

Recibido 18 de agosto de 2023. Aceptado 07 de marzo de 2024. Publicado 31 de mayo de 2024.

ISSN: 2448-7775

# Diseño de un sistema de captación solar para sustituir combustibles fósiles en procesos de saponificación

**JUAN RAMÓN LIZÁRRAGA MORAZAN, MARTÍN PICÓN NÚÑEZ\***

Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

\*Autor de Correspondencia: picon@ugto.mx

**RESUMEN** Una de las tecnologías de colectores solares más flexibles por el manejo de amplios rangos de temperatura es el de tipo parabólico, PTC por sus siglas en inglés (parabolic trough collector), que tiene con una amplia variedad de aplicaciones industriales. El diseño y predicción del desempeño térmico de estos colectores es fundamental para desarrollar procesos robustos con costos asequibles y capaces de ser alternativas factibles para sustituir la fuente de energía térmica en procesos industriales. En este trabajo se desarrolla un modelo transiente validado con datos experimentales y con otros modelos reportados en la literatura para uso en el dimensionamiento de plantas solares. El estudio teórico se complementa con el Valor Presente de los Ahorros del Ciclo de Vida (*VPACV*), con lo que se determina la factibilidad económica comparando los beneficios respecto del proceso convencional que emplea combustible fósil. Empleando datos ambientales diarios y estacionales, se diseña un proceso alternativo de una red termosolar que provee los requerimientos térmicos de un proceso de separación de ácidos grasos que son materia prima en la creciente industria de la saponificación. El campo termosolar dimensionado cumple con la carga térmica requerida de 1 MW a 260°C, con una superficie de 1,734 m<sup>2</sup> de captación, menor al área disponible de 1,850 m<sup>2</sup>, siendo capaz de proveer en invierno y verano una fracción solar de 0.9 y 1.1, con valores del VPACV de \$1,483,533 y \$ 336,239 USD; respectivamente.

**PALABRAS CLAVE**— Energía solar térmica, colectores solares de tipo parabólico, desempeño térmico, dimensionamiento de campos termosolares, saponificación.

## I. INTRODUCCIÓN

El tamaño del mercado de los detergentes y jabones en el año 2021 fue de 36.61 billones USD, con un crecimiento esperado del 5.8 % para los siguientes años, impulsado por las condiciones originadas por la pandemia del COVID – 19 [1]. El proceso de saponificación emplea los ácidos grasos como materia prima; los que se a su vez se pueden obtener industrialmente mediante el proceso Colgate-Emery, el que requiere de la energía térmica del vapor como medio de separación [2]. Por otro lado, el sector industrial, que es un pilar económico mundial; es el mayor consumidor de energía. Más del 30 % de la producción energética se destina a procesos térmicos industriales [3]. Los tratados locales e internacionales plantean el empleo de energías limpias en los procesos productivos. En este contexto, la energía solar es una fuente alternativa limpia y potencialmente ilimitada, que actualmente es aprovechada empleando diferentes tecnologías de captación [4]. La tecnología PTC es líder en el mercado de las redes solares, reportándose que en el año 2022 tenía una participación del 90 % [5]. Una característica fundamental de estos equipos es su gran flexibilidad, con un rango de aplicación de temperatura entre 50 y 400 °C [6].

Dada la importancia que presenta la tecnología PTC en el campo de las redes solares, resulta necesario el desarrollo de modelos robustos para estimar el comportamiento térmico. Se tienen en literatura varios modelos matemáticos planteados en estado estacionario y transiente. Algunos de ellos se resuelven mediante algún lenguaje computacional, mientras que otros emplean softwares comerciales para su solución.

