



UNA REVISIÓN DE LOS ÚLTIMOS AVANCES DE LOS COLECTORES SOLARES TÉRMICOS APLICADOS EN LA INDUSTRIA

A REVIEW OF THE STATE-OF-THE-ART OF SOLAR THERMAL COLLECTORS APPLIED IN THE INDUSTRY

Willian Carrión-Chamba¹ , Wilson Murillo-Torres¹ ,

Andrés Montero-Izquierdo^{2,*} 

Recibido: 16-05-2021, Recibido tras revisión: 28-06-2021, Aceptado: 03-08-2021, Publicado: 01-01-2022

Resumen

El consumo energético asociado al sector de la industria representa el 38 % de la demanda de energía a nivel global, siendo un aspecto importante que marca el desarrollo de un país. En este sentido, es sumamente importante diversificar las distintas fuentes de energía e incorporar el uso de fuentes renovables de energía, como la solar, no solamente con la idea de asegurar el suministro energético, sino también considerando como elementos que permitan la reducción de las emisiones generadas por el uso de combustibles fósiles. El presente trabajo aborda las principales tecnologías de colectores solares que pueden ser incorporadas a distintos tipos de industrias, basado en experiencias e investigaciones en otros países. Sobre la base de esta revisión, se ha visto que una buena parte de las industrias a nivel mundial requieren temperaturas en sus procesos hasta los 250 °C, lo que hace idóneo el uso de esta tecnología. En función de cada industria, se podrán usar colectores solares de placa plana, de tubos de vacío, del tipo Fresnel o cilindro parabólicos. Por último, se detallan los ahorros asociados a algunas instalaciones y se abordan los desafíos relacionados con este sector.

Palabras clave: energía solar, colectores solares térmicos, aplicaciones industriales

Abstract

The energy consumption associated with the industry sector represents 38% of the global energy demand, being an important aspect that marks the development of a country. In this sense, it is extremely important to diversify the different energy sources and incorporate the use of renewable energy sources, such as solar energy, not only with the idea of ensuring energy supply, but also as elements that enable the reduction of energy emissions generated by the use of fossil fuels. This work addresses the main solar collector technologies that may be incorporated into different types of industries, based on experiences and research in other countries. Based on this review, it has been seen that an important part of the industries worldwide requires temperatures up to 250 °C in their processes, which makes suitable the use of solar energy technology. Depending on each industry, flat plate, vacuum tube, Fresnel type or parabolic trough solar collectors may be used. Finally, the savings associated with some facilities are detailed and the challenges related to this sector are addressed.

Keywords: Solar energy, solar thermal collectors, industrial applications.

¹Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Ecuador.

^{2,*}Grupo de Ingeniería de Reactores, Catálisis y Tecnologías del Medio Ambiente - IRCMA, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: andres.montero@ucuenca.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Carrión-Chamba, W.; Murillo-Torres, W. y Montero-Izquierdo, A. "Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 27, pp. 59-73, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.06>.

1. Introducción

La energía es un componente clave para el bienestar y desarrollo económico de una nación, por lo que una economía basada en la industrialización es una de las razones del incremento en la tendencia del consumo energético [1]. El sector industrial emplea el 38 % de la demanda de energía a nivel global, ubicándose como la actividad económica de mayor consumo de este recurso [2]. Las fuentes de energía en las industrias manufactureras provienen generalmente de los combustibles fósiles y del gas natural. No obstante, las emisiones de gases de efecto invernadero, producto de la combustión de hidrocarburos, se han convertido en una problemática ambiental que aceleran los efectos del cambio climático [3]. Incorporar alternativas eficientes de energía sostenible y así reducir los niveles de contaminación del aire, es el desafío actual al que se enfrenta el sector industrial [4]. Una solución ante esta situación es la implementación de sistemas basados en energías renovables y medidas de eficiencia energética, considerando que en el futuro los combustibles fósiles alcanzarán su límite de extracción. La energía solar por su abundancia y disponibilidad gratuita es uno de los recursos renovables con mayor potencial para reducir los niveles de emisión de CO₂ a la atmósfera [5]. La radiación solar se puede aprovechar de dos formas: la conversión directa en electricidad por medio de celdas fotovoltaicas y la conversión térmica con el uso de colectores solares [6].

El uso de la energía solar térmica en la industria se viene investigando desde los años setenta a través de programas de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) como el *Solar Heating & Cooling Programme* [7]. A finales de 2019 la potencia solar térmica instalada fue de 700 MW_t considerando al menos ochocientos proyectos con un área total de captación de aproximadamente un millón de metros cuadrados instalados en el mundo [8]. Las industrias de alimentos, textiles, papel, metales, plásticos y la industria química se destacan entre las principales empresas que emplean energía solar térmica en el desarrollo de sus procesos de manufactura [9]. Dependiendo del tipo de proceso industrial, se puede dar una clasificación de los colectores solares dependiendo del rango de temperatura en tres categorías: baja temperatura (< 150 °C), media temperatura (150–400 °C) y alta temperatura (> 400 °C) [10]. Sin embargo, en empresas comerciales e industriales se tiene una mayor demanda a temperaturas por debajo de los 250 °C [11]. Este artículo comprende una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados a la industria mediante la presentación de aspectos técnicos, económicos y ambientales, considerando instalaciones reales y simulaciones dinámicas de los sistemas analizados.

2. La energía solar térmica y su aprovechamiento

La energía solar térmica consiste en aprovechar la energía del Sol para calentar un fluido caloportador y transferir ese calor a otro medio dentro de un proceso o sistema. Este tipo de energía renovable es capaz de sustituir o reducir el uso de combustibles fósiles y debido a la existencia de un mercado competitivo se considera como una de las alternativas comerciales más económicas para la producción de calor [12]. Sin embargo, la intermitencia de la energía solar hace necesario disponer de sistemas auxiliares de almacenamiento térmico, lo que resulta en mayores costos de inversión y, a su vez, menor viabilidad económica para la ejecución de nuevos proyectos [13]. La energía térmica se puede almacenar en forma de calor latente o calor sensible; no obstante, en el mecanismo de calor latente con materiales de cambio de fase o *Phase change materials* (PCM) se requiere un menor volumen de almacenamiento debido a que la densidad de energía es mayor que en los materiales de calor sensible [7].

Los colectores solares térmicos son dispositivos encargados de transformar la energía solar en térmica a través de diversos principios de funcionamiento que varían según el tipo de colector empleado [14]. En aplicaciones industriales los principales aspectos a tomar en cuenta para instalar un sistema solar térmico son la temperatura objetivo, el requerimiento energético, los criterios económicos, la disponibilidad del espacio y el grado de madurez de la tecnología analizada [15]. Basándose en los rangos de temperaturas y uso en la industria, este trabajo abarca a los colectores de baja y media temperatura.

