

Diseño de un sistema de calentamiento solar para una industria alimentaria

Solar heating system design for the food industry

César Arnaldo Cisneros Ramirez^{1*} , Wilfredo Pérez Bermúdez² 

1. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER. La Habana, Cuba.
2. Ministerio de Industrias, Empresa de Refrigeración y Calderas, ALASTOR. La Habana. Cuba.

*Autor de correspondencia: cesar@mecanica.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 16 de agosto de 2025

Aceptado: 10 de septiembre de 2025

Publicado: 15 de septiembre de 2025

Resumen

Es de interés la incorporación de las fuentes renovables de energía en la matriz energética de las industrias alimentarias. El objetivo de este trabajo fue el diseño de un sistema de calentamiento para una fábrica de la industria alimentaria, para ello se seleccionaron colectores concentradores con el objetivo de alcanzar temperaturas de 130 °C en el fluido de trabajo. Se logró la distribución del sistema colectores e hidráulico que cubre el 71 % de la demanda de la industria. Además, se determinaron los siguientes indicadores técnicos y de operación: la masa específica ($\text{kg}_{\text{tubería}}/\text{m}^2_{\text{col}}$), que se define como la masa del sistema de tubería respecto al área

total de colectores; la relación entre la potencia de bombeo y la potencia térmica ($W_{\text{bom}}/\text{kW}_{\text{térm}}$); longitud de tuberías por metros cuadrados de área colectora ($\text{m}/\text{m}^2_{\text{col}}$), la potencia específica ($\text{kW}_{\text{hid}}/\text{m}^2_{\text{col}}$) que es la relación entre la potencia de bombeo y el área de colección, y capacidad de almacenamiento ($\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{col}}$) referida al área de colección, los cuales fueron comparados con indicadores de referencia..

Palabras claves: energía solar, industria alimentaria, campo solar, calentamiento solar.

Abstract

The introduction of the solar energy in the industrial sector was the objective of this work, for which a heating system was calculated for the food industry, was chosen and for this purpose concentrating collectors were selected with the objective of reaching temperatures of 130 °C in the working fluid. The distribution of the collector and hydraulic system was achieved, covering 71 % of the industry's demand. In addition, the following technical and operation indicators were determined: the specific mass ($\text{kg}_{\text{pipe}}/\text{m}^2_{\text{coll}}$) defined as the the mass of the piping system with respect to total

collector area; the ratio between pumping power and thermal power ($W_{\text{pump}}/\text{kW}_{\text{therm}}$); the pipe length per square meter ($\text{m}/\text{m}^2_{\text{coll}}$); specific power ($\text{kW}_{\text{pump}}/\text{m}^2_{\text{coll}}$), which is the ratio between pumping power and collector area; and the storage capacity ($\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{coll}}$) relative to the collection area. These were compared with reference indicators.

Key words: solar energy, food industry, solar field, solar heating.

Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

Cisneros Ramirez CA, Pérez Bermúdez W. Diseño de un sistema de calentamiento solar para una industria alimentaria cubana. Ingeniería Mecánica. 2025;28:e714. <https://goo.su/2Vuyq>

1. Introducción

El desarrollo del empleo de la energía solar está encaminado, en lo fundamental, al calentamiento de agua sanitaria, ya sea doméstico o en instalaciones hoteleras. La utilización de esta energía en aplicaciones industriales aún es incipiente. El estudio de posibilidades de aplicación industrial de la energía solar contribuye a determinar las posibilidades y nichos en los cuales emplear esta fuente de energía en el entorno industrial.

Los valores de temperatura en el rango de 60 °C a 150 °C son frecuentes en diversos sistemas industriales y sobre todo en la industria destinada a la producción de alimentos [1, 2].

Estos valores de temperaturas son factibles de obtener con el empleo de la fuente de energía solar y el empleo de captadores solares sin concentración para bajas temperaturas < 100 °C y captadores concentradores para temperaturas medias $t < 200$ °C [3, 4].

Hasta 2020 han sido instaladas en el mundo unas 95 plantas solares en la industria alimenticia con un total de capacidad de global de 41MWh [5].

Al diseñar sistemas de calentamiento solar la temperatura de entrada del fluido afecta positivamente el tamaño del sistema y tiempo de operación, permitiendo que se cumpla con la demanda térmica del proceso. Sin embargo, altas temperaturas de entrada requieren sistema de almacenamiento [6, 7]

El objetivo de este trabajo fue el diseño de un sistema de calentamiento para una fábrica de la industria alimentaria. Los indicadores de operación y técnicos calculados concuerdan con los valores de referencia, lo cual demuestra que el sistema propuesto se comporta de forma similar a sistemas existentes.

