



Energía solar concentrada para procesos industriales: un recurso estratégico hacia la sostenibilidad

González-Mora, E. y Durán-García, M. D. (2025). Energía solar concentrada para procesos industriales: un recurso estratégico hacia la sostenibilidad [*Postprint*]. CIENCIA *ergo-sum*, 33. <https://doi.org/10.30878/ces.v33n0a54>

Sección: Espacio del Divulgador

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Esta versión del artículo es una “versión final del autor” que fue aceptada por un proceso de **evaluación por pares ciegos**. Este documento diferirá en formato respecto a la “versión del editor”, la cual se someterá a un proceso de corrección de estilo y de diseño editorial. De ninguna forma se modificará el contenido. Todas las ideas que se presentan son responsabilidad del autor.

**Energía solar concentrada para procesos industriales: un recurso
estratégico hacia la sostenibilidad**
**Concentrated solar energy for industrial processes: a strategic resource
for sustainability**

Eduardo González-Mora, Universidad Autónoma del Estado de México, México¹

Correo electrónico: egonzalezmo@uaemex.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0879-475X>

Ma. Dolores Durán-García, Universidad Autónoma del Estado de México, México

Correo electrónico: mddurang@uaemex.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3584-4783>

Recepción: 4 de noviembre de 2024

Aprobación: 18 de marzo de 2025

RESUMEN

La energía solar concentrada es una tecnología clave para reducir la dependencia de combustibles fósiles en la industria, generando el calor necesario para diferentes procesos industriales. A pesar de su limitada penetración, su potencial es significativo para aplicaciones industriales de calor de proceso. Este artículo analiza cómo la energía solar concentrada puede ayudar a descarbonizar los procesos industriales. Se muestra que esta tecnología es viable para generar calor en un rango amplio de temperaturas, sustituyendo parcialmente los combustibles fósiles. Estos resultados resaltan su capacidad para reducir costos y emisiones, siendo cruciales para mitigar el cambio climático y cumplir las perspectivas medioambientales a nivel nacional e internacional. Las industrias que integren estas tecnologías estarán mejor preparadas para un futuro sostenible.

PALABRAS CLAVE: energía solar concentrada, calor solar para procesos industriales, descarbonización, concentradores solares.

ABSTRACT

Concentrated solar power is a key technology for reducing the dependence on fossil fuels in industry by generating the heat needed for different industrial processes. Despite its limited adoption, its potential is significant for industrial process heat applications. This article discusses how concentrated solar power can help decarbonise industrial processes. We show that this technology is viable for generating heat over a wide range of temperatures, partially replacing fossil fuels. These results highlight its ability to reduce costs and emissions, which are crucial to mitigating climate change and meeting national and international environmental perspectives. Industries that integrate these technologies will be better prepared for a sustainable future.

KEYWORDS: concentrated solar energy, solar heat for industrial processes, decarbonisation, solar concentrators.

¹ Autor para correspondencia.

INTRODUCCIÓN

El mundo enfrenta retos significativos en el uso y aprovechamiento de la energía, especialmente debido a las emisiones contaminantes de los combustibles fósiles. Según datos de REN21, de los 399 EJ consumidos globalmente en 2022, solo el 12.9% provino de energías renovables (REN21, 2024a). Esto resalta el largo camino hacia el cumplimiento del Objetivo 7 de la Agenda 2030: asegurar energía asequible y no contaminante (ONU, 2024). Una alternativa clave para lograrlo y reducir las emisiones es la integración de tecnologías de energía renovable, como la solar.

