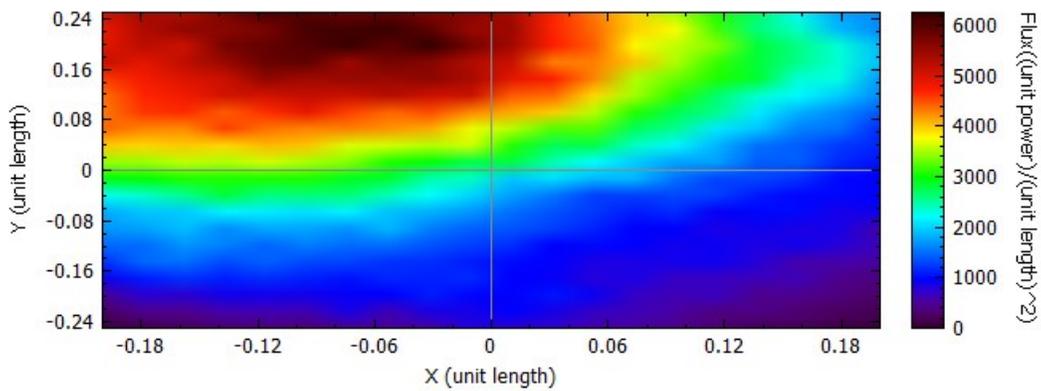


Figura 40 Diagrama de flujo en el receptor 9am

Incident Flux Distribution

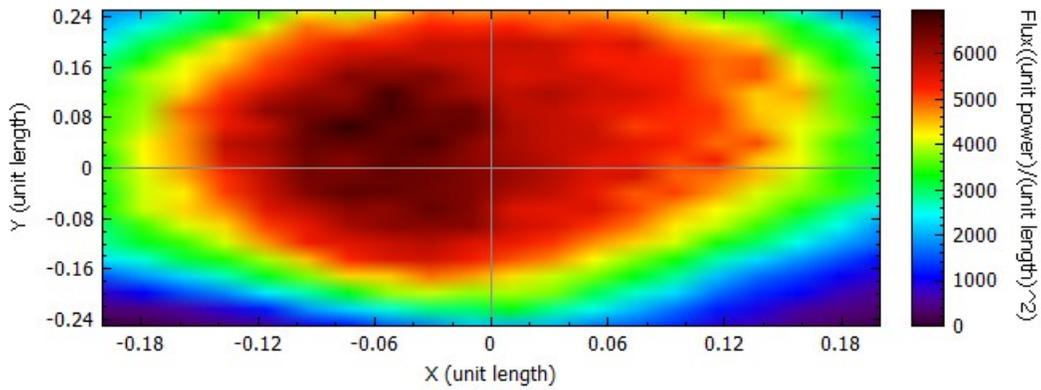


Figura 41 Diagrama de flujo en el receptor 12pm

Incident Flux Distribution

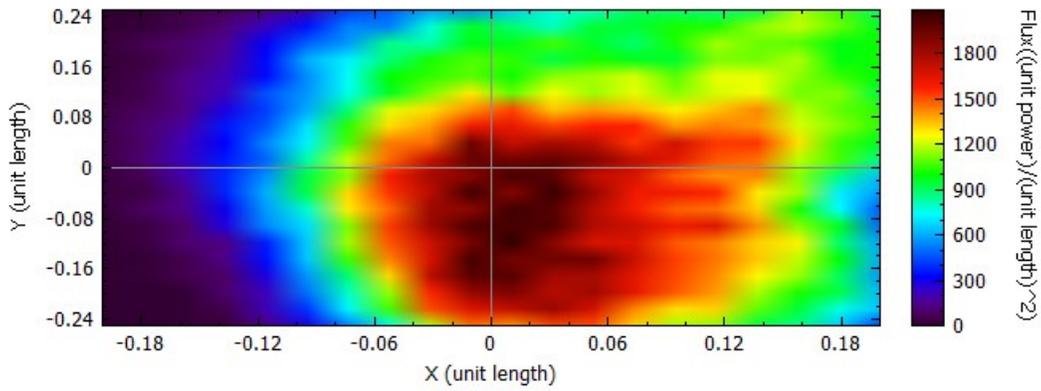


Figura 42 Diagrama de flujo en el receptor 3pm

Incident Flux Distribution

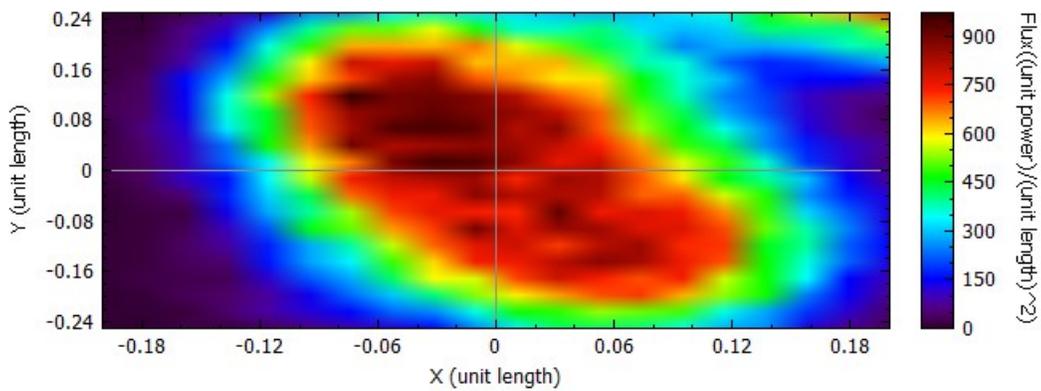


Figura 43 Diagrama de flujo en el receptor 4pm

Los datos obtenidos de la simulación revelaron que las facetas número 2 y número 5 presentaron una mayor concentración solar durante las horas de la mañana. Sin embargo, durante la tarde, se observó que la faceta número 1, la faceta central, ofreció una mayor concentración solar. Este patrón indica una variabilidad significativa en la eficiencia de la captación solar dependiendo de la hora del día y la faceta utilizada.

La concentración solar más alta en las facetas 2 y 5 durante la mañana sugiere que estas facetas están mejor orientadas para captar la luz solar cuando el sol está más bajo en el horizonte, al este. Esto puede ser debido a su posición y ángulo, que maximiza la exposición al sol naciente. Por otro lado, la faceta número 1, ubicada en el centro, parece ser más eficiente durante la tarde, posiblemente porque su orientación y ángulo son más adecuados para captar la luz solar directa cuando el sol está en el oeste.