Entre los modelos reportados que se resuelven con software comercial se encuentran los siguientes: Krishna et al. [7], emplearon la plataforma TRNSYS para simular un sistema solar de calentamiento de agua para el sector residencial con la tecnología PTC considerando cambio de fase. Esta aplicación se reporta para la ciudad de ciudad de Mangalore, India. Los resultados fueron exitosos, concluyendo que el sistema es capaz de cumplir con los requerimientos térmicos. Por su parte, Mouaky et al. [8], simularon un equipo PTC de cuatro módulos desarrollado por Soltigua en la plataforma Ebsilon® Professional, y lo validaron con datos operacionales en condiciones de cielo despejado con una desviación máxima de 4.8 %. Zima et al. [9] desarrollaron un modelo unidimensional para simular la operación transiente de un PTC con tubo en U de uso en el

sector residencial. El modelo fue comparado exitosamente con otro modelo tridimensional codificado en Ansys Fluent CFD y con valores experimentales.

En lo que respecta a modelos publicados resueltos a través de un código o lenguaje, se presentan los siguientes: Xu et. Al. [10], elaboraron y validaron un modelo unidimensional en estado transiente y realizaron un estudio paramétrico de la temperatura de entrada del fluido de trabajo (HTF, por sus siglas en inglés), las condiciones ambientales y de la eficiencia óptica. Por su parte, Ferchichi et al. [11] desarrollaron un modelo discretizado para estudiar el cambio de fase y de la transferencia de energía para un sistema de generación directa de vapor (DSG- Direct Steam Generation) que emplea el equipo PTC. El código se desarrolló en el lenguaje C++. Este modelo fue validado con datos experimentales. Por su parte Behar et al. [12], desarrollaron un modelo en estado estacionario que fue comparado con otro generado en la plataforma EES, y con datos experimentales, obteniendo un alto ajuste térmico con respecto a los datos experimentales con una incertidumbre del 0.64 %.

De las investigaciones anteriores se infiere que tanto los modelos estacionarios como los transientes predicen satisfactoriamente el comportamiento térmico, siendo el transiente quien presenta ventajas en el campo del control a costa de mayores requerimientos computacionales. Adicionalmente, todos estos modelos son validados bajo condiciones ambientales fijas, y con periodos de tiempo de análisis cortos (de tres a cuatro días), por lo que el rango de investigación no comprende la totalidad de las condiciones diarias y estacionales que ocurren a lo largo del año. En esta investigación se propone el desarrollo de un modelo unidimensional transiente validado con datos experimentales reportados en la literatura, que se prueba bajo diversas condiciones diarias y estacionales. El modelo se emplea para el diseño de una planta termosolar que suministra la energía térmica requerida para la operación de un proceso industrial de saponificación. El modelo adicionalmente calcula el valor presente neto del ahorro del ciclo de vida, herramienta fundamental que determina la viabilidad económica de un proyecto térmico solar.

## II. METODOLOGÍA

En la Fig. 1 se presenta un esquema simplificado del equipo PTC. A continuación, se presentan las expresiones que forman el modelo térmico propuesto.

$$\frac{dQ}{dt} = F_R [G_{BH} \eta_0 A_a - A_r U_L (T_i - T_a)] \quad (1)$$

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{1}{\pi \sin(\theta_m)} = C \quad (2)$$

$$U_L = \left[ \frac{A_r}{(h_{r,i} + h_{r,c-a}) A_a} + \frac{1}{h_{r,p-c}} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$h_{r,c-a} = 4\sigma\epsilon_g T_g^3 \quad (4)$$

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma(T_p - T_g)(T_p^2 + T_g^2)}{\left(\frac{1}{\epsilon_p}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_g} - 1\right)\left(\frac{A_r}{A_a}\right)} \quad (5)$$

$$F_r = \frac{\dot{m}c_p}{A_r U_L} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{U_i F' A_r}{\dot{m}c_p}\right) \right] \quad (6)$$

$$F' = \frac{1}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_0}{h_w D_i} + \left[ \frac{D_0}{2k_r} \ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right) \right]} \quad (7)$$

$$D_0 = 2r \sin(\theta_m) \quad (8)$$

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos(\varphi_r)} \quad (9)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{m}c_p (T_0 - T_i) \quad (10)$$