2. Métodos y Materiales

2.1. Acople del campo solar al proceso

La figura 1 muestra el esquema que se propuso de funcionamiento integrado de la instalación. En el mismo se observan los valores de temperaturas que se deben obtener en cada tramo del sistema. Además, se muestra el tanque de inercia y las válvulas y medidores de flujos necesarios para lograr un funcionamiento estable. Entre el campo solar y el proceso industrial se coloca el tanque de inercia, el cual tiene la misión de absorber los desbalances energéticos entre la producción solar y la necesidad energética del proceso de producción. El intercambiador escogido entre el circuito solar con el circuito de acumulación es del tipo de placa. La válvula 1 es de tres vías y con ella se desvía el agua que sale del proceso directamente a la caldera en caso de que el calor solar (en el tanque de inercia) no sea suficiente para cumplir con la demanda energética.

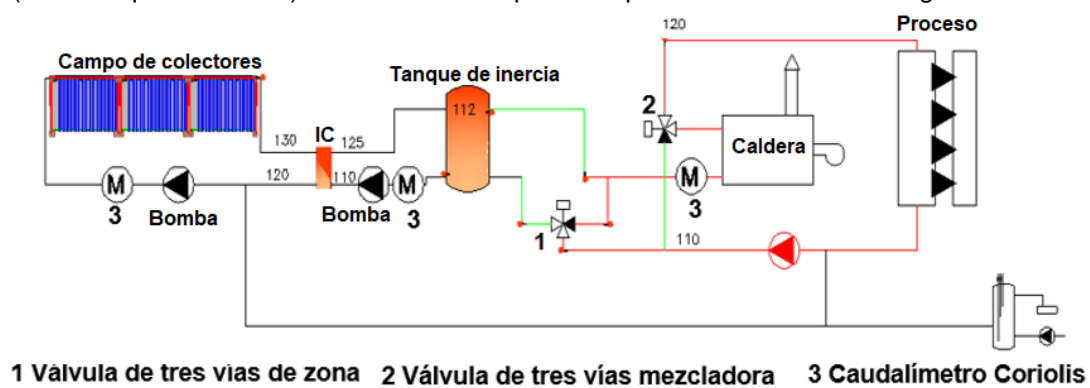


Fig. 1. Acople del campo solar al proceso. Fuente: autores

Cálculo del campo solar

Para determinar la dimensión o área del campo de colectores se partió de las exigencias energéticas del proceso de calentamiento de la fábrica. Se exige que la temperatura del agua de calentamiento y su caudal deben ser 110 °C y 11238 l/h respectivamente. La potencia térmica requerida para el proceso es de 177,7 kW. La potencia térmica o calor útil a aportar el campo solar se tomó 10 % mayor que la potencia térmica requerida y se determinó con la ecuación (1):

$$q_{\text{útil}} = 1.1 q_{\text{demanda}} \quad (1)$$

Donde:

$q_{\text{útil}}$: es el flujo de calor útil, W

q_{demanda} : es la potencia requerida por la fábrica, W

El calor útil en el colector viene dado por la elevación de temperatura obtenida del fluido de trabajo y se determina según la ecuación (2) [3]:

$$q_{\text{útil}} = \dot{m} c_p (t_{\text{salida}} - t_{\text{entrada}}) \quad (2)$$

Donde:

$q_{\text{útil}}$: es el flujo de calor útil, W

\dot{m} : es el flujo másico, kg/s

c_p : es el calor específico del fluido, kJ/(kg*K)

t_{salida} : es la temperatura del fluido a la salida del campo solar, °C

t_{entrada} : es la temperatura del fluido a la entrada al campo solar, °C.