2.1. Colectores de baja temperatura

2.1.1. Colector de placa plana

El colector solar de placa plana o *Flat plate collector* (FPC) transforma la energía solar en térmica empleando un panel compuesto por una cubierta acristalada, que permite el paso de la radiación solar hasta incidir y ser absorbida por la superficie selectiva de una placa absorbente. En la Figura 1 se observa un corte transversal de un colector FPC en donde se diferencia cada uno de sus componentes. La energía térmica después de ser interceptada en la placa se transfiere al interior de los tubos por donde circula el fluido caloportador, para finalmente pasar a un sistema de almacenamiento, o ser utilizado de manera directa [16]. La pérdida de calor del sistema se reduce utilizando aislante térmico en la parte inferior y en los laterales de la carcasa; asimismo, la cubierta de vidrio cumple la función de minimizar las pérdidas de calor por convección y radiación emitida desde la placa absorbente [17]. Los FPC tienen la particularidad de aprovechar la radiación solar directa

y difusa; sin embargo, por ser estacionarios reciben menos energía por unidad de área del colector [16]. Estos dispositivos actúan en un intervalo de baja temperatura ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) y, por tener una estructura simple a comparación con otros colectores, poseen un bajo costo en el mercado [18].

2.1.2. Colector de tubos de vacío

El colector de tubos de vacío o *evacuated tube collector* (ETC) está compuesto de un número determinado de tubos de cristal en donde cada uno de ellos está compuesto por dos tubos concéntricos. El tubo interior se encuentra cubierto con una capa absorbente selectiva, mientras que cada unidad concéntrica es separada por el principio de sellado al vacío [17]. El objetivo de generar el vacío es reducir las pérdidas de calor por convección y conducción; además, es una ventaja técnica que permite operar al dispositivo a temperaturas más elevadas que los FPC.

La temperatura de operación del colector ETC puede alcanzar valores de hasta $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ [19]. Además, la alta eficiencia térmica y los costos relativamente bajos de este colector son las razones principales de su alta competencia en el mercado [20]. Existen dos tipos principales de colectores ETC:

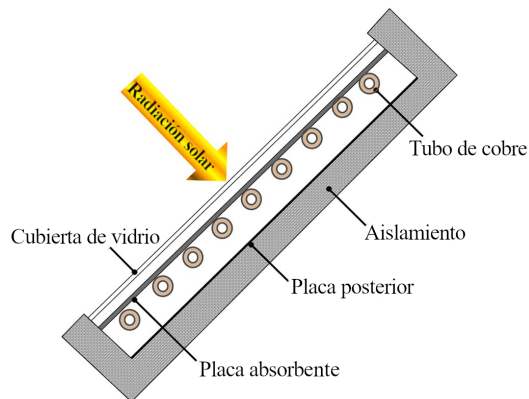


Figura 1. Partes de un colector de placa plana [21]

1. ETC del tipo *heat-pipe*. Este colector se basa en el principio de funcionamiento denominado ciclo de evaporación-condensación. El proceso inicia cuando el tubo de calor recibe la radiación solar y hace que el fluido altamente volátil (por ejemplo, metanol o etanol) contenido en su interior cambie de estado líquido a gaseoso, provocando que el vapor se eleve a la parte superior del tubo donde se encuentra el condensador [18]. El vapor al condensarse libera el calor latente hacia el circuito principal y luego el líquido condensado regresa a la parte inferior del tubo de calor para completar el ciclo de circulación [22]. En la Figura 2 se muestra la sección transversal de un colector de tubos de vacío del tipo *heat-pipe*.

2. ETC de flujo directo. En este colector, el interior del tubo absorbedor está aislado al vacío y tiene integrado una tubería en forma de U que permite la entrada y salida del fluido (Figura 3). La tubería interna es de metal y está cubierta con un revestimiento de material selectivo para acelerar la transmisión de calor hacia el fluido y reducir las pérdidas por radiación. Durante el proceso, el fluido frío ingresa y absorbe el calor de las tuberías en forma de U calentadas por la radiación solar para finalmente descargarse por la salida de las tuberías [16].

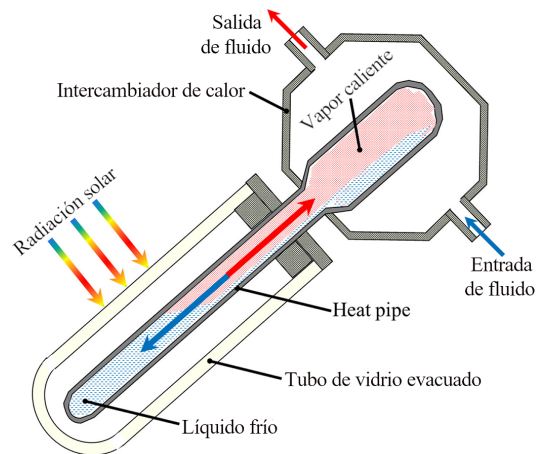


Figura 2. Vista transversal de un colector de tubos del tipo *heat-pipe* [21]

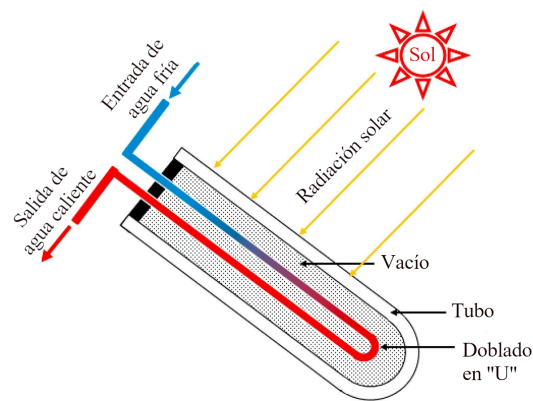


Figura 3. Vista transversal de un colector de tubos de vacío de flujo directo [9]

2.1.3. Colector parabólico compuesto

El colector parabólico compuesto o *compound parabolic collector* (CPC) está conformado por dos superficies parabólicas cubiertas de material reflectante que comparten el mismo centro. El tubo absorbedor se sitúa en el centro de estas parábolas, con lo que se logra captar la radiación solar incidente que ingresa al área de apertura del colector dentro del ángulo de aceptación [18].

El diseño de construcción de estos dispositivos permite un mejor aprovechamiento de la radiación solar difusa y disminuye la acción de realizar ajustes de seguimiento continuo [23]. Existen varios modelos que se adaptan para alcanzar mayor eficiencia; un ejemplo muy práctico es acoplar el CPC con tubos de vacío. En aplicaciones industriales los CPC alcanzan temperaturas $< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [24]. La Figura 4 muestra una representación esquemática de este colector en donde se observa las dos superficies parabólicas que concentran la radiación solar en el tubo absorbedor

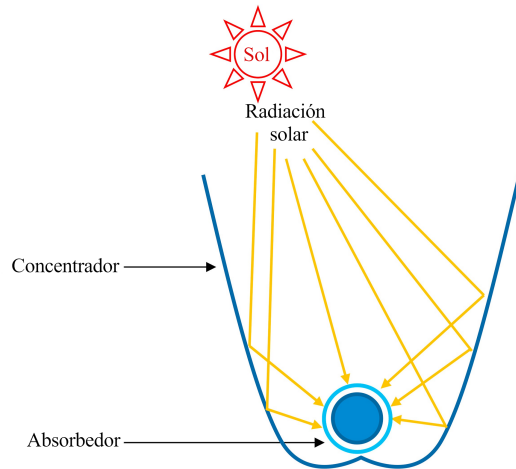


Figura 4. Colector parabólico compuesto [9]

2.2. Colectores de media temperatura

2.2.1. Colector de placa plana evacuado

El colector de placa plana evacuado o *Evacuated flat plate collector* (EFPC) combina el diseño del colector FPC y el principio de vacío del colector ETC. En la Figura 5 se muestra cómo está compuesto un colector de este tipo: una carcasa de aluminio como estructura y varios elementos como una cubierta de vidrio, una placa de absorción, un serpentín de cobre para el intercambio de calor y una placa inferior.