$$A_g (h_{r,c-a} + h_{c,c-a})(T_g - T_a) - A_r h_{r,p-c} (T_p - T_g) = 0 \quad (11)$$

$$T_p = \frac{Q}{h_w \pi D_i L} + T_f \quad (12)$$

Donde  $G_{BH}$  es la radiación solar directa,  $A_a$  y  $A_r$  son el área de apertura y el área del receptor, respectivamente;  $Q$  es el calor ganado por el HTF;  $F_R$  factor de remoción;  $U_L$  coeficiente global de pérdidas;  $\theta_m$  es el ángulo de aceptación medio;  $T_i$ ,  $T_0$ ,  $T_a$ ,  $T_p$  y  $T_g$  son las temperaturas de entrada y salida del tubo receptor, temperatura ambiente, y temperatura promedio de la pared del tubo receptor y del envoltorio de vidrio, respectivamente;  $\epsilon_p$  emitancia del tubo receptor,  $\epsilon_g$  y  $T_g$  emitancia y transmitancia del envoltorio de vidrio;  $F'$  el factor de eficiencia térmica;  $D_i$  y  $D_0$  diámetro interno y externo del tubo receptor;  $\dot{m}$  y  $c_p$  son el flujo másico y la capacidad calorífica del HTF;  $C$  es el factor de concentración solar;  $f$  es la distancia focal de parábola;  $h_w$ ,  $h_{r,c-a}$  y  $h_{r,p-c}$  son el coeficiente convectivo de transferencia de calor del HTF, el de radiación de la cubierta de vidrio al ambiente, y el de radiación del tubo receptor a la cubierta de vidrio, respectivamente;  $r_r$  es el radio del tubo; y  $\varphi_r$  es el ángulo difuso.

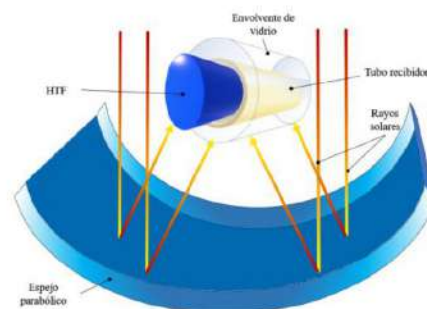


Fig. 1. Representación esquemática del PTC.

El balance de energía transiente se resuelve numéricamente empleando la metodología de Runge-Kutta de quinto orden de Butcher [13]. Se emplean datos ambientales de irradiancia, temperatura ambiente, velocidad del viento diarios y estacionales recolectados para la ciudad de Guanajuato en las instalaciones de la Universidad de Guanajuato Sede Pueblito de Rocha (21.0190° N, 101.2574° W). Para la solución del modelo, se creó un código en la plataforma MatLab.

Para determinar la factibilidad económica, el modelo propuesto trabaja enlazado con el modelo de Valor Presente del Ahorro del Ciclo de Vida (*VPACV*), que básicamente determina la diferencia entre el costo del ciclo de vida de un sistema que provee una demanda energética empleando energía fósil convencional (combustible fósil) y el costo del ciclo de vida de un sistema solar que provee la misma demanda energética en un horizonte de tiempo determinado. El ahorro del ciclo de vida determina el valor presente neto de la ganancia del sistema solar comparado con el del sistema convencional [6]. El sistema tiene una mayor factibilidad económica en la medida en que el *VPACV* se incrementa. Se empleó la metodología reportada por Caballero et al. [14] para el desarrollo matemático del *VPACV*.

La metodología de cálculo para un equipo se extendió y codificó para una red de colectores que da servicio a la planta industrial. El sistema se le alimentan los datos térmicos del proceso convencional, los datos ambientales diarios para invierno y verano en un intervalo de tiempo de 9 a 18:00 h, el área disponible y la geometría del PTC que conformará la red. Se realiza entonces un análisis paramétrico. Para la selección de las condiciones operativas de la red y su dimensionamiento, se emplearon dos indicadores: el *VPACV*, y la relación de calor útil integrado (*CUI*) a área total de la red ( $A_{red}$ ). El calor útil integrado representa la energía total que proporciona la red termosolar al nivel de temperatura requerido por el proceso [15] y se calcula con la Ec. (17).

$$CUI = \int_{t=9h}^{t=18h} q_i dt \quad (17)$$

Donde  $q_i$  es el calor instantáneo que absorbe el HTF al nivel temperatura requerido por el proceso.

