

Caracterización energética de un heliostato con miras a la potabilización de agua en regiones apartadas

Yeiner Rafael Zambrano-Arenas¹, Jhojan Stiwen Galeano-Gomez², Yuhan Arley Lenis-Rodas³

¹S-GIEN, Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia. Email: yeiner.zambrano572@pascualbravo.edu.co

²S-GIEN, Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia. Email: Jhojan.galeano742@pascualbravo.edu.co

³S-GIEN, Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia. Email: yuhan.lenis@pascualbravo.edu.co

Resumen

En el presente trabajo se analiza el desempeño energético de un conjunto heliostato-receptor de bajo costo, con miras su utilización en sistemas de purificación de agua en zonas apartadas donde se tenga disponibilidad del recurso solar. El sistema fue caracterizado experimentalmente y la proyección hacia sistemas de purificación es analizada con ayuda de una simulación que emplea el método de trazado de rayos de Montecarlo (MRT) y un análisis termodinámico simplificado. El heliostato, cuenta con 1,6 m² de área, y está equipado con motores para el rastreamiento solar en dos ejes. Este dispositivo concentra la radiación solar sobre una superficie de aproximadamente 0,19 m² donde se logra el calentamiento del agua hasta temperaturas que permitirían su potabilización. También se proyecta, con ayuda del modelo, la cantidad de agua que podría alcanzar una temperatura de 100°C para ser posteriormente condensada. En el mejor punto de desempeño, para una irradiación directa alrededor de 1000 W/m², el sistema permite una captación de energía máxima de 323.15 W, con lo que se tendría un flujo de agua 0,282 kg/h, esto, por cada metro cuadrado de superficie de espejos.

Palabras clave: energía solar, potabilización de agua, concentración solar, heliostato.

Abstract

In the present work, the energy performance of a low-cost heliostat-receiver system is analyzed, with a view to its utilization in water purification systems in remote areas where solar resources are available. The system was characterized experimentally, and the projection towards purification systems is analyzed with the help of a simulation employing the Monte Carlo ray racing method (MRT) and a simplified thermodynamic analysis. The heliostat used has an area of 1,6 m² and is equipped with stepper motors for two-axis solar tracking. This device concentrates the solar radiation onto a surface of approximately 0,19 m², where the heating of water up to temperatures that would allow its purification is achieved. The model also projects the amount of water that could reach a temperature of 100°C, and be subsequently condensed. At the best performance point, for a direct irradiation around 1000 W/m², the system allows a maximum energy capture of 323,15 W, which would result in a water flow of 0,282 kg/h, per square meter of mirror surface.

Keywords: energy, water treatment, heliostats, solar.

1. Introducción

Las energías de concentración solar se basan en la captura y focalización de la radiación mediante sistemas de espejos. Llevando la radiación a un punto o a una línea focal conocidos como receptor, se logra

aumentar su temperatura hasta valores que pueden superar los 1000 °C, lo que permite el aprovechamiento energético tanto en sistemas de generación de electricidad como en equipos o procesos con demandas térmicas.

En muchas zonas apartadas, donde la infraestructura para el suministro de agua potable es insuficiente, la disponibilidad del recurso solar representa una oportunidad única para el desarrollo de soluciones sostenibles de tratamiento de agua para el consumo humano. Considerando lo anterior, este trabajo presenta el análisis energético de un conjunto heliostato-receptor, con miras a su utilización en sistemas de potabilización de agua por evaporación-destilación. El uso del sistema en procesos de potabilización, se proyecta, haciendo uso de simulaciones por método de trazado de rayos de Montecarlo (MRT) y análisis termodinámicos. Vale la pena destacar que se considera como temperatura objetivo 100°C , ya que esta está asociada a la eliminación de una gran cantidad de microorganismos y contaminantes presentes en el agua [1].