Este calor útil también puede determinarse por la ecuación (3), la cual es resultado del balance de energía en el colector, es decir, el calor útil es la diferencia entre el calor absorbido menos las pérdidas térmicas:

$$q_{\text{útil}} = G_c A (\tau \alpha) - U_{\text{pérdidas}} A (t_c - t_{\text{amb}}) \quad (3)$$

Donde:

G_c : es la irradiación sobre el campo colector, W/m²

A : es la superficie total de captación del colector, m

τ : es el coeficiente de transmisión de la cubierta

α : es el coeficiente de absorción del absorbente

$U_{\text{pérdidas}}$: es el coeficiente de pérdidas de calor del colector, W/(m²*K)

t_c : es la temperatura del colector, °C

t_{amb} : es la temperatura ambiente, °C

La ecuación (3) es común emplearla a partir del conocimiento de la eficiencia del colector en la forma de la ecuación (4):

$$q_{\text{útil}} = \eta_{\text{col}} G_c A_{\text{col}} \quad (4)$$

Donde

η_{col} : es la eficiencia del colector, -

A_{col} : es el área total de colección, m²

El área total de colección se determinó según la ecuación (5):

$$A_{\text{col}} = \frac{q_{\text{útil}}}{G_c \eta_{\text{col}}} \quad (5)$$

La cantidad de colectores se determina según la ecuación (6)

$$N_{\text{col}} = \frac{A_{\text{col}}}{A_{\text{uol}}} \quad (6)$$

Donde

A_{uol} : es el área de un colector, m²

2.2. Sistema de tuberías del campo solar

Las tuberías del campo solar están compuestas por la tubería principal y las tuberías de ramificación. La primera es aquella por donde circula todo el caudal del sistema (m_{total}) y las de ramificaciones son las que distribuyen el fluido a las unidades colectoras, figura 2.

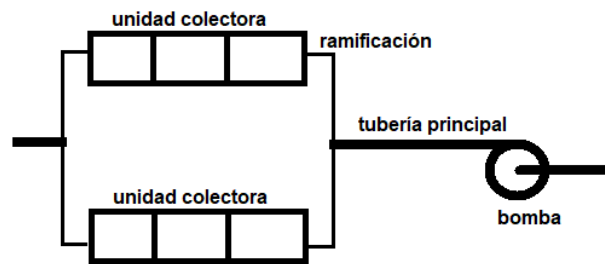


Fig. 2. tubería principal y ramificaciones. Fuente: autores

Las tuberías seleccionadas son de acero y el diámetro de las mismas se determinó según el flujo (m) que circula por cada una de ellas según la ecuación (7) [4, 5]. El diámetro se normalizó según la norma ASTM A-53 GRADO B/ASTM A-106/API 5L

$$d_i = \sqrt{\frac{4 m}{\pi \rho u}} \quad (7)$$

Donde:

d : es el diámetro de la tubería, m

m : es el flujo de fluido por la tubería, kg/s

ρ : es la densidad del fluido, kg/m³

u : es la velocidad del fluido, m/s

El cálculo del sistema de tuberías se realizó con el criterio de igualdad de velocidad en todos los tramos de tuberías y, además se escogió el retorno invertido para facilitar la igualdad de flujo en cada tramo. Como las dimensiones de los diámetros de tuberías varían de forma discreta (no continua), entonces se prefirió variar la velocidad escogida y de aquí seleccionar el diámetro de tubería que se acercara a mantener una velocidad similar a la escogida. Las velocidades escogidas de circulación del fluido fueron entre 0,5 y 3 m/s, valores que son característicos en estos sistemas [6, 7]. El número de Reynolds siempre se mantuvo en valores de régimen turbulento ($> 10^4$) lo cual favorece el proceso de transferencia de calor en los colectores.

2.3. Caída de presión en el campo solar

El cálculo de la caída de presión en el sistema se determinó a partir de la caída de presión en las tuberías (Δp_{tub}), en accesorios o efectos locales (Δp_{acc}), en los colectores (Δp_{colec}) y en el intercambiador de calor (Δp_{inter}) [8, 9]. Cada uno de estos componentes de la caída de presión se determinó a través de las ecuaciones (8), (9) y (10).

$$\Delta p_{\text{tub}} = \xi \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2} \quad (8)$$

$$\text{Si } \begin{cases} \text{Re} < 2300 & \xi = \frac{64}{\text{Re}} \\ \text{Re} \geq 2300 & \xi = (0,790 \ln(\text{Re}) - 1,64)^{-2} \end{cases} \quad (9)$$

$$\Delta p_{\text{acc}} = \sum \xi \frac{\rho u^2}{2} \quad (10)$$

Donde:

Δp_{tub} : es la caída de presión en las tuberías, Pa

Δp_{acc} : es la caída de presión en accesorios, Pa

u : es la velocidad del fluido, m/s

L : es la longitud de la tubería, m

D : es el diámetro de la tubería, m

ρ : es la densidad del fluido, kg/m³

f : es el factor de fricción, -

ξ : es el coeficiente de pérdida local del accesorio correspondiente, -

Re : es el número de Reynolds -.