Un concepto importante en el análisis es la fracción solar,  $sf$ , que aparece en la Ec. (18), que representa el desempeño térmico de la red y se define como:

$$sf = \frac{CUI}{Q_p} \quad (18)$$

Donde  $Q_p$  es la carga térmica total que demanda el proceso en kW.

### III. RESULTADOS

#### A. VALIDACIÓN DEL MODELO

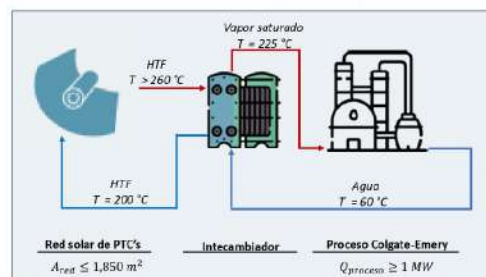
La validación del modelo se realizó con los datos experimentales presentados por el Sandia National Laboratory (SNL) [XVII] para colectores comerciales considerando que existe vacío en el espacio de la envolvente de vidrio. Las pruebas experimentales se realizaron con un colector solar LS-2 instalado en la plataforma giratoria AZTRAK en las instalaciones del SNL [16]. Con el modelo propuesto se obtiene un error cuadrático medio (RMSE) entre la temperatura teórica de salida y la experimental de 1.39 °K, con un error promedio de 0.24 %. Además, se realizó una comparación del grado de ajuste del modelo propuesto con otros reportados en literatura. En la *Tabla I* se presentan los resultados comparativos de eficiencia térmica ( $\eta_t$ ) y pérdidas térmicas.

#### B. CASO DE ESTUDIO

Se diseñó una red termosolar de PTC para suministrar 1 MW de energía térmica a 225°C a una planta de producción de jabón y detergentes localizada en Guadalajara Jalisco, Mx. El objetivo es reducir los costos operativos y de emisiones de CO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>. Después de un análisis económico se decide cotizar a un proveedor una red termosolar para producir vapor saturado a 200 °C que se usará para la etapa de separación de ácidos grasos que emplea el proceso Colgate-Emery. El proceso de producción de vapor requiere de una caldera de gas natural, con una carga térmica de 1MW para elevar la temperatura del agua que entra a 60 °C. La industria cuenta con un área disponible para la instalación de la red de 1,850 m<sup>2</sup>. El proceso opera 8 horas al día durante 330 días al año. En la *Fig. 2* se presenta un diagrama del proceso con la red termosolar.

**TABLA I.** COMPARACIÓN DEL RMSE PARA ALGUNOS MODELOS

Modelos	$\eta_t$ (%)	Pérdidas térmicas (W/m <sup>2</sup> )
Nuevo modelo	1.019	0.368
Yilmaz y Söylemez [17]	0.766	4.638
Padilla et al. [18]	1.012	10.255
NREL [19]	1.382	14.718
García-Valladares y Velázquez [20]	1.433	--



**Fig. 2.** Representación esquemática del proceso integrando la red termosolar.

En la **Tabla II** se presentan las dimensiones del PTC comercial que se usa en este trabajo [21].