Si bien los sistemas de concentración por heliostatos, son diseñados para alcanzar temperaturas de hasta 1000°C [2], en este trabajo se considera este tipo de tecnología debido que permite desvincular el desarrollo del componente óptico, del térmico, facilitando su análisis y diseño. Es de resaltar que, el presente estudio es apenas una primera aproximación al desarrollo del sistema considerando materiales y equipos de bajo costo, sin embargo, los resultados muestran un gran potencial para su escalabilidad y optimización. Particularmente, el diseño del receptor juega un papel preponderante en el camino de desarrollo del equipo, debido a que se debe procurar reducir las pérdidas de calor por convección al ambiente y por radiación a la vez que se aseguren las condiciones que permitan potabilizar el agua.

2. Metodología

El componente óptico es simulado, empleando método de trazado de rayos de Montecarlo, haciendo uso del programa Tonatiuh desarrollado por CENER [3], y el componente térmico se aborda mediante un análisis termodinámico.

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 kW. El heliostato en cuestión se compone de una sólida estructura metálica diseñada para soportar 7 paneles hexagonales o facetas (Ver **Figura 1**) con una medida de 0,5 m de diámetro para el círculo en el que está inscrita. La estructura metálica no solo proporciona estabilidad y resistencia, sino que también facilita la óptima disposición de las facetas, maximizando así la captación de energía solar. Cada uno de estos espejos hexagonales puede ser orientado mediante ajuste por tornillos hacia el punto de canteo definido. Siendo seleccionada la faceta central para

esta calibración [4], debido a que el punto de utilización del sistema fue la ciudad de Medellín en las coordenadas geográficas latitud $6,27453$ y longitud $-75,5872$, cerca de la línea del Ecuador.

El heliostato empleado hace uso de un código de rastreamiento solar basado en el algoritmo de posicionamiento solar desarrollado por PSA [5]. Mediante álgebra de vectores se calcula la orientación del sistema para que la radiación sea direccionada al receptor. El movimiento de la estructura es logrado gracias al uso de dos motores de paso Nema 34 con cajas de reducción planetarias 20:1. La actualización de la posición se hace cada 2 segundos.



Figura 1. Heliostato disponible para el proyecto. [6]

Durante las pruebas, se direcciona la radiación solar sobre un receptor (Ver **Figura 2**) por el que se hace circular agua. Para la medición de temperatura a la entrada y salida del receptor se emplean termopares tipo K, mientras que la radiación es medida con un pirómetro RK200-03, acondicionado con un sombreador para la medición de radiación directa, siguiendo la misma metodología presentada en [7]. Las anteriores mediciones son registradas cada segundo, en un sistema de adquisición de datos que emplea una tarjeta Arduino Mega. El flujo de agua es medido mediante aforo a la salida del receptor. De forma general, el esquema del sistema usado se presenta en la **Figura 3**.



Figura 2. Foto general del Montaje experimental.

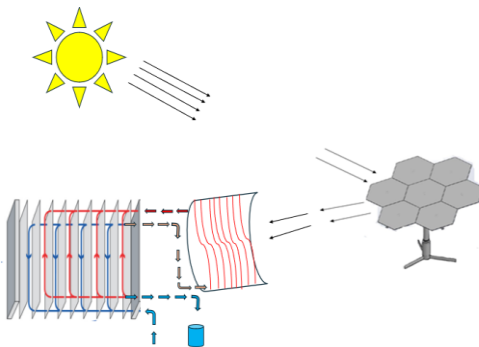


Figura 3. Esquema general del sistema agua.

Para el receptor (Ver **Figura 4**), se emplea un intercambiador de calor agua-aire, ubicado a una altura 2,4 m sobre la base inferior del heliostato y a una distancia de 11,7 m. Actualmente el sistema está fabricado con aluminio y componentes plásticos, sin embargo, en una segunda etapa se prevé el uso de acero inoxidable en todo el conducto de circulación de agua. Buscando un ligero aumento en el área de captación del receptor, este fue acondicionado con cuatro espejos laterales, que aumentan la captura de la radiación reflejada por el heliostato.