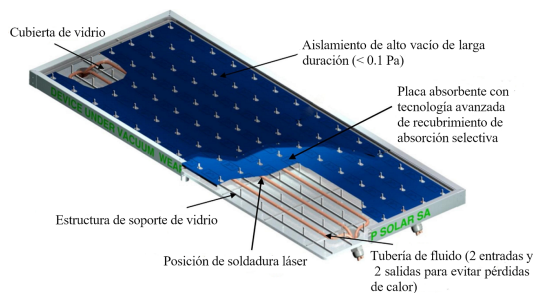


Figura 5. Estructura del colector de placa plana evacuado [25]

El vacío interior permite alcanzar una mayor eficiencia térmica debido a que se eliminan las pérdidas por

conducción y convección; además, este efecto, hace que el colector ocupe menos superficie que el colector ETC. Con esta tecnología se puede alcanzar temperaturas medias entre 120 y $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ para satisfacer demandas de calor industrial [25].

2.2.2. Colector cilindro parabólico

El colector cilindro parabólico o *Parabolic trough collector* (PTC) dispone de una lámina en forma de parábola que refleja la radiación solar directa y la concentra en el tubo receptor ubicado a lo largo de la línea focal. Por lo general, el tubo absorbente de metal es cubierto de un material selectivo (cobre) que mejora la transferencia de calor al interior del tubo por donde circula el fluido caloportador. Este conducto absorbente es aislado al vacío con un tubo de vidrio para disminuir las pérdidas térmicas por convección a pesar de originarse pérdidas ópticas por efecto de la reflexión [18]. Estos colectores deben acoplarse a un sistema de seguimiento para alinearse a la trayectoria del sol durante el día (Figura 6).

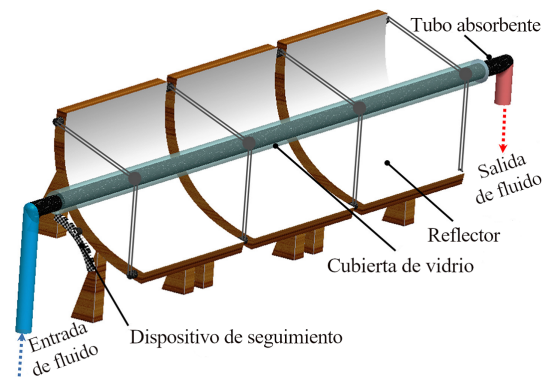


Figura 6. Esquema de un colector cilindro parabólico [21]

La orientación del colector se puede configurar en dirección norte-sur con seguimiento este-oeste para captar mayor energía durante el verano; mientras que, si el objetivo es maximizar la energía en invierno la dirección adecuada del colector debe ser este-oeste con seguimiento norte-sur [26]. Normalmente, en procesos industriales con este tipo de colectores se emplean módulos de concentración solar con un área de captación menor a 250 m^2 y trabajan a una temperatura media por debajo de los $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ [27].

2.2.3. Colector lineal Fresnel

El colector lineal tipo Fresnel o *linear Fresnel collector* (LFC) está compuesto por dos partes principales: un tubo absorbente estacionario por donde circula el fluido caloportador y una serie de espejos reflectores alineados horizontalmente que se acoplan a un sistema de seguimiento uniaxial [18]. El principio de operación del colector ocurre cuando la radiación solar impacta en los espejos reflectores (curvos o planos) y

se direcciona para concentrarse en el tubo absorbente (Figura 7).

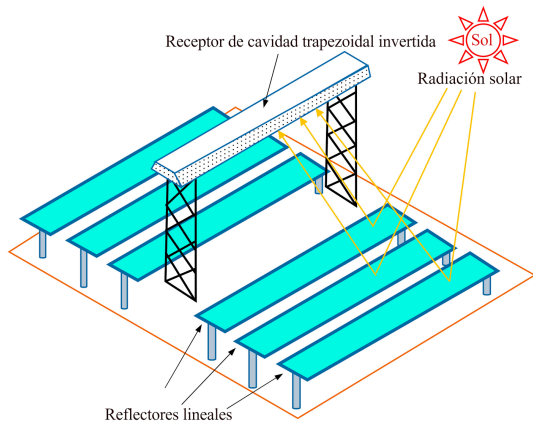


Figura 7. Esquema de un colector lineal Fresnel [9]

Para maximizar la concentración de la energía solar, ciertos diseños optan por instalar un colector CPC sobre la parte superior del receptor o punto focal con el objetivo de redireccionar la radiación solar al tubo absorbente [28]. Una de las ventajas que hacen competitivo al LFC con respecto a un PTC, es su fabricación simple, lo que implica un menor costo de inversión; sin embargo, las limitaciones ópticas y geométricas como el sombreado y bloqueo entre los espejos disminuyen el

grado de eficiencia del colector [27]. En procesos industriales este tipo de colector puede alcanzar intervalos de temperatura media ($60\text{ °C} < T < 250\text{ °C}$) [29].

Para comparar el comportamiento entre colectores, la ecuación de la eficiencia (η) puede ser empleada.

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{(T_m - T_{amb})}{G} - a_2 \frac{(T_m - T_{amb})^2}{G} \quad (1)$$

Se puede observar en la Figura 8 la comparación de eficiencias para varios colectores solares térmicos en función de la Ecuación (1), en donde: T_m corresponde a la temperatura media del fluido calotransportador, T_{amb} es la temperatura ambiente, a_0 es el rendimiento óptico, a_1 es el coeficiente de pérdidas de primer orden, a_2 es el coeficiente de pérdidas de segundo orden y G es la irradiancia global. Para esta comparación, se asume una irradiancia global de 1000 W/m^2 y una temperatura ambiente de 20 °C , se observa a través de la Ecuación (1) que los colectores FPC alcanzan una eficiencia elevada para un ΔT bajo, mientras que a medida que esta variable aumenta, su eficiencia disminuye drásticamente. Todo lo contrario, sucede con el resto de los colectores, en donde la eficiencia se reduce a medida que se incrementa el valor de ΔT de una manera no tan drástica. Incluso se observa que el colector PTC mantiene su eficiencia casi constante a medida que el diferencial de temperatura ΔT incrementa.