La caída de presión total (Δp_{total}) que debe vencer la bomba viene dada por la ecuación (11) [10, 11]:

$$\Delta p_{\text{total}} = \Delta p_{\text{tub}} + \Delta p_{\text{acc}} + \Delta p_{\text{colec}} + \Delta p_{\text{interc}} \quad (11)$$

Para la selección de la bomba que debe vencer la caída de presión total (Δp_{total}) que impone el sistema, se calcula la potencia de la misma teniendo en cuenta el flujo total (\dot{m}_{total}) por la ecuación (12) [8]

$$P = \frac{\dot{m}_{\text{total}} \Delta p_{\text{total}}}{\rho \eta_{\text{bomba}}} \quad (12)$$

Donde:

P : potencia de la bomba, W

ρ : densidad del agua, kg/m³.

η_{bomba} : es la eficiencia de la bomba, -

\dot{m}_{total} : es el flujo total que mueve la bomba, kg/s

Para el sistema de tuberías se seleccionó el retorno inverso por ser este el que provoca menor caída de presión [12]

2.4. Sistema de inercia

El volumen del tanque de inercia se determinó, ecuación (13) para un tiempo de autonomía de 2 horas, es decir, el tiempo que el sistema puede trabajar sin recibir energía solar.

$$V = \frac{q_{\text{util}} \tau}{\rho c_p (t_{\text{trab}} - t_o)} \quad (13)$$

Donde:

V : es el volumen del tanque, m³.

ρ : es la densidad del agua, kg/m³.

τ : tiempo de autonomía de la instalación, h.

t_{trab} : temperatura requerida por la fábrica, °C.

t_o : temperatura ambiente, °C.

c_p : capacidad calorífica del agua, J/(kg*K)

2.5. Indicadores evaluados

Se determinaron indicadores que son útiles al evaluar o comparar los campos solares según [13, 14]. Estos indicadores son: la masa específica (kg_{tubería}/m²_{col}), que se define como la masa del sistema de tubería respecto al área total de colectores; la relación entre la potencia de bombeo y la potencia térmica ($W_{\text{bom}}/kW_{\text{term}}$); longitud de tuberías por metros cuadrados de área colectora (m/m²_{col}), la potencia específica ($kW_{\text{bom}}/m^2_{\text{col}}$) que es la relación entre la potencia de bombeo y el área de colección, y capacidad de almacenamiento (m³/m²_{col}) referida al área de colección.

3. Resultados y Discusión

El cálculo de la cantidad de colectores arrojó que el área necesaria para cumplir con las necesidades energéticas es de 340 m², lo cual corresponde con 101 colectores. El área disponible en la fábrica para la ubicación de los colectores es menor que el área de colectores necesaria, 340 m², por lo cual, solo es posible la ubicación de 75 concentradores cilíndrico-parabólicos conformados en 25 unidades colectoras. Para lograr la temperatura exigida para el calentamiento se necesitó de tres colectores ubicados en serie, y cada tres colectores en serie se le denominó una unidad colectoras. Estas unidades colectoras fueron ubicadas en dos secciones, A y B, figura 3. La sección A quedó formada por 5 unidades colectoras y la sección B por 20 unidades colectoras.

Esta cantidad de unidades colectoras forman un área de captación de $250,8 \text{ m}^2$, que comparada con la necesaria para cubrir las necesidades energéticas dan un déficit de área de 89 m^2 , que se traduce en un déficit energético de $51,25 \text{ kW}$. Este déficit tiene que ser cubierto por la caldera existente en la fábrica.