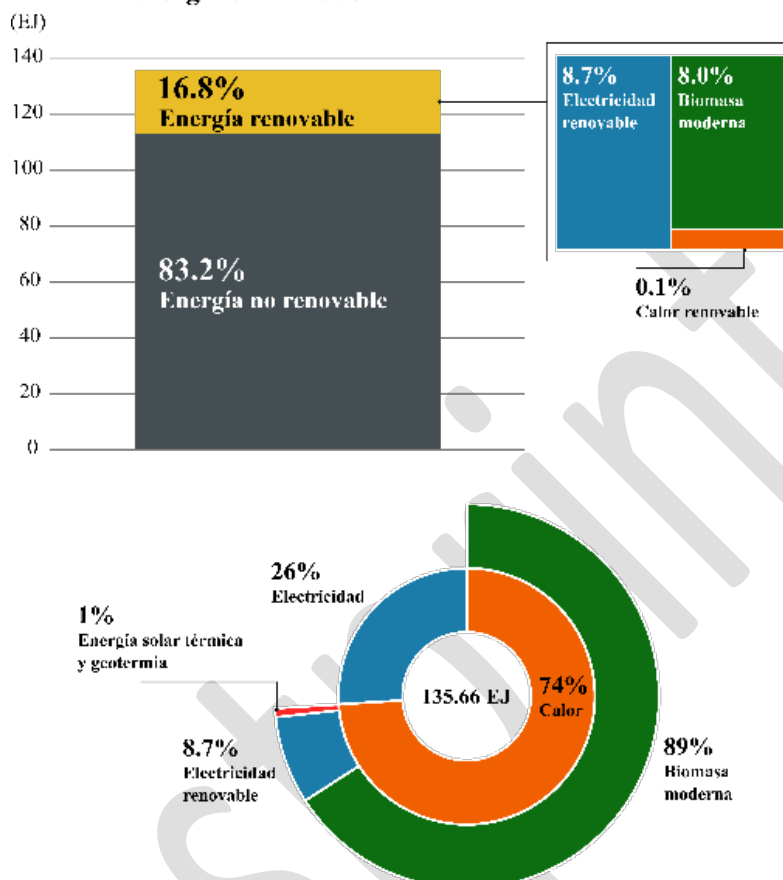
Al pensar en el uso de la energía solar, lo más común es asociarla con sistemas fotovoltaicos para generar electricidad o con calentadores de agua sanitaria, como los sistemas termosolares de placa plana o tubos evacuados, que están presentes en el 13.4% de las viviendas en México (Elizabeth Rios, 2023). No obstante, la energía solar también puede ofrecer una solución menos visible pero igualmente importante: generar calor para procesos industriales.

En 2021, la industria consumió 135.66 EJ de energía en diversos procesos, lo que equivale al 34% del consumo mundial. De esta energía, el 83.2% proviene de fuentes no renovables y solo el 16.8% de energías renovables (Figura 1). La mayor parte de esta energía se utiliza en forma de calor, que representa el 74% del total. De esta energía térmica, el 89% se genera a partir de biomasa moderna², el 10% mediante electricidad renovable utilizando resistencias eléctricas, y menos del 1% proviene de la energía solar térmica y la geotermia (REN21, 2024a).

En México, el panorama industrial es algo diferente. Según el Balance Nacional de Energía del 2022, el sector industrial consume el 22.79% de la energía total del país, lo que equivale a poco más de 940 PJ (SENER, 2023). La Figura 2 muestra el consumo de energía por fuente en el sector industrial mexicano, mientras que la Figura 3 desglosa la matriz energética de distintas industrias. Ambas figuras revelan un uso limitado de la energía solar, lo que sugiere una importante oportunidad para el desarrollo de esta tecnología. En contraste, la madera no aparece con una gran aportación al suministro de calor, ya que su uso está restringido principalmente a la industria maderera, mientras que el mayor consumo de leña se da en los hogares (SENER, 2023).