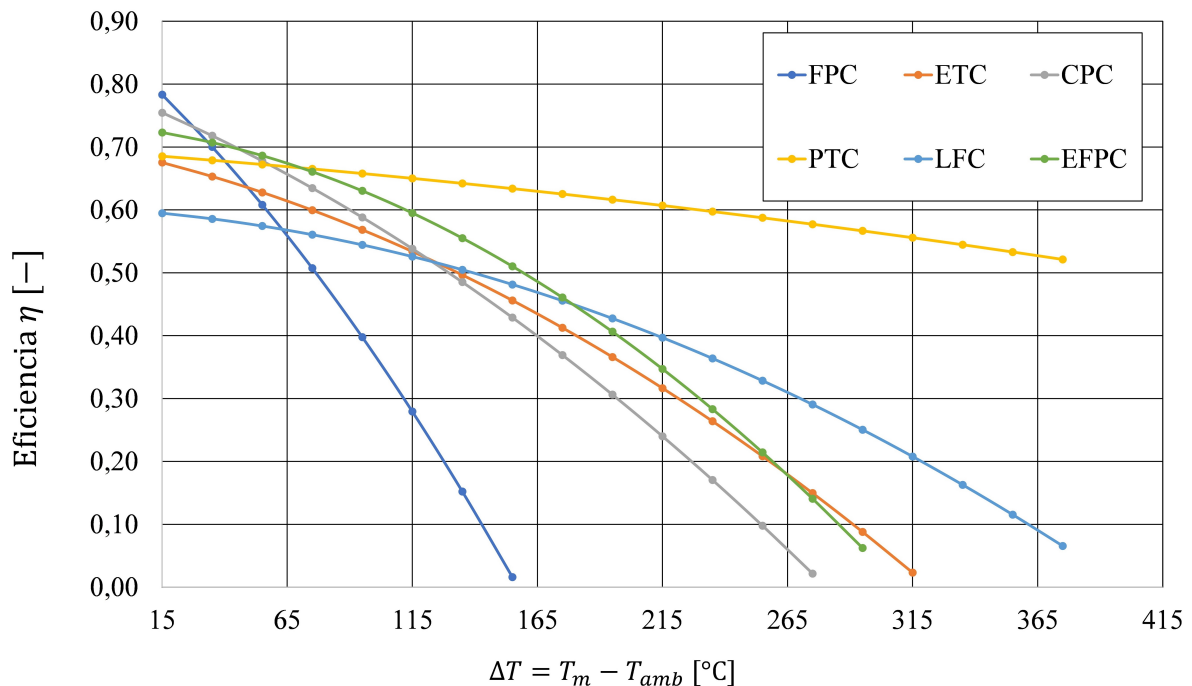


Figura 8. Comparativa entre colectores solares

3. Aplicación de la energía solar térmica en la industria

La energía solar térmica se ha constituido como un componente clave que contribuirá en la descarbonización del sector industrial. A nivel mundial, el consumo de calor en el sector industrial es aproximadamente de 85 EJ, de los cuales el 30 % corresponde a la demanda de calor de baja temperatura [30]. A continuación, se presenta una revisión de casos de estudio, basada en simulación mediante computadora, para aplicaciones industriales.

En Sudáfrica se investigó la viabilidad de integrar FPC como un sistema de generación de calor para el precalentamiento de materia prima en dos empresas de producción de harina de pescado. El estudio demostró que en la fábrica A la rentabilidad de instalación es justificada porque se requiere una demanda mensual de calor relativamente constante y por el elevado costo del fueloil que hacen de este sistema una tecnología solar competitiva. Sin embargo, en la fábrica B instalar un sistema FPC no es factible debido al bajo costo del carbón y a que el perfil de demanda de calor estacional es variable [31]. Un estudio para evaluar el rendimiento de incorporar un sistema de almacenamiento de calor con materiales de cambio de fase junto a colectores FPC en la zona tropical de Mérida-México, reveló que el ácido láurico, por sus características termofísicas, es el PCM más adecuado para obtener una mayor ganancia térmica durante todo el año. Además, el análisis

financiero indicó que el valor máximo de 17,2 % en la tasa interna de retorno se alcanza si el sistema de almacenamiento de calor se acopla con un arreglo de cinco colectores FPC para el proceso de calentamiento de agua en una fábrica de ropa [32].

Por otro lado, Anastasovski [33] analizó el rendimiento de dieciocho soluciones para la integración de calor solar en una industria productora de etanol considerando las tecnologías ETC y PTC, considerando la radiación solar en días típicos durante las estaciones del año. Sus hallazgos muestran que, la solución más atractiva es el diseño con ETC acoplados a un sistema de almacenamiento de calor con agua a presión durante el solsticio de invierno, puesto que permite reemplazar el 35 % del calor requerido y recuperar la inversión en aproximadamente 4,5 años.

En otro estudio, Maillot, Castaing-Lasvignottes y Marc [34] simularon cuatro casos distintos para valorar la integración directa e indirecta de acoplar colectores ETC en el sistema de generación de vapor de una industria productora de yogur. Según la evaluación técnica el mayor ahorro de combustible es del 24 %, que se logra cuando los colectores con un área de captación de 555 m² se integran de manera directa en el tanque de la caldera.

En la Tabla 1 se muestran aspectos técnicos para aplicaciones industriales, existentes y a nivel de simulación, basadas en sistemas térmicos con tecnologías FPC y ETC.

Tabla 1. Aspectos técnicos, económicos y ambientales de la aplicación y simulación de colectores solares con tecnologías FPC y ETC para procesos industriales en diferentes países del mundo

Ubicación	Industria	Temperatura proceso industrial (°C)	Área captación colector (m ²)	Fracción solar (%)	Ahorros	Fuente
Sudáfrica	Producción de harina de pescado- precalentamiento	70	384-FPC	81	32 061 litros de fueloil	[31]
Macedonia	Producción de etanol- calentamiento de agua- preparación de soluciones salinas y melaza	95	n/d-ETC	n/d	aprox. 57 % de fueloil	[33]
Isla Reunión	Yogur- generación de vapor a partir de la integración directa del captador solar en el tanque de la caldera	160-170	555-ETC	n/d	24 % de combustible	[34]
Marruecos	Láctea- calentamiento de agua -secado y limpieza de frutas, enfriamiento y pasteurización	60-90	400-ETC	41	77,23 tCO ₂ e/año	[35]
Etiopía	Textil- calentamiento de agua- teñido	50-90	472-ETC	56,3	252,2 tCO ₂ e/año	[36]

En el caso de los colectores CPC, Milczarek *et al.* [37] experimentaron el secado de orujos de tomate y ciruela con un secador solar térmico de tambor, para lo cual se utilizaron 26 CPC externos con un área captación de 98,3 m² que permitió calentar la superficie del tambor a una temperatura mínima de 92 °C. El resultado final demostró la efectividad de la energía solar térmica para lograr la estabilidad de almacenamiento de estas frutas y verduras. En Argentina, los colectores CPC han mostrado ser una alternativa económica y ambientalmente viable a temperaturas

que oscilan entre 100 y 150 °C debido a que el costo nivelado de energía está entre 2,5 y 16,9 euros por kWh/m². Asimismo, los rangos asociados a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero al sustituir la electricidad y el gas natural por este sistema solar están entre 179 a 348 kgCO₂/m²·año y entre 113 a 220 kgCO₂/m²·año, respectivamente.