Figura 4. Receptor

Para visualizar el área sobre la que incide la radiación, y la variación de potencia a lo largo del día, se emplea una simulación en Tonatiuh que hace uso de MTR (ver **Figura 5**) [8]. Este es un método empleado para el diseño y análisis de sistemas de energía solar concentrada, permitiendo optimizar la captura y el uso de la energía solar en aplicaciones como la potabilización del agua. Para la simulación, se emplea la forma solar Pillbox, considerando el sol como una esfera perfecta con una intensidad de radiación uniforme de 1000 W/m^2 , y un radio angular de $\Delta s = 4,65 \times 10^{-3} \text{ rad}$.

En el programa, se carga la geometría del heliostato y la posición solar, para simular de manera detallada el proceso de concentración. La estrategia de focalización y canteo, se perfecciona mediante la ejecución de múltiples simulaciones, variando sistemáticamente los parámetros geométricos del heliostato. El detalle de las simulaciones, así como la estrategia empleada para el rastreamiento se presentan [9].

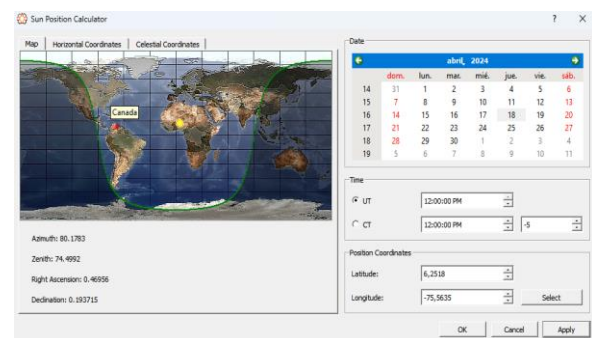


Figura 5. Geolocalización de posición solar.

Para la simulación se consideró el canteo usando la faceta central a las 12 del mediodía, del 2 de junio del 2024. Se optó por simular en 8 horas distintas del día aunque solo se presentan los resultados para las 9:00 AM, 12:00 M, y 3:00 PM.

Al simular el proceso, se modela el comportamiento de los rayos solares al incidir en el heliostato y ser reflejados hacia el receptor. 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.

Para el análisis de la energía aprovechada, se hace uso de la primera ley de la termodinámica aplicada sobre el agua que circula por el receptor (ver **Figura 6**). En este análisis, es de gran importancia la consideración del componente dinámico pues en instantes de baja radiación, en análisis único de las temperaturas, conduce a una sobreestimación de esta energía debido

a la inercia térmica del sistema. El análisis de primera ley conduce a la ecuación (1).

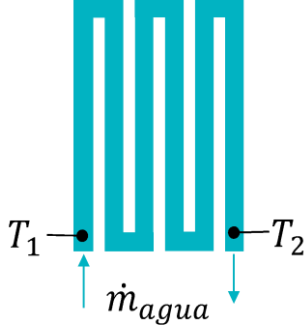


Figura 6. Esquema sistema primera ley de la termodinámica.

$$\dot{m}_{exp}h_1 - \dot{m}_{exp}h_2 + \dot{E} = \frac{dU_{sistema}}{dt} \quad (1)$$

Donde:

\dot{m}_{exp}	Flujo másico de agua [$\frac{kg}{s}$]
h_1	Entalpía del agua entrando al sistema [$\frac{kJ}{kg}$]
h_2	Entalpía del agua saliendo del sistema [$\frac{kJ}{kg}$]
\dot{E}	energía que ingresa al agua cada segundo [kW]

El manejo matemático de la ecuación y la suposición del agua como sistema concentrado, conduce a la ecuación (2), la cual se expresa en términos de la energía que ingresa al agua por unidad de tiempo.

$$\dot{E} = \dot{m}_{exp}C_p(T_2 - T_1) + m_sC_p\frac{dT_2}{dt} \quad (2)$$

Donde:

C_p	Calor específico del agua [$\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$]
T_1	Temperatura en la entrada [$^\circ K$]
T_2	Temperatura en la salida [$^\circ K$]
m_s	Masa de agua que cabe en el receptor [kg]

Buscando facilitar el análisis, se empleó un flujo de agua que no permitiera alcanzar condiciones de saturación, de esta manera se facilita el uso de la relación de entalpía considerando líquida. La ecuación (2) permite determinar el valor de la potencia que incide sobre el receptor, el cual se usa para estimar la cantidad de agua que el sistema teóricamente lograría potabilizar en una hora (m_{teo}), bajo condiciones de estado estable, como se muestra en la ecuación (3)

$$m_{teo} = \frac{\dot{E} * 3600s}{C_p * \Delta T} \quad (3)$$

3. Resultados

Las pruebas experimentales mostraron que con dicho sistema es posible el calentamiento de agua con valores que alcanzan los $323,15 \text{ W/m}^2$. Por su parte, las simulaciones permitieron evidenciar una considerable dispersión del foco en intervalos de tiempo menores a 2 horas, lo que evidencia la necesidad del uso de óptica secundaria en el receptor, para el uso del sistema en lugares cercanos a la línea del Ecuador. A continuación se detallan los resultados.

3.1. Caracterización energética.

En la **Figura 7**, es posible observar que la temperatura de salida del agua se mantiene de forma aproximada entre 35°C y 62°C , siendo altamente dependiente del flujo de agua empleado y de la radiación incidente (**Figura 8**). De esta manera, el balance de energía sobre el receptor, permite observar que la potencia recolectada por el agua se mantiene de forma aproximada en la franja de los 200 W y los 600 W.

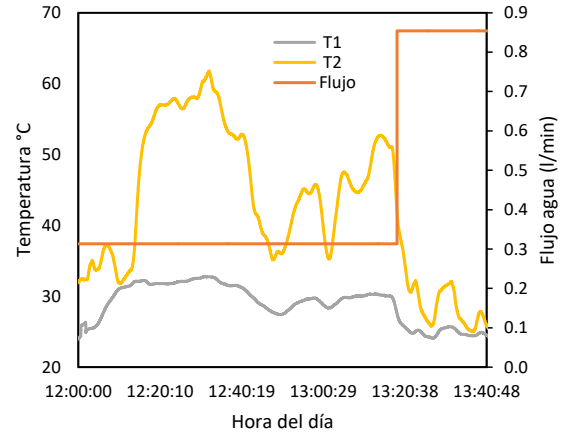


Figura 7. Temperatura y flujo de agua sobre el receptor.

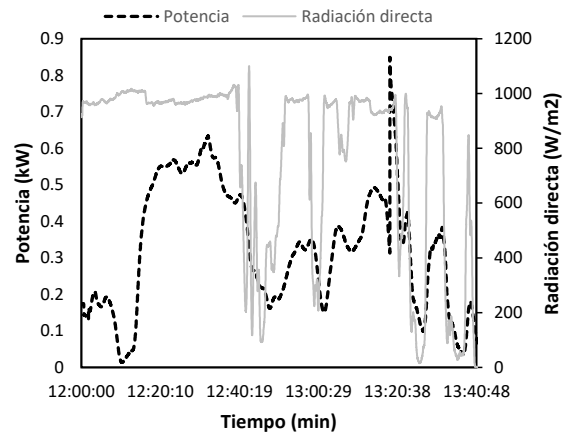


Figura 8. Temperatura y flujo de agua sobre el receptor

La integración de los valores de potencia en el tiempo, permiten estimar la energía total que llega al agua, que dividida en el tiempo total de la prueba, resulta en la potencia promedio, dando un valor de 323,15 W.

Para alcanzar condiciones de saturación a presión atmosférica a nivel del mar, con una entrada de agua a 25°C, la demanda de energía del proceso con evaporación completa es de 2572,5 kJ/kg. Con la potencia promedio y esta demanda de energía, se estima el flujo másico teórico de agua que se evaporaría en el sistema, llegándose a un valor de 0,12 g/s, lo que en una hora correspondería a 0,45 kg de agua.