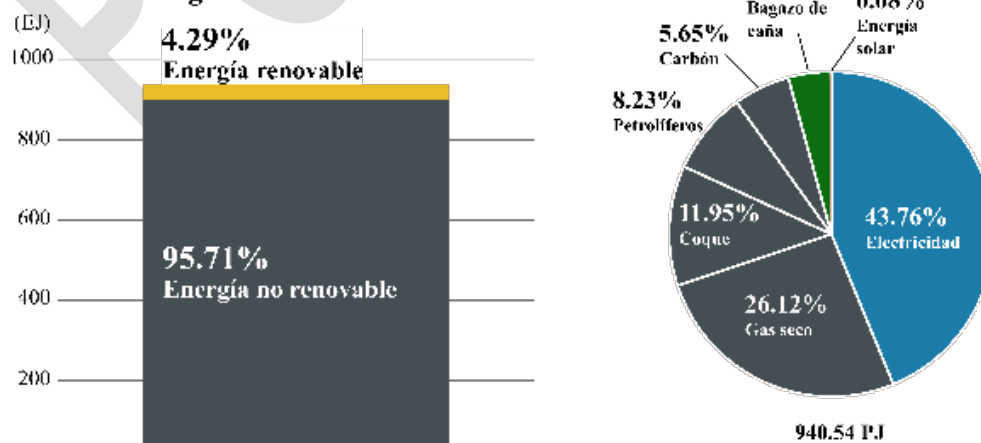
² La biomasa moderna incluye el calor suministrado por redes energéticas urbanas.

Figura 1
Consumo de energía en industria a nivel mundial
Cuota energética en el consumo final de
energía en la industria



Fuente: Elaboración propia, con datos de REN21 (2024b, 2024a).

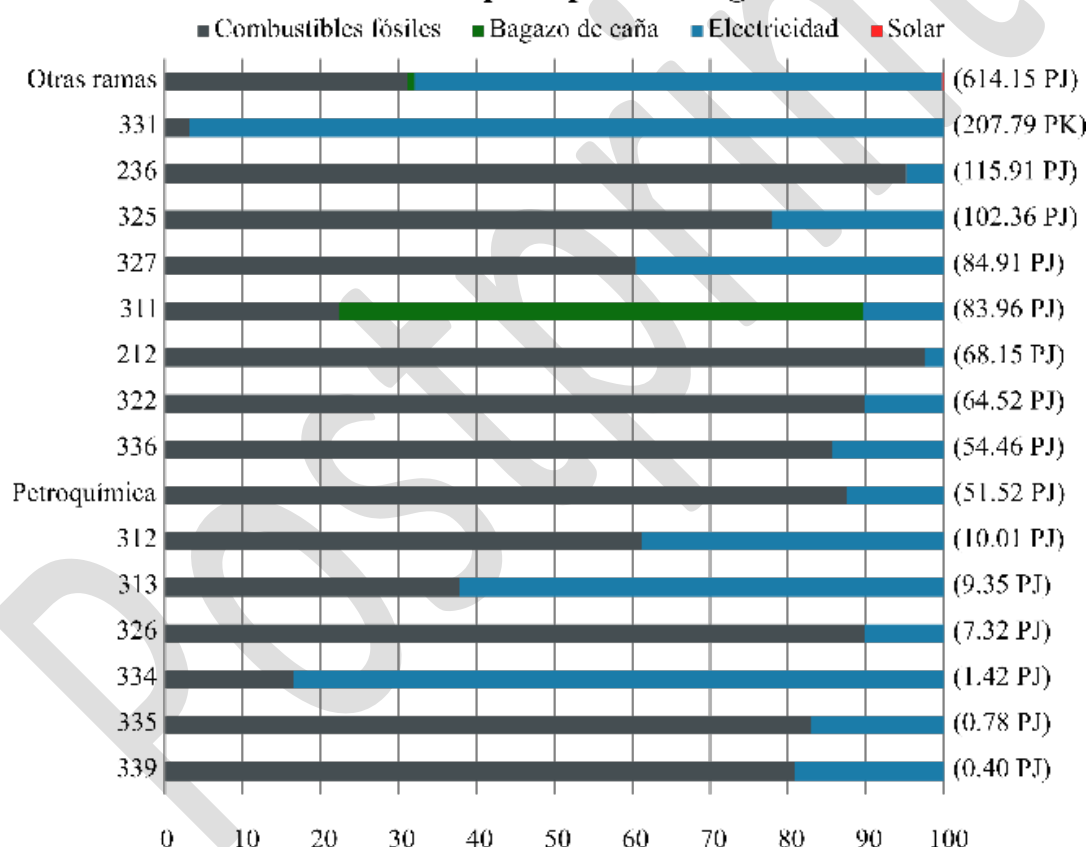
Figura 2
Consumo de energía en industria en México
Cuota energética en el consumo final de
energía en la industria



Fuente: Elaboración propia, con datos de Balance Nacional de Energía 2022 (SENER, 2023).