En la Tabla 2 se puede observar casos sobre aplicaciones y simulaciones con tecnologías de captación PTC y LFC.

Tabla 2. Aspectos técnicos, económicos y ambientales de la aplicación y simulación de colectores solares con tecnologías PTC y LFC para procesos industriales en diferentes países del mundo

Ubicación	Industria	Temperatura proceso industrial (°C)	Área captación Colector (m ²)	Fracción solar (%)	Ahorros	Fuente
Italia (Molina di Fiemme)	Pasta-calentamiento de agua-secado de pasta	135	840-PTC	23	4,7 tCO ₂ /semana	[11]
Chipre (Limasol)	Refrescos-generación de vapor-limpieza, pasteurización y esterilización	188	288-PTC	n/d	40 €/t de vapor	[38]
Suiza (Saignelégier)	Láctea-calentamiento de agua-limpieza	117	627-PTC	12	69 tCO ₂ /año	[39]
Portugal (Santarém)	Producción de aglomerado de corcho expandido precalentamiento de agua de alimentación de caldera	170	1328-PTC	36,9	76,5 tep y 201,8 tCO ₂ e/GJ	[40]
Marruecos (Rabat)	Asfáltica-calentamiento de betún	160	n/d-PTC	40	0,75-1,5 tCO ₂ /año/kW	[41]
Indonesia	Minera de níquel-generación de vapor para calentar azufre	135-145	n/d-LFC	n/d	45 000 USD/año	[42]
Italia (Sicilia)	Pasta de trigo-agua sobrecalentada-secado de pasta	120-140	6602-LFC	40	n/d	[43]

El estudio mediante la modelación dinámica de un campo solar con colectores PTC, para el calentamiento de agua en el proceso de secado de pasta en una fábrica italiana, evidenció que el diseño de este sistema tiene la capacidad de garantizar el 23 % de la demanda de energía térmica semanal empleada en este proceso [11]. En el trabajo de Ghazouani, Bouya y Benaissa [15] se analizaron los parámetros de diseño y operativos de un PTC pequeño con el fin de maximizar la eficiencia termoeconómica y el rendimiento energético con las condiciones meteorológicas de la ciudad de Rabat; con la mejora de las características técnicas del colector consiguieron proporcionar más de 12,84 MWh/año a un costo competitivo menor a 0,022 USD/kWh con cada dispositivo.

En el caso de la industria láctea, Biencinto *et al.* [44] propusieron un sistema innovador de almacenamiento térmico abastecido por un campo de colectores PTC para contribuir a la demanda de calor a tres niveles diferentes de temperatura en el proceso de pasteurización. Según los resultados de la simulación, el uso de almacenamiento térmico basado en pentaglicerina (PCM) cubriendo un rango de tres horas puede satisfacer la demanda anual de energía entre un 20-27 % y un 40-52 % para las ciudades de Graz-Austria y Almería-España, respectivamente.

Sharma *et al.* [45] en su estudio realizado para la implementación de energía solar térmica en la industria

láctea de la India, determinó que al instalar colectores PTC se puede alcanzar una fracción solar entre 16 y 33 % según la ubicación de cada fábrica. No obstante, el bajo costo de los combustibles fósiles y la incapacidad de los sistemas solares de abastecer la demanda total de calor en los procesos de manufactura, hacen que estas inversiones sean inseguras.

May Tzuc *et al.* [46] realizaron un modelo de optimización con PTC para ser integrados en la industria láctea considerando cuatro tipos diferentes de clima en México. La investigación afirma que estos colectores pueden satisfacer una demanda que varía entre el 40 y 80 % del calor utilizado en la pasteurización. De igual manera, el ahorro anual de emisiones para las cuatro regiones climáticas con la aplicación de esta tecnología renovable oscila entre 39,5 y 95,3 tCO₂.

Cortés *et al.* [47] indicaron que la integración de PTC en la industria alimentaria de Chile resulta técnica y económicamente factible; puesto que, si en la mayoría de las regiones del país el costo de instalación del campo solar fuera menor a 250 USD/m², esta tecnología sería competitiva con los combustibles fósiles.

Ktistis, Agathokleous y Kalogirou [38] demostraron que acoplar colectores PTC con un sistema de almacenamiento de hormigón es viable para ser empleada en una industria de refrescos en Chipre, ya que el costo de producción de vapor para los procesos de limpieza, pasteurización y esterilización de la fábrica con este

sistema solar es de 10 €/t; a diferencia de 50 €/t que es el costo por la generación de vapor cuando se emplea una caldera convencional y un precio de combustible de 700 euros por tonelada.

En cuanto a los colectores LFC, Laadel *et al.* [48] argumentaron que este captador solar acoplado a un sistema de calor es técnicamente apto para integrarse en las industrias marroquíes debido a que pueden alcanzar valores de hasta un 40 % de fracción solar sin incluir almacenamiento térmico. Buscemi *et al.* [43] examinaron la posibilidad de generar calor para el secado de pasta a partir de un campo solar con LFC en una industria italiana. El resultado de la simulación de este sistema solar con almacenamiento de hormigón genera una fracción solar del 40 % y un tiempo de recuperación de la inversión de ocho años.

Existen investigaciones de aplicación de calor solar que están incursionando en otros sectores y operaciones como, por ejemplo, en la industria del asfalto para el calentamiento de betún [41]; en procesos de gestión de aguas industriales y aguas residuales [49] y en la generación de vapor para la industria farmacéutica mediante LFC [50].

En este contexto, el aporte de nuevas investigaciones sobre el ajuste de diseño de los colectores solares ha permitido buscar alternativas que mejoren el rendimiento y reduzcan el costo nivelado de calor de estos sistemas térmicos. Por ejemplo, el diseño innovador de un FPC que posee un solo tubo colector en forma de espiral en comparación con un colector FPC convencional con la misma área y tubos de igual diámetro

y longitud, tiene una mejora en la eficiencia térmica de 21,45 % cuando funciona a un caudal másico de 0,026 kg/s y 1011 W/m²; además, con el diseño espiral del tubo se disminuye la caída de presión del fluido y se puede ahorrar un 30 % del total de materiales de fabricación [51].

Un experimento realizado en Las Vegas-Estados Unidos sobre el diseño de la estructura de soporte de un PTC utilizando madera como material, demostró que el colector puede tener un funcionamiento adecuado durante treinta años si se realiza un monitoreo y mantenimiento continuo de la madera. El análisis económico determinó que la estimación del costo de instalación de este diseño es de 56,14 USD/m² con lo que se reduce significativamente el coste nivelado del calor para el vapor de proceso industrial [52].