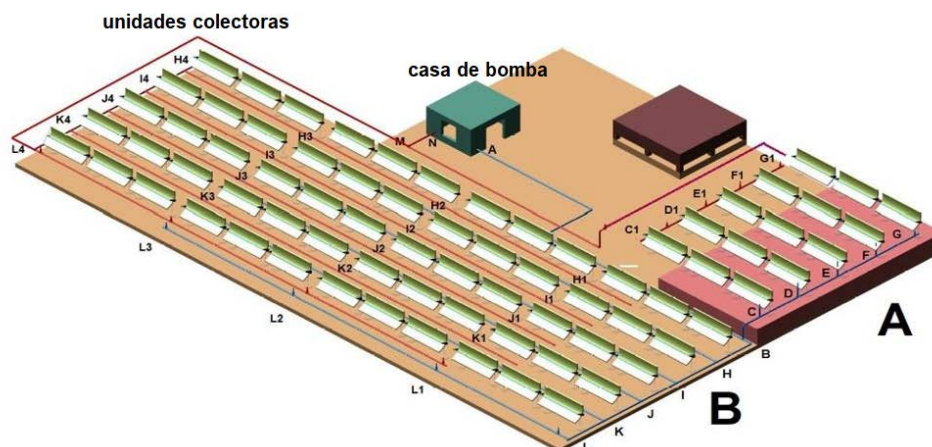


Fig. 3. Distribución de los colectores. Fuente: autores

El cálculo del sistema de tuberías se realizó a partir de evaluar la influencia de la velocidad de circulación del fluido por todo el campo solar y para ello se trabajó con las velocidades recomendadas para circuitos de calentamiento de agua, las cuales oscilan entre $0,5 \text{ m/s}$ y 3 m/s , según [Guía de Energía Solar Térmica de Concentración para Procesos Industriales](#). El área de flujo de la tubería por donde circula el fluido está definida por el diámetro de la tubería y a su vez este tiene relación inversa con la velocidad con la que circula el fluido por la tubería. Se obtuvo que para velocidad de $0,5 \text{ m/s}$ se necesitaban 7 valores de diámetros de tubería y para 3 m/s este valor fue disminuido a 3. Esta disminución del número de valores de diámetros favorece a la simplificación del suministro y montaje de las tuberías y también a la masa de materiales y peso de la instalación. Por otro lado, el aumento de la velocidad implica una mayor caída de presión en las tuberías con su consiguiente elevación del consumo de energía por bombeo.

Con velocidad de 2 m/s se obtuvieron 4 valores de diámetros: $48,3$; $42,4$; $33,7$ y $26,9 \text{ mm}$.

Los valores de los indicadores se calcularon para la velocidad de 2 m/s , con la cual se obtuvieron valores dentro del rango de los de referencia. Estos resultados son comparados con los publicados y extraídos de trabajos líderes en el empleo solar para el calentamiento industrial [14-16]. Valores de referencia y los valores obtenidos para este trabajo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación de valores de indicadores estimados para el Proyecto y los de referencia. Fuente: autores

Valores de referencia	Referencias [14-16]	Proyecto
Masa específica ($\text{kg}_{\text{tubería}}/\text{m}^2_{\text{col}}$)	$0,5 - 0,9$	$0,57$
Potencia hidráulica /potencia térmica ($W_{\text{bom}}/\text{kW}_{\text{térm}}$)	$1,2 - 1,4$	$1,25$
Longitud específica de tubería ($\text{m}/\text{m}^2_{\text{col}}$)	$0,05 - 0,15$	$0,085$
Potencia específica de bombeo ($\text{kW}/\text{m}^2_{\text{col}}$)	$\sim 0,0005 - 0,0015$	$0,0008$
Capacidad de almacenamiento ($\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{col}}$)	$\sim 0,5 - 1,5$	$0,37$

Se observa que para este trabajo los valores de los indicadores son aproximados a los límites inferiores de los valores de referencia. Los valores de referencia son obtenidos para instalaciones de consumo energético entre 30 MWh y 100 MWh . En el caso de este trabajo el consumo energético es mucho más pequeño, $4,5 \text{ MWh}$, lo cual conlleva a que los indicadores oscilen en los menores valores.

Conclusiones

Se logró el cálculo de un sistema de calentamiento solar con el empleo de concentradores solares para una industria alimentaria. El sistema cubre el 71% de la demanda con un área total de $250,8 \text{ m}^2$. Se propuso la distribución de los colectores y sistema de tuberías con tres colectores en serie y 25 lazos con lo cual se cubre toda el área de techo posible a cubrir. El sistema de tuberías quedó formado por tuberías distribuidas por 4 diámetros diferentes.

Los indicadores de operación y técnicos calculados concuerdan con los valores de referencia, lo cual demuestra que el sistema propuesto se comporta de forma similar a sistemas existentes.