Es bien sabido que la radiación solar genera calor, pero su potencial para suministrar energía térmica a procesos industriales sigue siendo poco explorado. Esto se debe, en gran parte, al desconocimiento de la tecnología y a la falta de comprensión sobre los límites físicos para aprovechar eficientemente el recurso solar. En este artículo busca exponer de manera clara y accesible el potencial del calor solar para procesos industriales como una solución clave hacia la sostenibilidad energética empleando tecnologías de concentración solar.

Figura 3
Matriz energética de las principales industrias en México
Estructura del consumo energético de las principales ramas
industriales por tipo de energético



Fuente: Elaboración propia, con datos de Balance Nacional de Energía 2022 (SENER, 2023).

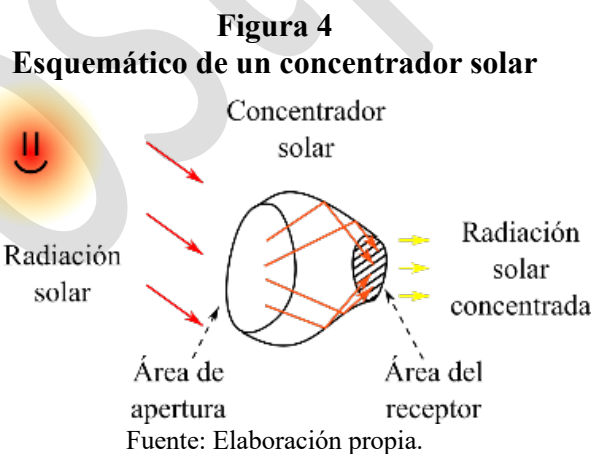
Nota: En la Figura se indica el número del sector industrial designado por la SENER. A continuación se enlista el nombre completo: 212: Minería de minerales metálicos y no metálicos, excepto petróleo y gas, 236: Edificación, 311: Industria alimentaria, 312: Industria de las bebidas y del tabaco, 313: Fabricación de insumos textiles y acabados textiles, 322: Industria del papel, 325: Industria química, 326: Industria del plástico y del hule, 327: Fabricación de productos a base de minerales no metálicos, 331: Industrias metálicas básicas, 334: Fabricación de equipo de computación, comunicación, medición y de otros equipos, componentes y accesorios electrónico, 335: Fabricación de accesorios, aparatos eléctricos y equipo de generación de energía eléctrica, 336: Fabricación de equipo de transporte, 339: Otras industrias manufactureras.

1. ¿QUÉ ES LA CONCENTRACIÓN SOLAR?

La concentración solar es una tecnología que emplea espejos o lentes para redirigir la radiación solar hacia un receptor. Este proceso convierte la energía solar en calor útil, que puede transformarse en electricidad, combustibles, o utilizarse directamente como calor (Lovegrove & Stein, 2021). El dispositivo que capta y concentra la radiación en una superficie reducida se llama concentrador solar, cuyo funcionamiento se muestra esquemáticamente en la Figura 4.

1. 1. Breve historia de la concentración solar

La concentración solar no es un concepto nuevo. A lo largo de la historia, se han desarrollado dispositivos basados en principios de geometría y óptica con diferentes fines. Uno de los primeros usos documentados de la energía solar concentrada se atribuye al científico griego Arquímedes, quien, en el 212 a.C., ideó un método para incendiar las naves romanas que atacaban Siracusa, utilizando espejos cóncavos de metal pulido para concentrar los rayos solares en los barcos enemigos (Anderson, 1977; Hénault et al., 2022). Aunque la veracidad de esta historia es discutida, ilustra un ejemplo temprano de aplicaciones de alta temperatura mediante concentración solar.