4. Proveedores de colectores solares térmicos

Durante el año 2019, de acuerdo con el programa *Solar Payback*, se instalaron 251 MW_t relacionados con sistemas termosolares destinados a la industria a nivel mundial, un valor muy superior a los 39 MW_t instalados en el 2018 [53]. Este programa contabiliza alrededor de 76 proveedores de tecnologías de captación solar en el mundo, siendo la mayoría de ellos productores de sus propios sistemas. En la Tabla 3 se presentan los proveedores que poseen más de diez proyectos instalados bajo la modalidad de «llave en mano» a finales del 2019.

Tabla 3. Proveedores de colectores solares «llave en mano» [53]

Colector	Proveedor/país	Proyectos	Área (m ²)
FPC	Módulo Solar/México	89	15 616
	Inter Solar Systems/India	22	10 400
ETC	Sunrain Solar Energy /China	72	52 970
	Linuo Paradigma/China	47	90 470
	Ritter Energie-und Umwelttechnik/Alemania	29	5165
	Sunda Solar Energy/ China	16	9432
	Himin/China	15	29 627
PTC	Inventive Power/México	66	10 570
	Vicot Solar Technology/China	24	22 560
	Soliterm/Alemania	20	37 069
Plato parabólico	Megawatt Solutions/India	32	16 545
Contrato de suministro de calor	Millennium Energy Industries (MEI)/Jordania	22	3611
	Solid Energy Systems/Austria	15	11 779
n/d	Casolar/México	14	n/d

5. Costos de las tecnologías

Para la integración de un sistema de calor solar en una industria es indispensable considerar la temperatura operativa del colector solar, su costo, los requisitos de operación y mantenimiento, así como otros factores relacionados con el uso del suelo, la variabilidad temporal de producción y el precio de los combustibles [54]. También es necesario conocer que generalmente el costo de los colectores representa entre el 50 y 70 % de la inversión del sistema termosolar [55]. En la Tabla 4 se detalla el costo por área de las diferentes tecnologías de captación solar, no obstante, se debe tener en cuenta que la información proporcionada de los valores económicos de los dispositivos se basa en cifras referenciales de simulaciones y estudios científicos.

Tabla 4. Costos de las diferentes tecnologías de captación solar

Colector	País	Costo (USD/m ²)	Fuente
FPC	México	287 *	[56]
	Chile	330-687	[54]
	Zimbabue	220-347	[57]
ETC	México	472 *	[56]
	Chile	460-817	[54]
	Zimbabue	157-433	[57]
CPC	España	268-387 *	[58]
	Italia	131 *	[11]
PTC	México	402 *	[56]
	España	393-666 *	[58]
	Chile	379-1263	[54]
	Italia	262 *	[11]
LFC	España	309-506 *	[58]
	Italia	199 *	[11]

*Unidades monetarias ajustadas de euros a USD. Se ha empleado 1,19 USD como la equivalencia de 1 EUR considerando el valor de cotización promedio de la moneda en el periodo julio 2020-julio 2021 [59].

6. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero

En 2018 las emisiones directas de CO₂ provenientes del sector industrial alcanzaron un valor de 8,5 GtCO₂, lo que representa el 24 % de las emisiones globales. El Escenario de Desarrollo Sostenible propuesto por la IEA menciona que para lograr cero emisiones netas hasta 2070, las emisiones de la industria deben reducirse en un 1,2 % anual para alcanzar 7,4 GtCO₂ en 2030 [60]. Las diversas tecnologías de captación solar son una

respuesta para contribuir al logro de este cometido ambiental. Un estudio realizado en China determinó que los diez sectores industriales que integran tecnología de captación solar en sus procesos productivos pueden reducir aproximadamente 98,22 millones de tCO₂ en 2020 [55].

Por otro lado, McMillan *et al.* [61] demostraron que en Estados Unidos los PTC en combinación con un sistema de almacenamiento de calor sensible usando agua o aceite sintético, son la tecnología que puede emplearse para satisfacer la demanda de calor de procesos industriales en gran parte del país; y con su instalación se podría ahorrar anualmente 137 millones de toneladas métricas de CO₂.

En otra investigación, se evidenció que la instalación de sistemas termosolares en varios procesos de la industria textil algodonera en la India se podría reducir entre 2,46 y 7,67 millones tCO₂ anualmente [62]. En Europa, Kylili *et al.* [63] analizaron el potencial de reducción de emisiones asociado con la instalación de sistemas solares térmicos de baja temperatura para calentamiento de agua en las industrias. En su estudio evaluaron el grado de contaminación en función de las fases del ciclo de vida del sistema y llegaron a la conclusión que es posible ahorrar entre 35 y 75 GJ de energía, y entre 2 y 5 tCO₂/kWt dependiendo de la zona geográfica.

7. Desafíos y oportunidades de investigación

Según la literatura revisada existe una tendencia progresiva en el aprovechamiento de la energía solar térmica en diversos procesos industriales, pero la capacidad real instalada es aún pequeña. A continuación, se presentan algunas temáticas que pueden ser abordadas y así fomentar el uso extensivo de la energía solar térmica en la industria.

- Desarrollo de nuevos colectores térmicos y tecnologías de almacenamiento: la investigación de nuevos materiales que mejoren la eficiencia de generación térmica y reduzcan el peso de los colectores. En los sistemas de almacenamiento es imprescindible que se busquen alternativas con mayor eficiencia termodinámica para reducir el impacto de la intermitencia solar [64].
- Adaptabilidad a los procesos industriales: el sector industrial necesita una integración innovadora entre los colectores solares y las tecnologías de proceso que se adapten a los distintos sectores y ubicaciones de la industria [64].
- Inversión en I+D: La actual crisis relacionada con la COVID-19 reducirá la inversión en I+D en el sector privado, por lo que los Gobiernos de las

economías más importantes serán los encargados de promover políticas y apoyo económico que incentiven la I+D en este sector [65].

8. Conclusiones

Hasta 2019 la energía solar térmica incorporada en procesos industriales representó una potencia instalada de 700 MW_t, siendo una alternativa en constante crecimiento dentro de este sector económico.

En el sector industrial, los colectores solares térmicos son empleados principalmente para el calentamiento de agua y generación de vapor. Las empresas de producción de alimentos son las que mayormente han integrado estas tecnologías, debido a que gran parte de sus procesos requieren calor de baja temperatura. No obstante, diversos estudios han evaluado que la energía solar térmica se puede implementar en industrias mineras, textiles, farmacéuticas, entre otras.

Para integrar las tecnologías termosolares en la industria se debe considerar principalmente la demanda de energía térmica del proceso, el perfil de producción, el espacio disponible, la ubicación geográfica, el tipo y el coste del colector.

Se ha visto que los principales obstáculos que impiden la expansión de las tecnologías solares térmicas en el mercado industrial son el bajo costo de los combustibles fósiles, sistemas económicos de almacenamiento térmico aún en investigaciones y política energética ineficiente o inexistente.