El flujo másico máximo por línea reportado en literatura es de 1 kg/s para líneas de longitud total de hasta 150 m ([16], [22]). La relación  $CUI/A_{red}$  para redes pequeñas de PTC instaladas que manejan rangos de temperatura baja es de 0.7  $\text{kW/m}^2$  [23]. Estos datos se emplearon con fines comparativos durante el análisis paramétrico. El primer paso del diseño consiste en la selección del tipo de fluido de transferencia de calor (por sus siglas en inglés, HTF) a utilizar en la red. La temperatura de entrada y salida seleccionadas son de 215°C y 225°C, respectivamente. Dada la amplia aplicación, los aceites térmicos que se analizaron son: Therminol VP-1, Dowtherm-A y Syltherm 800. El proceso implementará un circuito intermedio de generación de vapor a partir del aceite térmico debido a que el proceso Colgate-Emery requiere el contacto directo del vapor con las grasas; de esta manera no es factible el empleo de agua presionada como HTF. Se realizó un análisis paramétrico variando la longitud de la línea de 25 a 200 m, y el flujo másico de 0.1 a 2 kg/s. El análisis paramétrico en conjunto con los indicadores  $VPACV$  y  $CUI/A_{red}$  determina que el mejor HTF es el Dowtherm-A. En la **Tabla III** se presentan los resultados de los indicadores para los días típicos de invierno y verano. Comparando el valor del indicador  $VPACV$  para las estaciones estudiadas, se observa un incremento de un 62 % para el HTF Therminol VP-1, hasta un 76 % en el caso del Dowtherm A en la estación de verano, ya que es donde se tiene una mayor irradiancia directa diaria respecto de la estación de invierno; y, por tanto, una mayor captación solar de la red térmica; como lo muestra el indicador  $CUI/A_{red}$ .

Se realizó un segundo análisis paramétrico para determinar la longitud de la línea de la red. Como se muestra en la **Fig. 3**, el  $VPACV$  es altamente sensible a la longitud de la línea, debido a los costos de inversión y de bombeo. Adicionalmente, el impacto de la longitud de línea en el  $VPACV$  se puede aproximar a un comportamiento lineal, por lo que la relación de ambas variables es directamente proporcional. Por otro lado, el impacto que tiene la longitud de línea en el indicador de  $Q/A$  presenta un comportamiento no lineal con un máximo, el que puede ser determinado con el procedimiento paramétrico que se desarrolla en este trabajo, sin demeritar la importancia del  $VPACV$ .

Dado que se tiene la limitación de área para la instalación de la planta solar, es más importante maximizar la captación de energía por unidad de área ( $Q/A_{red}$ ). Se seleccionan los valores de longitud de la línea de 75 y 100 m y se varía el flujo másico para determinar el valor óptimo. En ambos casos, se encuentra que el flujo másico de 1.1 kg/s es el valor que maximiza el valor de los indicadores. En la **Fig. 4** se presenta el análisis paramétrico para  $L_{línea} = 100$  m. En esta figura se advierte que ambos indicadores presentan un comportamiento no lineal e inversamente proporcional al variar el flujo másico por línea, por lo que la parametrización

es una herramienta adecuada para identificar el valor que más favorece a ambos indicadores.

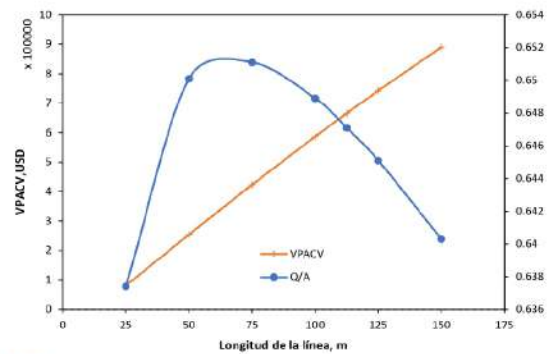
En la **Tabla IV** se presenta los datos de la red de colectores que brindan el servicio térmico a la planta.