Durante los siglos XVII y XVIII, varios inventores y científicos desarrollaron dispositivos de concentración solar. En 1615, Solomon de Caux diseñó una bomba solar que utilizaba lentes para concentrar la luz del sol y calentar agua, demostrando un uso temprano de la energía solar para trabajos mecánicos (Kemper, 1977). El naturalista George Louis Leclerc, conde de Buffon (1707-1788), creó una serie de hornos solares, logrando quemar una pila de

madera a 60 metros de distancia con 168 espejos en 1747 (Kemper, 1977; Meinel & Meinel, 1977). Antoine Lavoisier, considerado el padre de la química moderna, construyó en 1774 un horno solar con lentes de vidrio que alcanzaba temperaturas de hasta 1780 °C, permitiendo estudios pioneros sobre la fusión de metales y logrando fundir platino (Delyannis, 2003).

El siglo XIX fue clave para el desarrollo de las tecnologías solares. Augustin Mouchot (1825-1912), un matemático francés, es reconocido como uno de los pioneros de la energía solar. En 1861, Mouchot diseñó el primer motor de vapor solar utilizando un espejo parabólico, conocido como axicon, para concentrar la luz solar y generar vapor. En 1878, junto con su colaborador Abel Pifre, presentó un gran espejo parabólico de 20 m² en la Exposición Internacional de París, capaz de operar una máquina de impresión, demostrando la viabilidad del uso industrial de la energía solar (Delyannis, 2003; Perrot, 1979). Entre 1871 y 1884, John Ericsson desarrolló diversos motores solares, destacando sus prototipos basados en el ciclo termodinámico que lleva su nombre, los cuales calentaban aire para convertir el calor solar en fuerza motriz (Meinel & Meinel, 1977).

A finales del siglo XIX y principios del XX, el ingeniero estadounidense Frank Shuman (1862-1918) realizó importantes avances en la ingeniería solar al construir una planta de bombeo solar en Maadi, Egipto, en 1912. Esta instalación utilizaba espejos cilíndricos parabólicos para concentrar la luz solar en tubos lineales y generaba entre 37 y 45 kW de energía, funcionando de forma continua durante cinco horas al día. Este sistema fue una de las primeras aplicaciones comerciales de la energía solar concentrada. Sin embargo, la planta fue abandonada en 1915 debido al estallido de la Primera Guerra Mundial y al descubrimiento de grandes reservas de petróleo, lo que hizo que la energía solar dejara de ser competitiva económicamente (Kreider & Kreith, 1977; Kreith & Kreider, 1978; Meinel & Meinel, 1977).

Durante gran parte del siglo XX, la investigación en tecnologías solares avanzó lentamente. Sin embargo, la crisis del petróleo de 1973 reavivó el interés en las energías renovables, incluida la solar. Esta crisis estimuló el desarrollo de sistemas de concentración solar para generar electricidad, como los colectores de canal parabólico y los discos parabólicos con motores Stirling. También surgieron tecnologías más avanzadas, como las torres centrales, donde un campo de heliostatos (espejos con seguimiento de doble eje) concentra la luz solar

en un receptor central ubicado en una torre. Estas tecnologías alcanzan temperaturas extremadamente altas, necesarias para generar vapor y operar ciclos termodinámicos, como el ciclo Rankine, empleados para la producción de electricidad. Este periodo marcó el inicio de la industrialización de la energía solar concentrada para la generación eléctrica (Goswami, 2022).

El desarrollo de la concentración solar se enfocó inicialmente en sistemas para la producción de electricidad mediante ciclos de potencia. Por eso, es común que se conozca como concentración solar de potencia (*Concentrated Solar Power*, CSP). Sin embargo, existen muchas otras aplicaciones en las que los sistemas de concentración solar pueden utilizarse.