Referencias

- [1] B. Koçak, A. I. Fernández, and H. Paksoy, "Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects," *Solar Energy*, vol. 209, pp. 135–169, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.081>
- [2] IEA. (2020) World energy balances: Overview. [Online]. Available: <https://bit.ly/3jEw90a>
- [3] S. H. Farjana, N. Huda, M. A. P. Mahmud, and R. Saidur, "Solar industrial process heating systems in operation - current ship plants and future prospects in Australia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 409–419, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.105>
- [4] V. Pranesh, R. Velraj, S. Christopher, and V. Kumaresan, "A 50 year review of basic and applied research in compound parabolic concentrating solar thermal collector for domestic and industrial applications," *Solar Energy*, vol. 187, pp. 293–340, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.056>
- [5] S. H. Farjana, N. Huda, M. P. Mahmud, and R. Saidur, "Solar process heat in industrial systems - a global review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2270–2286, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.065>
- [6] S. K. Verma, N. K. Gupta, and D. Rakshit, "A comprehensive analysis on advances in application of solar collectors considering design, process and working fluid parameters for solar to thermal conversion," *Solar Energy*, vol. 208, pp. 1114–1150, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.042>
- [7] C. A. Schoeneberger, C. A. McMillan, P. Kurup, S. Akar, R. Margolis, and E. Masanet, "Solar for industrial process heat: A review of technologies, analysis approaches, and potential applications in the united states," *Energy*, vol. 206, p. 118083, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118083>
- [8] W. Weiss and M. Spörk-Dür, *Solar Heat Worldwide*. IEA Solar Heating & Cooling Programme, Austria, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/2WT0yPM>
- [9] K. Ravi Kumar, N. V. V. Krishna Chaitanya, and N. Sendhil Kumar, "Solar thermal energy technologies and its applications for process heating and power generation - a review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 282, p. 125296, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125296>
- [10] IEA. (2017) Renewable energy for industry. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BGLYty>
- [11] M. Bolognese, D. Viesi, R. Bartali, and L. Crema, "Modeling study for low-carbon industrial processes integrating solar thermal technologies. a case study in the Italian Alps: The Felicetti pasta factory," *Solar Energy*, vol. 208, pp. 548–558, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.091>
- [12] A. Shahsavari and M. Akbari, "Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 275–291, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065>
- [13] A. Gautam and R. Saini, "A review on sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system for low temperature applications," *Solar Energy*, vol. 207, pp. 937–956, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.027>

- [14] L. Evangelisti, R. De Lieto Vollaro, and F. Asdrubali, “Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, p. 109318, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109318>
- [15] M. Ghazouani, M. Bouya, and M. Benaissa, “Thermo-economic and exergy analysis and optimization of small PTC collectors for solar heat integration in industrial processes,” *Renewable Energy*, vol. 152, pp. 984–998, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.109>
- [16] M. Imtiaz Hussain, C. Ménézo, and J.-T. Kim, “Advances in solar thermal harvesting technology based on surface solar absorption collectors: A review,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 187, pp. 123–139, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.027>
- [17] M. P. Islam and T. Morimoto, “Advances in low to medium temperature non-concentrating solar thermal technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2066–2093, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.030>
- [18] G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, and A. Palombo, “Chapter 6 - solar thermal collectors,” in *Solar Hydrogen Production*, F. Calise, M. D. D’Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini, and D. Ferrero, Eds. Academic Press, 2019, pp. 151–178. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00006-0>
- [19] A. Veera Kumar, T. Arjunan, D. Seenivasan, R. Venkatramanan, and S. Vijayan, “Thermal performance of an evacuated tube solar collector with inserted baffles for air heating applications,” *Solar Energy*, vol. 215, pp. 131–143, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.037>
- [20] M. Aramesh and B. Shabani, “On the integration of phase change materials with evacuated tube solar thermal collectors,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 132, p. 110135, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110135>
- [21] S. Suman, M. K. Khan, and M. Pathak, “Performance enhancement of solar collectors - a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 192–210, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.087>
- [22] A. Shafieian, M. Khiadani, and A. Nosrati, “A review of latest developments, progress, and applications of heat pipe solar collectors,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 95, pp. 273–304, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.014>
- [23] S. A. Waghmare and N. P. Gulhane, “Design configurations and possibilities of reflector shape for solar compound parabolic collector by ray tracing simulation,” *Optik*, vol. 176, pp. 315–323, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.09.082>
- [24] C. Jiang, L. Yu, S. Yang, K. Li, J. Wang, P. D. Lund, and Y. Zhang, “A review of the compound parabolic concentrator (cpc) with a tubular absorber,” *Energies*, vol. 13, no. 3, p. 695, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en13030695>
- [25] D. Gao, G. Gao, J. Cao, S. Zhong, X. Ren, Y. N. Dabwan, M. Hu, D. Jiao, T. H. Kwan, and G. Pei, “Experimental and numerical analysis of an efficiently optimized evacuated flat plate solar collector under medium temperature,” *Applied Energy*, vol. 269, p. 115129, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115129>
- [26] L. Kumar, M. Hasanuzzaman, and N. Rahim, “Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review,” *Energy Conversion and Management*, vol. 195, pp. 885–908, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.081>
- [27] E. Zarza-Moya, “7 - concentrating solar thermal power,” in *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*, T. M. Letcher and V. M. Fthenakis, Eds. Academic Press, 2018, pp. 127–148. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811479-7.00007-5>
- [28] O. A. López-Núñez, J. A. Alfaro-Ayala, O. Jaramillo, J. Ramírez-Minguela, J. C. Castro, C. E. Damián-Ascencio, and S. Cano-Andrade, “A numerical analysis of the energy and entropy generation rate in a linear Fresnel reflector using computational fluid dynamics,” *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1083–1100, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.144>
- [29] D. Sakthivadivel, K. Balaji, D. Dsilva Winfred Rufuss, S. Iniyar, and L. Suganthi, “Chapter 1 - solar energy technologies: principles and applications,” in *Renewable-Energy-Driven Future*, J. Ren, Ed. Academic Press, 2021, pp. 3–42. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820539-6.00001-7>