**TABLA II.** GEOMETRÍA DEL PTC COMERCIAL.

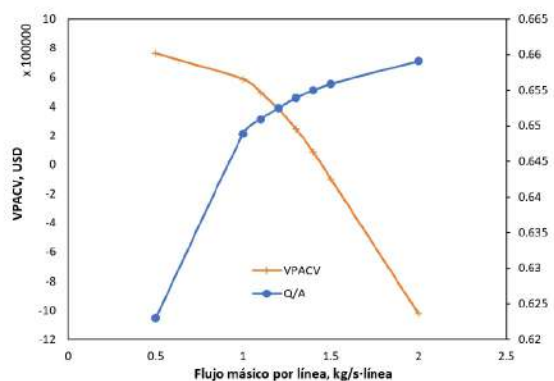
Geometría	Dimensiones, m
Apertura	5.78
Longitud	12.5
Distancia focal	1.71
Diámetro tubo receptor	0.07
Diámetro envoltorio vidrio	0.12

**TABLA III.** SELECCIÓN DEL HTF.

Indicadores	$CUI/A_{red}$ , $\text{kW/m}^2$		$VPACV$ , USD	
	VERANO	INVIERNO	VERANO	INVIERNO
Therminol VP-1	0.408	0.345	\$583,330	\$222,569
Syltherm 800	0.634	0.509	\$906,227	\$328,560
Dowtherm A	0.640	0.514	\$915,232	\$331,529



**Fig. 3.** Análisis paramétrico como función de la longitud de la línea.



**Fig. 4.** Análisis paramétrico para determinar el flujo másico de la línea. Línea = 100 m.

**TABLA IV.** RED TERMOSOLAR SELECCIONADA Y SUS CONDICIONES DE OPERACIÓN.

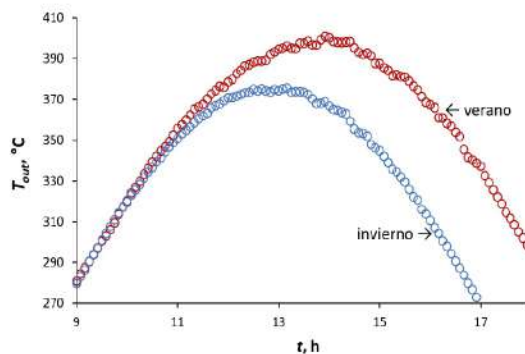
Características	Valores
Longitud de la línea, m	100
Apertura, m	5.78
# líneas de la red, m	3
Área total de la red, m	1,734
HTF	Dowtherm A
Flujo másico por línea, kg/s-línea	1.1
Temperatura de entrada, °C	215
Temperatura de salida mínima, °C	225

Como se observa en la **Tabla IV**, la planta solar puede ser instalada en la superficie disponible de 1,850 m<sup>2</sup>. En la **Tabla V** se presenta los resultados operativos térmicos y de los indicadores económicos.

**TABLA V.** RESULTADOS TÉRMICOS Y ECONÓMICOS DE LA RED DISEÑADA.

Resultados	Invierno	Verano
$CUI$ , kWh/año	2,386,319	2,979,653
Carga total que requiere el proceso, kWh/año	2,640,000	2,640,000
$CUI/A_{red}$	0.6509	0.5213
$VPACV$	\$336,239	\$1,483,533
Fracción solar	0.90	1.13

En la **Fig. 5** se presentan los perfiles de temperatura de instantánea que entrega el sistema con respecto a la hora en días típicos de verano e invierno respectivamente.



**Fig. 5.** Temperatura de salida de HTF en un día típico de verano e invierno.

#### IV. CONCLUSIONES

De los resultados anteriores, se obtienen las siguientes conclusiones.

- La valoración exitosa del modelo transiente de predicción del comportamiento térmico permite aplicarlo con certeza en el dimensionamiento de redes de colectores solares de concentrador parabólico.