Estos resultados destacan la importancia de considerar la variabilidad diaria en la orientación de las facetas para optimizar la captación solar. Para maximizar la eficiencia del sistema en su conjunto, una estrategia combinada podría ser la solución más efectiva. Por ejemplo, se podría priorizar el uso de las facetas 2 y 5 durante la mañana y cambiar a la faceta 1 en la tarde. Este enfoque adaptativo permitiría aprovechar al máximo la variabilidad en la radiación solar a lo largo del día.

Además, estos hallazgos pueden guiar futuros ajustes en el diseño y la operación del sistema de captación solar, como la implementación de mecanismos automatizados para ajustar las facetas en función de la hora del día y las condiciones solares. De este modo, se puede asegurar una captación solar óptima y constante, incrementando significativamente la eficiencia energética del sistema.

A continuación, se detalla la concentración solar en el receptor durante gran parte del día según la faceta en la cual fue realizado el conteo.

HORA	CANTEO ESPEJO 1	
	FLUX PROMEDIO (W/m ²)	FLUX MAXIMO (W/m ²)
9:00 a. m.	2961.48	4101.42
10:00 a. m.	3201.33	4545.66
11:00 a. m.	3536.17	5117.88
12:00 p. m.	3818.35	5838.3
1:00 p. m.	3672.67	5848.91
2:00 p. m.	2804.12	4267.17
3:00 p. m.	1417.26	2692.86
4:00 p. m.	428.102	948.546

Figura 44 Concentración solar canteo hacia espejo 1

HORA	CANTEO ESPEJO 2	
	FLUX PROMEDIO (W/m ²)	FLUX MAXIMO (W/m ²)
9:00 a. m.	2301.36	5559.4
10:00 a. m.	2723.63	5982.62
11:00 a. m.	3323.37	6507.1
12:00 p. m.	3995.11	6546.77
1:00 p. m.	3853.27	6336.33
2:00 p. m.	2168.23	4056.18
3:00 p. m.	938.798	1908.45
4:00 p. m.	407.57	942.22