Vale la pena destacar que en el presente estudio no se consideraron sistemas de recuperación de calor de la condensación del agua de salida, sin embargo, los mismos ayudarían a aumentar la potabilización de agua debido a que las únicas salidas energéticas serían las pérdidas por convección y radiación desde el sistema.

3.2. Simulación

Para la simulación se aplica el método de trazado de rayos de Montecarlo, en el cual se mantiene los parámetros reales de las pruebas experimentales; como la posición del heliostato con respecto al receptor, cuya posición es 56° al oeste medidos desde el norte a una distancia de 11,7 m. También se emplea la configuración de 7 facetas hexagonales de 0,5 m del círculo inscrito, unidas en una sola estructura. También fueron usados los parámetros de radiación, longitud y latitud de las pruebas experimentales.

La **Figura 9** muestra la configuración general de la simulación usando como ejemplo las 9:00 AM. Por su parte, la **Figura 10**, muestran los resultados de flux incidente para 9:00AM, 12:00M y 3:00 PM.

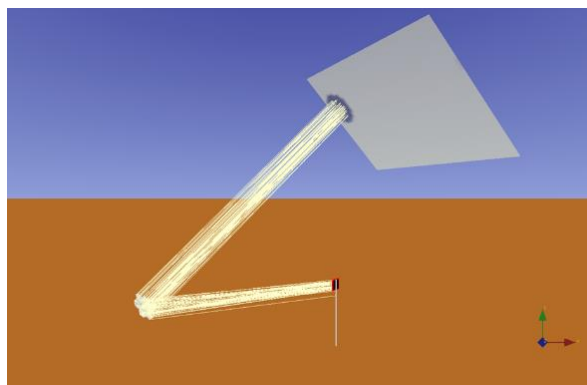


Figura 9. Posición solar 9:00AM.

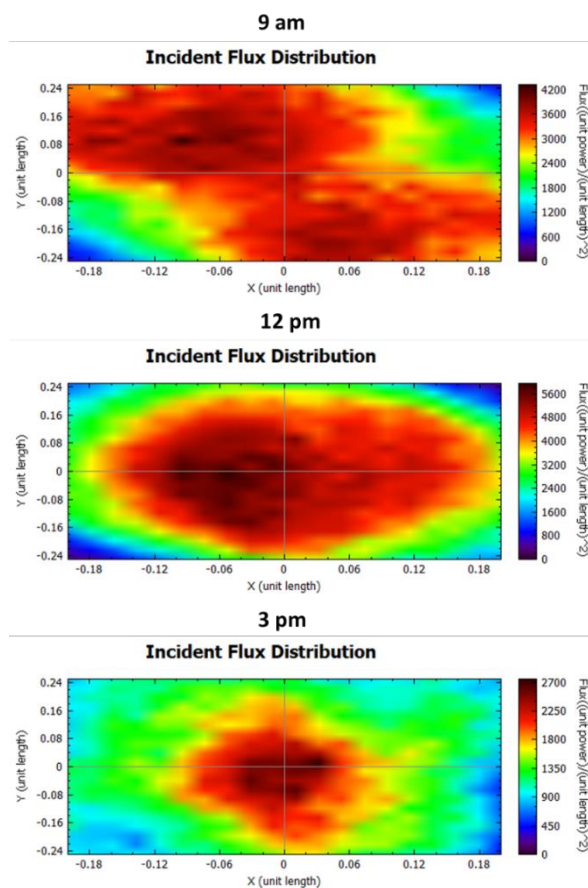


Figura 10. Diagrama de flujo en el receptor 9AM 12M y 3 PM.

En la **Figura 10** se observa que el mayor flux de radiación sobre el receptor se alcanza para la hora de canteo seleccionada, donde se tienen valores máximos de 5600 W/m², para los otros extremos analizados, este valor disminuye hasta un mínimo de 2700 W/m², esta reducción se debe tanto a la disminución del ángulo de incidencia como a la apertura de la mancha solar debida a efectos ópticos. Este resultado sugiere que, para ubicaciones de baja latitud, se deben emplear dispositivos de óptica secundaria o heliostatos que permitan la calibración dinámica de la superficie.