Referencias

1. Fuentes Silva AL, Velázquez Torres D, Picón Núñez M, Martínez Rodríguez G. Solar Thermal Integration With and Without Energy Storage: the Cases of Bioethanol and a Dairy Plant. *Chemical Engineering Transactions*. 2020;81:493-8. <https://doi.org/10.3303/CET2081083>
2. Moreno C, Cisneros C, Sarmiento A, Morales J, Piloto R, Oliva D, et al. Fuentes renovables de energía. Tecnologías y aplicaciones. Habana, Cuba: Editorial Cubasolar; 2022. https://www.researchgate.net/publication/360120461_FUENTE_S_RENOVABLES_DE_ENERGIAS
3. Wu C, Zhao Y, Li W, Fan J, Xu H, Ling Z, et al. Concentrated Solar Thermal Power Technology and Its Thermal Applications. *Energies*. 2025;18(8):2120. <https://doi.org/10.3390/en18082120>
4. Marzouk OA. Solar Heat for Industrial Processes (SHIP): An Overview of Its Categories and a Review of Its Recent Progress. *Solar*. 2025; 5(4):46. <https://doi.org/10.3390/solar5040046>
5. Ismail MI, Yunus NA, Hashim H. Integration of solar heating systems for low-temperature heat demand in food processing industry – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;147:111192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111192>
6. Farjana SH, Mahmud MAP, Huda N. Solar process heat integration in lead mining process. *Case Studies in Thermal Engineering* 2020;22:100768. DOI 10.1016/j.csite.2020.100768
7. Lizárraga Morazán JR, Martínez Rodríguez G, Fuentes Silva AL, Picón Núñez M. Selection of solar collector network design for industrial applications subject to economic and operation criteria. *Energy & Environment*. 2020; 32(8):1504-23. <https://doi.org/10.1177/0958305X20927375>
8. Munson BR, Okiishi TH, Huebsch WW, Rothmayer AP. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 7th edition. USA: Wiley; 2013. <https://dokumen.pub/qdownload/fundamentals-of-fluid-mechanics-7nbsped-1118116135.html>
9. Stipanic D, Travas V, Kranjcevic L, Holjevic, D. An Iterative Algorithm for Optimizing Pipe Diameter in Pressurized System. *Technical Gazette*. 2020;27(4):1284-92. <https://doi.org/10.17559/TV-20190305122027>
10. Rinaldi, Weriono, Isra A, Darmawan A. Numerical Modification of Piping Systems to Increase Flow Velocity in Receiving Facilities. *Journal of Mechanical Engineering, Manufactures, Materials and Energy*. 2024;8(1):11-19. DOI 10.31289/jmemme.v8i1.10254.
11. Philip Ohneweina RH. A Novel Approach to the Analysis of Hydraulic Designs in Large Solar Collector Arrays. In: *International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, SHC 2013*. Freiburg, Germany; 2013. https://solarthermalworld.org/wp-content/uploads/2016/01/parasol_shc_paper_final_2013-09-20.pdf
12. Tasmin N, Farjana SH, Hossain MR, Golder S, Mahmud MAP. Integration of Solar Process Heat in Industries: A Review. *Clean Technologies*. 2022;4(1):97-131. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4010008>
13. Mehos M, Price H, Cable R, Kearney D, Kelly B, Kolb G, Morse F. *Concentrating Solar Power Best Practices Study*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5500-75763.2020. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75763.pdf>
14. Knabl S, Fink C, Philip Ohnewein, Franz Mauthner, Hausner R. Requirements & guidelines for collector loop installation. IEA-SHC TECH SHEET 45.A.2. 2014. <https://task45.iea-shc.org/data/sites/1/publications/IEA-SHC-T45.A.2-TECH-Collector-loop-reqs.pdf>
15. Fan J, Tian Z, Furbo S, Kong W, Tschopp D. Task 55 Towards the Integration of Large SHC Systems into DHC Networks C-D1. Simulation and design of collector array units within large systems. 2019. <https://task55.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-T55-C-D.1.2-FACT-SHEET-Solar-radiation-modelling-on-tilted-surfaces-based-on-global-radiation.pdf>

Editores:

Alberto Julio Rodríguez Piñeiro, Vladimir Tomás González Fernández.
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría

Evaluación

Este artículo ha sido evaluado mediante revisión por pares abierta.

Ingeniería Mecánica agradece a los árbitros: Dr. C. Josué Imbert González, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba y al Dr. C. Joel Morales Salas, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, por su contribución a la evaluación de este trabajo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

César Arnaldo Cisneros Ramírez.

Participó en el diseño de la investigación, investigación bibliográfica, en el diseño y cálculo del campo solar, análisis de los resultados y en la revisión crítica del contenido del trabajo, redacción y aprobación del informe final.

Wilfredo Pérez Bermúdez.

Participó en el diseño de la investigación, investigación bibliográfica, en el diseño y cálculo del campo solar, análisis de los resultados y en la revisión crítica del contenido del trabajo, redacción y aprobación del informe final.