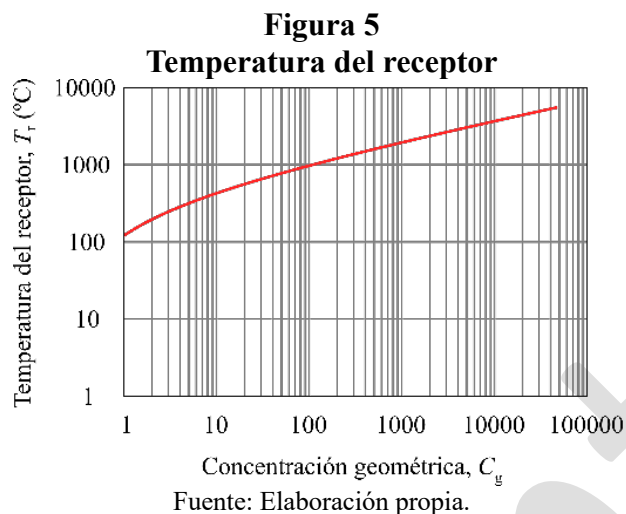
2. FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA

El parámetro clave en los sistemas de concentración solar es la concentración geométrica, ya que permite estimar la cantidad de radiación solar que se puede aprovechar tras pasar por el sistema óptico. Como se muestra en la Figura 4, la relación de concentración geométrica se define de la siguiente manera (Goswami, 2022):

$$C_g = \frac{A_{ap}}{A_r} \quad (1)$$

donde A_{ap} es el área de apertura por donde ingresa la luz solar, y A_r es el área del receptor a donde llega la luz concentrada. Cuanto mayor sea la concentración geométrica, más alta será la temperatura alcanzable junto con el tamaño y la distancia entre la Tierra y el Sol, establece límites tanto para la concentración geométrica máxima como para la temperatura de operación (Goswami, 2022). La temperatura máxima que se puede alcanzar en el receptor (T_r) de un concentrador en la superficie terrestre es de 5777 K (5503.85°C), que corresponde al valor de la temperatura efectiva del Sol (T_s) cuando la concentración geométrica es de 46165 ($C_{g,máx}$) (Goswami, 2022; Winston et al., 2020).

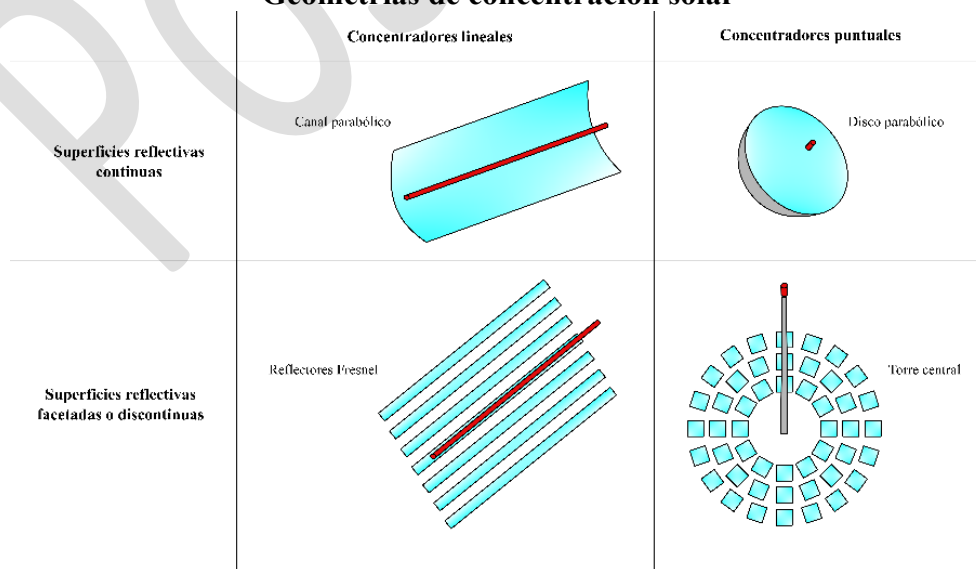
En un concentrador ideal, sin imperfecciones y en equilibrio térmico con el entorno (Kalogirou, 2024), la temperatura máxima del receptor puede calcularse con la Ecuación 2, o visualizarse gráficamente en la Figura 5.