4. Discusión - sistemas de potabilización

En la actualidad, comunidades indígenas como los Wayuu residentes en la Alta y Media Guajira colombiana no acostumbran realizar tratamiento de potabilización al agua utilizada para consumo humano [10]. Estos grupos poblacionales, relacionan muchas de las enfermedades presentes en sus territorios, como la diarrea y las infecciones en la piel, con la calidad del agua. De forma similar, existen numerosas poblaciones a nivel mundial, en donde no se cuentan con las condiciones de agua potable y saneamiento básico adecuadas; como ejemplos claros, se tienen las poblaciones indígenas de Ata Manobos, Dibabawons,

Mandayas y Mansakas localizadas en la región Davao al sur de Filipinas, donde se presentan problemas de salud derivados de los malos hábitos higiénicos varios de ellos relacionados con el agua. Estudios realizados en las comunidades étnicas de Canadá revelan también que uno de los mayores factores de riesgos de contaminación de las fuentes de agua proviene de la manipulación inadecuada de las heces fecales, causantes de enfermedades gastrointestinales. Igualmente, consideran que existen vacíos de información relacionados con el tipo de agua que consumen los infantes y las enfermedades transmitidas por el agua.

Vale la pena aclarar que el proceso de cocción de alimentos y bebidas que tienen estas comunidades, permite que el agua pase por un proceso de desinfección. Para el caso colombiano, algunas de estas comunidades cuentan con fuentes de abastecimiento como jagüeyes, pozos, casimbas, albercas, carrotanques, represas y plantas desalinizadoras que las proveen del preciado líquido (Ver **Figura 11** y **Figura 12**), pero la situación es alarmante en la gran mayoría de estos resguardos indígenas.



Figura 11. Sistemas de captación y abastecimiento de agua: a) Pozos artesanales (Comunidad Los Cocos); b) Captación mediante el uso de molinos de viento (Comunidad Guacharaquero); c) Pozo manual (Comunidad Guacharaquero); d) Represa de agua (Comunidad Wososopo); e) Almacenamiento de agua en tanques (Comunidad kouchachon); y f) Captación de agua lluvia (Comunidad Carrizal). Fuente:SciELO



Figura 12. Uso de los jagüeyes en la comunidad de Topia: a) Wayuu consumiendo agua; y b) Animales tomando agua. Fuente:SciELO.

En este contexto, la implementación de un sistema de potabilización de agua utilizando heliostatos representa una solución innovadora y aprovechable para estas comunidades. El diseño aquí presentado, utiliza heliostatos para concentrar la radiación solar y calentar el agua hasta alcanzar los 100°C, temperatura necesaria para eliminar microorganismos y contaminantes. La eficacia de este sistema radica en su capacidad para utilizar una fuente de energía abundante y gratuita en la región: la radiación solar.

Este enfoque es particularmente beneficioso en zonas apartadas donde la infraestructura para el suministro de agua potable es insuficiente y el acceso a recursos tradicionales es limitado. Si bien para lograr el rastreamiento, se requiere del uso de motores eléctricos, el consumo de energía es mínimo comparado con la ganancia térmica del sistema, además podría ser suplido con el uso de paneles fotovoltaicos y el concepto del heliostato autónomo.

La integración de tecnologías de energía solar concentrada puede, por lo tanto, transformar las condiciones de salud y bienestar de estas comunidades, proporcionando una fuente de agua segura y fiable.

5. Conclusiones

Uso de energía solar concentrada: El sistema de potabilización de agua utiliza heliostatos para concentrar la energía solar. Esto permite alcanzar las temperaturas necesarias para la evaporación del agua y la eliminación de microorganismos y contaminantes, demostrando un uso eficiente de la energía solar en zonas remotas.