- El Valor Presente del Ahorro del Ciclo de Vida,  $VPACV$  es una herramienta útil de determinación de la factibilidad económica de un proyecto solar térmico en un horizonte de tiempo fijo. La relación de carga total que proporciona la red,  $CUI$ , respecto del área total de la red,  $A_{red}$  fue empleada como indicador complementario y asegura el cumplimiento de los requerimientos térmicos.
- La metodología planteada para el diseño de un campo termosolar de aplicación en el sector industrial cumplió con el objetivo. Se determinaron las dimensiones de la red, así como las condiciones operativas más adecuadas, siendo capaz de operar a lo largo del año. La fracción solar, que representa la capacidad para proporcionar la carga térmica al nivel de temperatura requeridos para este proceso de saponificación así lo demuestra; ya que en Invierno logra satisfacer la demanda en un 90 % y en Verano la excede en un 13 %. Por tanto, con el diseño de un sistema de almacenamiento solar (que se encuentra fuera del alcance de esta investigación) se logra totalmente la sustitución del proceso convencional con la red termosolar propuesta.
- El proceso propuesto requiere de un sistema de control de la temperatura del HTF, así como un tanque búfer. Estas modificaciones se proponen para un trabajo futuro.
- Se propone llevar a cabo el diseño de una red termosolar con aplicación industrial aplicando una optimización multi-objetivo del tipo MINLP. Para este fin se propone usar los dos indicadores de este trabajo como funciones objetivo y la geometría del equipo, el tamaño y estructura de la red, el flujo másico y la temperatura de entrada del fluido como variables de decisión.

#### V. REFERENCIAS

- Research, E. Market Synopsis Available online: <https://www.emergenresearch.com/industry-report/soap-market#:~:text=Market.Synopsis,to drive market revenue growth> (accessed on 16 August 2023).
- Miller, S. Chemical Industry. SpringerBriefs in Ethics 2018, 55–71, doi:10.1007/978-3-319-92606-3\_5.
- Fernández-García, A.; Rojas, E.; Pérez, M.; Silva, R.; Hernández-Escobedo, Q.; Manzano-Agugliaro, F. A Parabolic-Trough Collector for Cleaner Industrial Process Heat. J Clean Prod 2015, 89, 272–285, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2014.11.018.
- Awan, A.B. Comparative Analysis of 100 MW Concentrated Solar Power Plant and Photovoltaic Plant. AIP Conf Proc 2019, 2119, doi:10.1063/1.5115363.
- Adib, R.; Zervos, A. Renewables 2023 Global Status Report; 2023.
- Kalogirou, S. Solar Energy Engineering. [Electronic Resource]: Processes and Systems, 2009.
- Krishna, Y.; Faizal, M.; Saidur, R.; Manihalla, P.P.; Karinka, S. Performance Analysis of Parabolic Trough Collector Using TRNSYS®-A Case Study in Indian Coastal Region. J Phys Conf Ser 2021, 1921, doi:10.1088/1742-6596/1921/1/012063.
- Mouaky, A.; Alami Merrouni, A.; Laadel, N.E.; Bennouna, E.G. Simulation and Experimental Validation of a Parabolic Trough Plant for Solar Thermal Applications under the Semi-Arid Climate Conditions. Solar Energy 2019, 194, 969–985, doi:10.1016/j.solener.2019.11.040.
- Zima, W.; Cebula, A.; Cisek, P. Mathematical Model of a Sun-Tracked Parabolic Trough Collector and Its Verification. Energies (Basel) 2020, 13, doi:10.3390/en13164168.
- Xu, L.; Sun, F.; Ma, L.; Li, X.; Lei, D.; Yuan, G.; Zhu, H.; Zhang, Q.; Xu, E.; Wang, Z. Analysis of Optical and Thermal Factors' Effects on the Transient Performance of Parabolic Trough Solar Collectors. Solar Energy 2019, 179, 195–209, doi:10.1016/j.solener.2018.12.070.
- Ferchichi, S.; Kessentimi, H.; Morales-Ruiz, S.; Rigola, J.; Bouden, C.; Oliva, A. Thermal and Fluid Dynamic Analysis of Direct Steam