2. 1. Sistemas de concentración solar

Hoy en día existen numerosos sistemas de concentración solar, cada uno con sus ventajas y desventajas, y con condiciones de operación que limitan las temperaturas que se pueden alcanzar en el receptor. La Tabla 1 presenta algunas de las tecnologías más utilizadas en el sector de energía solar térmica, especificando sus temperaturas de operación y tipos de receptor. La Figura 6 muestra las cuatro geometrías de concentración más desarrolladas. En general, todas estas tecnologías pueden adaptarse para generar calor de proceso, aunque en este análisis solo se considerarán aquellas con una concentración geométrica mayor a 1.

Figura 6
Geometrías de concentración solar



Fuente: Elaboración propia.

Los concentradores solares se clasifican en dos tipos: concentradores lineales y puntuales. Los lineales utilizan reflectores que concentran la radiación solar en un receptor lineal. Las dos tecnologías dominantes en esta categoría son los concentradores cilindro-parabólicos (o de canal parabólico) y los reflectores lineales Fresnel. En contraste, los concentradores puntuales redirigen la radiación solar hacia un punto focal. Los ejemplos más comunes de concentradores puntuales son los discos parabólicos y las torres centrales. Ambos tipos de sistemas se esquematizan en la Figura 6.

Tabla 1
Colectores de energía solar térmica

Movimiento	Tipo	Absorbedor	Concentración geométrica	Rango de temperatura indicativo (°C)
Estacionario	Placa plana	Plano	1	30-80
	Tubos evacuados	Plano	1	50-200
Seguimiento en un eje	Reflector Fresnel lineal	Tubular	10-40	60-250
	Concentrador de canal cilíndrico	Tubular	10-50	60-300
	Concentrador de canal parabólico	Tubular	10-85	60-400
Seguimiento en dos ejes	Disco parabólico	Puntual	600-2000	100-1500
	Torre central campo de helióstatos	Puntual	300-1500	150-2000

Fuente: Adaptado de (Kalogirou, 2024).

Nota: El rango de temperaturas en algunos casos es mucho más alto, dependiendo del fluido que se esté calentando.

2. 1. 1. Concentrador de canal parabólico

Los sistemas cilindro-parabólicos (*Parabolic Trough Collector*, PTC) utilizan concentradores parabólicos lineales para enfocar la radiación solar en un receptor tubular encapsulado en vidrio, ubicado en la línea focal del concentrador. Estos sistemas alcanzan concentraciones geométricas de entre 30 y 100, y temperaturas de hasta 400°C. Siguen al Sol en un solo eje, generalmente de este a oeste, para captar energía solar durante todo el día. El fluido caloportador, como un aceite sintético, se calienta en el receptor y transfiere el calor a otro fluido, como agua, a través de un intercambiador, convirtiéndola en vapor para diversos

procesos. En algunos casos, el fluido caloportador puede ser agua/vapor, eliminando la necesidad de un intercambiador, o incluso aire o sales fundidas. El rendimiento de los PTC depende de factores como el ángulo de incidencia solar, las pérdidas ópticas y la correcta alineación de los colectores, que se ajustan según las necesidades de la aplicación y las condiciones estacionales (Zarza Moya, 2021).

2. 1. 2. Reflectores Fresnel Lineales

Los reflectores lineales Fresnel (*Linear Fresnel Reflector*, LFR) son una tecnología de concentración solar que utiliza filas de espejos planos o ligeramente curvados para reflejar la radiación solar hacia un receptor lineal elevado que permanece fijo sobre el campo de espejos. Aunque están menos desarrollados comercialmente que los colectores parabólicos, los LFR ofrecen ventajas económicas gracias a su diseño simplificado, el uso de facetas de bajo costo y menores requisitos de espacio. Estos sistemas suelen emplear agua como fluido caloportador, aunque también pueden utilizar aceites sintéticos, sales fundidas o aire, y alcanzan temperaturas típicas de 60 a 250°C, aunque se pueden alcanzar hasta 500°C. Sin embargo, tienen mayores pérdidas ópticas debido al sombreado y bloqueo entre los espejos. Un diseño mejorado, conocido como sistema compacto de reflectores Fresnel (CLFR), optimiza el rendimiento al incorporar varios receptores, lo que minimiza el sombreado y permite aprovechar mejor el terreno disponible (Platzer et al., 2021).