Validación del modelo: La efectividad del sistema se validó mediante un prototipo de heliostato de 1.6 m², el cual concentra la radiación solar sobre una superficie de 0.19 m². Con una irradiación directa de alrededor de 1000 W/m², se logró una captación solar promedio de 323.15 W, resultando en una producción teórica de agua potable de 0,282 kg/h por cada metro cuadrado de superficie de espejos.

Simulación y análisis: El diseño del sistema se basó en simulaciones que utilizan el método de trazado de rayos de Montecarlo (MRT) y simulaciones termodinámicas. Los resultados evidencian la necesidad del uso de óptica secundaria para disminuir las pérdidas ópticas del sistema.

Aplicabilidad en comunidades remotas: Este sistema ofrece una solución sostenible para comunidades en zonas apartadas, como las comunidades indígenas Wayuu en La Guajira, Colombia. Al utilizar una fuente de energía abundante y gratuita, como la radiación solar, el sistema puede mejorar significativamente el

acceso a agua potable en áreas con infraestructura insuficiente, contribuyendo a la salud y el bienestar de estas poblaciones. El suministro de energía eléctrica necesario para el movimiento del sistema puede ser logrado a través del uso de pequeños paneles fotovoltaicos.

6. Referencias

- [1] L. G. Shrestha y R. Shrestha, «Ebullición | SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management!» Accedido: 19 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/ebullici%C3%B3n>
- [2] M. Romero y J. González-Aguilar, «Solar thermal CSP technology», *WIREs Energy Environ.*, vol. 3, n.º 1, pp. 42-59, 2014, doi: 10.1002/wene.79.
- [3] «TONATIUH.pdf». Accedido: 13 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cener.com/documentacion/TONATIUH.pdf>
- [4] «salasbernalrodolfoyerdm.pdf». Accedido: 13 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorioinstitucional.uson.mx/bitstream/20.500.12984/71111/1/salasbernalrodolfoyerdm.pdf>
- [5] M. J. Blanco, K. Milidonis, y A. M. Bonanos, «Updating the PSA sun position algorithm», *Sol. Energy*, vol. 212, pp. 339-341, dic. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.10.084.
- [6] Á. Delgado Mejía, L. Gaviria Sierra, S. Zapata Molina, J. D. Patiño Olaya, V. Cifuentes Durango, y M. Cardona Chaverra, «Los heliostatos como alternativa energética en zonas tropicales colombianas», *Inst. Univ. Pascual Bravo*, 2023, Accedido: 12 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.pascualbravo.edu.co/handle/pascualbravo/2103>
- [7] «Revista_de_Energias_Renovables_V2_N7_1.pdf». Accedido: 13 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Energias_Renovables/vol2_num7/Revista_de_Energias_Renovables_V2_N7_1.pdf
- [8] L. G. Palacín, A. Mutuberria, Í. Les, M. Burisch, A. Bernardos García, y M. Sánchez, «Tonatiuh, un trazador de rayos basado en simulación de Monte Carlo y con licencia GNU GPL», presentado en XXXVII Jornadas de Automática, Comité Español de Automática, 2016, pp. 1229-1236. Accedido: 19 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/29727>
- [9] J.S. Galeano-Gomez “Helióstatos: Caracterización Energética De Un Sistema CSP Desarrollado En Colombia”, tesis de ingeniería mecánica, Institución Universitaria Pascual Bravo, 2024.
- [10] A. R. Daza-Daza, C. A. Serna-Mendoza, A. Carabalí-Angola, A. R. Daza-Daza, C. A. Serna-Mendoza, y A. Carabalí-Angola, «The Water Resource in the Wayuu Indigenous Communities of La Guajira Colombiana. Part 2: Qualitative Study of the Conditions of Hygiene, Cleanliness and Water Availability», *Inf. Tecnológica*, vol. 29, n.º 6, pp. 25-32, dic. 2018, doi: 10.4067/S0718-07642018000600025.