- Generation Parabolic Trough Collectors. *Energy Convers Manag* 2019, 196, 467–483, doi:10.1016/j.enconman.2019.05.107.
- [12] Behar, O.; Khellaf, A.; Mohammedi, K. A Novel Parabolic Trough Solar Collector Model - Validation with Experimental Data and Comparison to Engineering Equation Solver (EES). *Energy Convers Manag* 2015, 106, 268–281, doi:10.1016/j.enconman.2015.09.045.
- [13] Chapra, S.C. *Applied Numerical Methods with Matlab® For Engineers And Scientists*; McGrawHill Education, Ed.; 4th ed.; New York, 2018;
- [14] Caballero-Esparza, M.; Lizárraga-Morazán, J.R.; Picón-Núñez, M. Economic Analysis for the Selection of Low Temperature Solar Thermal Utility Systems. *Appl Therm Eng* 2022, 215, 118913, doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118913.
- [15] Lizárraga-Morazán, J.R.; Picón-Núñez, M. Robust Design Approach for Low-Temperature Solar Thermal Utility Systems. *Process Integration and Optimization for Sustainability* 2021, 5, 285–301, doi:10.1007/s41660-021-00167-6.
- [16] Dudley, E.; Kolb, J.; Mahoney, A.; Mancini, T.; M, S.; Keamey, D. Test Results: SEGS LS-2 Solar Collector. Sandia National Laboratory. Report: SAND94-1884. 1994, 140.
- [17] Yilmaz, İ.H. Optimization of an Integral Flat Plate Collector-Storage System for Domestic Solar Water Heating in Adana. *ANADOLU UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY A - Applied Sciences and Engineering* 2018, 19, 165–176, doi:10.18038/aubtda.335801.
- [18] Padilla, R.V.; Demirkaya, G.; Goswami, D.Y.; Stefanakos, E.; Rahman, M.M. Heat Transfer Analysis of Parabolic Trough Solar Receiver. *Appl Energy* 2011, 88, 5097–5110, doi:10.1016/J.APENERGY.2011.07.012.
- [19] Forristall, R. Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver. Golden, CO (United States), 2003.
- [20] García-Valladares, O.; Velázquez, N. Numerical Simulation of Parabolic Trough Solar Collector: Improvement Using Counter Flow Concentric Circular Heat Exchangers. *Int J Heat Mass Transf* 2009, 52, 597–609, doi:10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2008.08.004.
- [21] Meyers, R. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*; Springer New York, 2012.
- [22] Moloodpoor, M.; Mortazavi, A.; Ozbalta, N. Thermal Analysis of Parabolic Trough Collectors via a Swarm Intelligence Optimizer. *Solar Energy* 2019, 181, 264–275, doi:10.1016/j.solener.2019.02.008.
- [23] Epp, B.; Oropeza, M. Solar Heat for Industry-Solar Payback. *Solrco* 2017, 18.

## BIOGRAFÍAS



**JUAN RAMÓN LIZÁRRAGA MORAZÁN** Dr. en Ciencias en Ingeniería Química, egresado de la Universidad de Guanajuato. De 1998 a 2015 trabajó en la industria petroquímica como Ingeniero de Proceso y Calidad, y como Superintendente de Producción y Mantenimiento; y de 2015 a 2017 como Gerente de Manufactura en la industria automotriz Tier 1. Sus intereses de investigación son la Energía Solar, Optimización, Deep Learning y Transferencia de Energía. Actualmente es profesor del Instituto Politécnico Nacional sede UPIIG, Silao Guanajuato.



**MARTÍN PICÓN NÚÑEZ** Ingeniero Químico egresado de la Universidad de Guanajuato. Obtuvo su Maestría y Doctorado de la Universidad de Manchester, Instituto de Ciencia y Tecnología. Ha trabajado como consultor industrial en áreas de áreas de recuperación de calor, diseño de equipos de transferencia de calor y localización y eliminación de cuellos de botella para incrementar la producción en diversas empresas de México. Sus áreas de interés son el diseño de intercambiadores de calor compactos, diseño de sistemas de enfriamiento y aplicaciones industriales. Actualmente es Profesor en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Guanajuato.