Figura 45 Concentración solar canteo hacia espejo 2

HORA	CANTEO ESPEJO 5	
	FLUX PROMEDIO (W/m ²)	FLUX MAXIMO (W/m ²)
9:00 a. m.	2518.31	6200.91
10:00 a. m.	3009.09	6608.51
11:00 a. m.	3653.28	6871.29
12:00 p. m.	4128.31	6929.4
1:00 p. m.	3328.1	5603.96
2:00 p. m.	1705.47	2952.4
3:00 p. m.	958.204	2086.32
4:00 p. m.	402.144	976.472

Figura 46 Concentración solar canteo hacia espejo 5

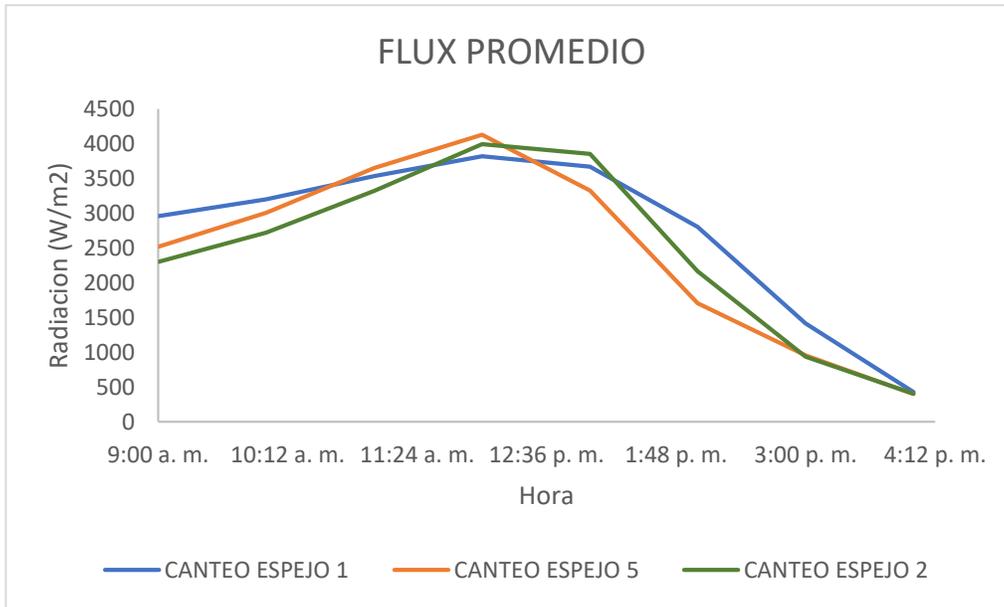


Figura 47 Comportamiento promedio concentración solar

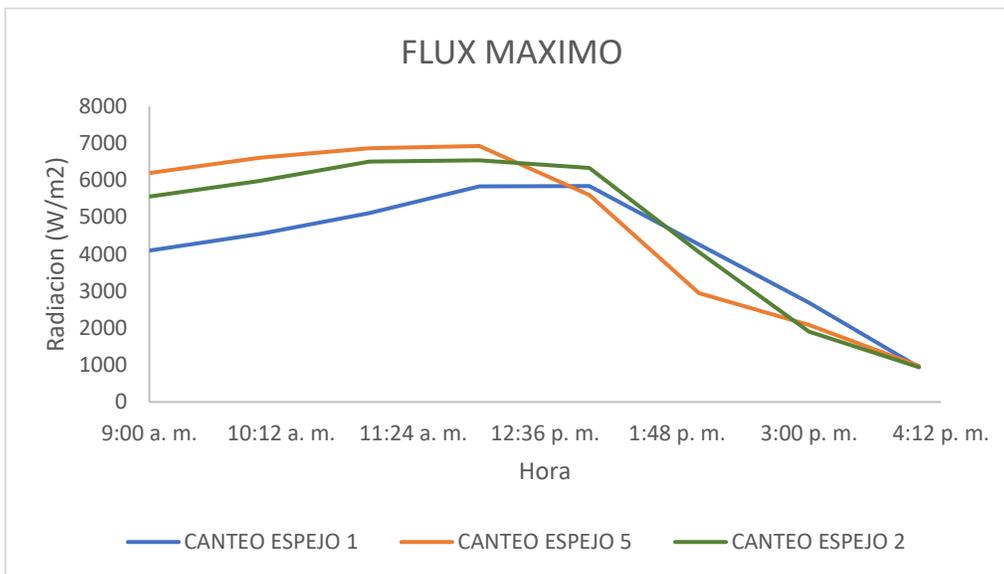


Figura 48 Comportamiento máximo concentración solar

Los resultados de la simulación fueron validados mediante pruebas experimentales, confirmando que la estrategia de seguimiento solar y la optimización del diseño del sistema conducen a una mayor eficiencia energética. Las pruebas mostraron un incremento en la captación de energía solar y en la capacidad de calentamiento del agua, validando la efectividad de las estrategias propuestas.