- [30] Solar Payback, *Calor solar para la industria*. Solar Payback. [Online]. Available: <https://bit.ly/3jJE10l>
- [31] D. Oosthuizen, N. J. Goosen, and S. Hess, "Solar thermal process heat in fishmeal production: Prospects for two South African fishmeal factories," *Journal of Cleaner Production*, vol. 253, p. 119818, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119818>
- [32] A. Cetina-Quiñones, J. Xamán, A. Bassam, M. Escalante Soberanis, and I. Pérez-Quintana, "Thermo-economic analysis of a flat solar collector with a phase changing material under tropical climate conditions: Residential and industrial case," *Applied Thermal Engineering*, vol. 182, p. 116082, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116082>
- [33] A. Anastasovski, "Improvement of energy efficiency in ethanol production supported with solar thermal energy – a case study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 278, p. 123476, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123476>
- [34] C. Maillot, J. Castaing-Lasvignottes, and O. Marc, "Modelling and dynamic simulation of solar heat integration into a manufacturing process in reunion island," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 118–123, 2019, the 2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM 2019, 8-10 March 2019, Sun City, South Africa. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.013>
- [35] A. Allouhi, Y. Agrouaz, M. Benzakour Amine, S. Rehman, M. Buker, T. Kousksou, A. Jamil, and A. Benbassou, "Design optimization of a multi-temperature solar thermal heating system for an industrial process," *Applied Energy*, vol. 206, pp. 382–392, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.196>
- [36] F. B. Tilahun, R. Bhandari, and M. Mamo, "Design optimization and control approach for a solar-augmented industrial heating," *Energy*, vol. 179, pp. 186–198, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.142>
- [37] R. R. Milczarek, J. J. Ferry, F. S. Alleyne, C. W. Olsen, D. A. Olson, and R. Winston, "Solar thermal drum drying performance of prune and tomato pomaces," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 106, pp. 53–64, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.08.009>
- [38] P. K. Ktistis, R. A. Agathokleous, and S. A. Kalogirou, "Experimental performance of a parabolic trough collector system for an industrial process heat application," *Energy*, vol. 215, p. 119288, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119288>
- [39] M. H. Rittmann-Frank, J. Möllenkamp, M. Caflisch, and A. Häberle, "Evaluation of solar process heat systems in Switzerland," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2033, no. 1, p. 150005, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5067158>
- [40] A. Castro, J. a. P. Cardoso, L. F. Mendes, P. Azevedo, and J. a. F. Mendes, "Pre-heating boiler feedwater for expanded cork agglomerate production using a parabolic trough system," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2033, no. 1, p. 150002, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5067155>
- [41] M. Ghazouani, M. Bouya, M. Benaissa, K. Anoune, and M. Ghazi, "Thermal energy management optimization of solar thermal energy system based on small parabolic trough collectors for bitumen maintaining on heat process," *Solar Energy*, vol. 211, pp. 1403–1421, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.074>
- [42] Suyanto, R. Hantoro, A. Suharto, R. Saleh, and T. D. Reynaldi, "A review of linear Fresnel reflector technology for heating sulphur liquid in nickel processing industry," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2088, no. 1, p. 020034, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.509528>
- [43] A. Buscemi, D. Panno, G. Ciulla, M. Beccali, and V. Lo Brano, "Concrete thermal energy storage for linear Fresnel collectors: Exploiting the south mediterranean's solar potential for agri-food processes," *Energy Conversion and Management*, vol. 166, pp. 719–734, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.075>
- [44] M. Biencinto, R. Bayón, L. González, R. Christodoulaki, and E. Rojas, "Integration of a parabolic-trough solar field with solid-solid latent storage in an industrial process with different temperature levels," *Applied Thermal Engineering*, vol. 184, p. 116263, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116263>
- [45] A. K. Sharma, C. Sharma, S. C. Mullick, and T. C. Kandpal, "Financial viability of solar industrial process heating and cost of carbon mitigation: A case of dairy industry in India," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 27, pp. 1–8, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.03.007>

- [46] O. May Tzuc, A. Bassam, L. J. Ricalde, O. Jaramillo, M. Flota-Bañuelos, and M. Escalante Soberanis, “Environmental-economic optimization for implementation of parabolic collectors in the industrial process heat generation: Case study of Mexico,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 242, p. 118538, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118538>
- [47] F. Cortés, M. Ibarra, F. Moser, I. Muñoz, A. Crespo, and C. Murray, “Techno-economical evaluation of parabolic trough collectors systems for steam processes in the Chilean industry,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 2033, no. 1, p. 150003, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5067156>
- [48] N. E. Laadel, H. Agalit, A. Mouaky, and E. G. Bennouna, “Potential of solar heat integration in medium temperature industrial processes in Morocco,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 2126, no. 1, p. 150005, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5117661>
- [49] C. Brunner, B. Muster-Slawitsch, A. Grubbauer, J. Koschikowski, I. Oller, C. Sattler, K. Hennecke, D. Krüger, M. Duke, and C. Ozansoy, *Solar Energy in Industrial Water and Wastewater management*. IEA Solar Heating & Cooling Programme, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BNw9kH>
- [50] A. Frein, M. Motta, M. Berger, and C. Zahler, “Solar DSG plant for pharmaceutical industry in Jordan: Modelling, monitoring and optimization,” *Solar Energy*, vol. 173, pp. 362–376, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.072>
- [51] S. K. Verma, K. Sharma, N. K. Gupta, P. Soni, and N. Upadhyay, “Performance comparison of innovative spiral shaped solar collector design with conventional flat plate solar collector,” *Energy*, vol. 194, p. 116853, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116853>
- [52] N. R. Peralta and P. Gleckman, “The engineering design of a high-performance parabolic trough collector using lumber for the support structure,” *Solar Energy*, vol. 191, pp. 382–399, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.038>
- [53] Solar Payback. (2019) Mapa mundial de proveedores ship. [Online]. Available: <https://bit.ly/3zRXZvJ>
- [54] G. Quiñones, C. Felbol, C. Valenzuela, J. M. Cardemil, and R. A. Escobar, “Analyzing the potential for solar thermal energy utilization in the Chilean copper mining industry,” *Solar Energy*, vol. 197, pp. 292–310, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.009>
- [55] T. Jia, J. Huang, R. Li, P. He, and Y. Dai, “Status and prospect of solar heat for industrial processes in China,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 475–489, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.077>
- [56] H. Ortega, *Energía solar térmica para procesos industriales en México. Estudio base de mercado*. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3l0qa5o>
- [57] T. Hove, “A thermo-economic model for aiding solar collector choice and optimal sizing for a solar water heating system,” in *Africa-EU Renewable Energy Research and Innovation Symposium 2018 (RERIS 2018)*, M. Mpholo, D. Steuerwald, and T. Kukeera, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 1–19. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93438-9_1
- [58] I. Lillo-Bravo, E. Pérez-Aparicio, N. Sancho-Caparrini, and M. A. Silva-Pérez, “Benefits of medium temperature solar concentration technologies as thermal energy source of industrial processes in Spain,” *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 2950, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en11112950>
- [59] BCE. (2021) Consulta por monedas extranjeras. Banco Central del Ecuador. [Online]. Available: <https://bit.ly/3h9OS2a>
- [60] IEA. (2020) Tracking industry 2020. International Energy Agency, Paris. [Online]. Available: <https://bit.ly/3neCjpU>
- [61] C. McMillan, C. Schoeneberger, J. Zhang, P. Kurup, E. Masanet, R. Margolis, S. Meyers, M. Bannister, E. Rosenlieb, and W. Xi, *Opportunities for Solar Industrial Process Heat in the United States*. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-77760, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3zYSsDG>
- [62] A. K. Sharma, C. Sharma, S. C. Mullick, and T. C. Kandpal, “Ghg mitigation potential of solar industrial process heating in producing cotton based textiles in india,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 145, pp. 74–84, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.161>
- [63] A. Kylili, P. A. Fokaides, A. Ioannides, and S. Kalogirou, “Environmental assessment

- of solar thermal systems for the industrial sector,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 99–109, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.150>
- [64] C. Brunner, B. Muster-Slawitsch, S. Meitz, and E. Frank, *Solar Heat Integrations in Industrial Processes*. IEA Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Programme, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BNG8qb>
- [65] IEA, *Energy Technology Perspectives 2020*. International Energy Agency, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3tqcep8>