5 CONCLUSIONES

- El uso de vectores y dispositivos de bajo costo permitió lograr un rastreamiento solar aceptable, que podría ser mejorado mediante la calibración de los ángulos de posicionamiento del helióstato y el uso de sistemas RTK para definir la geolocalización del sistema.
- El sistema alcanza una eficiencia cercana a 70% en el punto de mayor radiación solar, con temperaturas de salida del agua cercanas a 70C. La potencia solar concentrada se llega a alcanzar alrededor de 500W
- Aunque la simulación por MRT es una herramienta potente solo permite establecer manchas solares en el receptor y debe ser complementada con otra simulación para establecer desempeño térmico del sistema.
- La variabilidad en la eficiencia de captación solar observada entre diferentes facetas a distintas horas del día destaca la necesidad de un diseño y operación flexibles en los sistemas de captación solar.
- La optimización de la captación solar mediante estrategias adaptativas de canteo también contribuye significativamente a la sostenibilidad ambiental. Al maximizar la eficiencia del sistema de captación solar, se incrementa la cantidad de energía limpia y renovable generada, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles y reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Cotidiano, “Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32512307>,” 2004.
- [2] J. Suarez, “LA ENERGÍA SOLAR: UNA FUENTE ENERGÉTICA SOBRE LA QUE EL ESTADO DEBE LEGISLAR MÁS PROFUNDAMENTE PARA MASIFICAR SU USO Y APROVECHAMIENTO PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE CIENCIAS JURÍDICAS CARRERA DE DERECHO Bogotá, Noviembre de 2015,” pp. 1–77, 2015.
- [3] C. J. Pardo-Meza, “Sistema Fotovoltaico interconectado a red para el Colegio Bet Hayladim S.C.,” pp. 15–25, 2015.
- [4] M. Teórico, “Construcción de un electrolizador de agua para obtención de oxihidrógeno como combustible,” pp. 5–24, 2010.
- [5] Salas Bernal Rodolfo Yered and Pérez Enciso Ricardo Arturo, “Desarrollo de espejos curvos concentradores para un helióstato de torre central,” 2022.
- [6] M. Peña, “Universidad Nacional Autónoma De México Programa De Maestría Y Doctorado En Ingeniería M a E S T R O E N I N G E N I E R Í a (Á R E a E N E R G Í a)”.
- [7] D. Patón, T. Tutor, : Álvaro, and A. Blanco, “Equation Chapter 1 Section 1 Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica Helióstato con sistema de control de lazo cerrado,” 2017.
- [8] M. Blanco-Muriel, D. C. Alarcón-Padilla, T. López-Moratalla, and M. Lara-Coira, “Computing the solar vector,” *Sol. Energy*, vol. 70, no. 5, pp. 431–441, 2001, doi: 10.1016/S0038-092X(00)00156-0.
- [9] M. J. Blanco, K. Milidonis, and A. M. Bonanos, “Updating the PSA sun position algorithm,” *Sol. Energy*, vol. 212, no. October, pp. 339–341, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.10.084.
- [10] “RI005819.pdf.”
- [11] REN21, *Renewables 2023 Global Status Report Energy Supply Collection*. 2023.
- [12] J. Rafael, E. Salomon, J. Rafael, and E. Salomon, “Universidad de Sonora Universidad de Sonora,” pp. 34–36, 2018.
- [13] E. Tatiana Torres-Suárez, J. Sebastián Solís-Chaves, and A. del Pilar Rodríguez-Muñoz, “Simulación Energética de un Sistema Termosolar de Torre Central para Magdalena, Colombia,” 2023.
- [14] UPME and IDEAM, “Atlas de Radiación Solar de Colombia Atlas de Radiación Solar de Colombia,” *Ideam*, p. 166, 2005.