2. 1. 3. Torre central de campo de helióstatos

Los sistemas de torre central (*Central Tower Receiver*, CTR) utilizan un campo de helióstatos, espejos con seguimiento en dos ejes, para concentrar la radiación solar en un receptor situado en la parte superior de una torre. Estos sistemas logran relaciones de concentración entre 500 y 5000, alcanzando temperaturas de hasta 1500°C. Cada helióstato debe seguir una posición óptima entre el Sol y el receptor para mantener la concentración solar, lo que permite generar calor de proceso a alta temperatura o utilizar ciclos de potencia avanzados. Dependiendo del diseño, los fluidos caloportadores pueden ser agua, sales fundidas, aire o reactivos químicos para procesos de química solar. Aunque estos sistemas tienen pérdidas ópticas por el ángulo de incidencia, sombras entre

heliostatos y pérdidas atmosféricas debido a la distancia entre los espejos y el receptor, su alto rendimiento óptico ayuda a reducir el tamaño del campo solar y los costos de inversión (Vant-Hull, 2021).

2. 1. 4. Disco parabólico

Los concentradores de disco parabólico (*Parabolic Dish Reflector*, PDR) son sistemas de concentración puntual que utilizan un espejo parabólico con seguimiento de dos ejes para enfocar la radiación solar en un receptor térmico situado en su foco, logrando concentraciones de flujo entre 1000 y 10000 y temperaturas superiores a los 1500°C. El calor absorbido por el receptor se transfiere a un fluido de trabajo, como aire o agua, para generar energía. Estos sistemas destacan por su modularidad, lo que les brinda flexibilidad en la instalación, aunque son menos maduros y tienen un despliegue comercial menor en comparación con otras tecnologías. Los concentradores de disco parabólico pueden ser monolíticos o segmentados; los monolíticos son más rígidos y ofrecen mejor calidad óptica, pero a un costo de fabricación más alto, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren altas temperaturas, como la generación de electricidad mediante motores térmicos o procesos termoquímicos (Schiel & Keck, 2021).

3. El calor solar para procesos industriales (SHIP – Solar Heat for Industrial Processes)

El calor de proceso es una forma de energía térmica esencial para muchas industrias, empleada en operaciones como calentamiento, secado, evaporación y generación de vapor. Este tipo de energía se emplea en sectores como el alimentario, textil, químico y metalúrgico, donde el calor es necesario para transformar materias primas en productos finales. El interés por la adopción de tecnologías solares para generar calor de proceso ha aumentado significativamente, impulsada por la necesidad de descarbonizar la industria y mejorar la eficiencia energética. A medida que las empresas buscan alternativas sostenibles a los combustibles fósiles, el calor solar se presenta como una solución viable y ambientalmente responsable.

Los sistemas de energía solar térmica pueden generar calor en un amplio rango de temperaturas (Figura 7), lo que los hace adecuados para muchas aplicaciones industriales.

Estos sistemas se dividen en tres categorías según la temperatura que pueden alcanzar. Para aplicaciones de baja temperatura, hasta 150°C , se usan en procesos como el lavado y secado de alimentos. En el rango de temperaturas medias, entre 150°C y 400°C , se aplican en la generación de vapor, pasteurización y esterilización. Por último, para aplicaciones de alta temperatura, superiores a 400°C , son ideales para procesos más intensivos como la fundición de metales, el procesamiento químico y la producción de cemento. Esta capacidad de alcanzar diversas temperaturas hace que la energía solar térmica sea sumamente versátil y útil en distintas industrias.

La elección del tipo de colector solar térmico es fundamental para optimizar el rendimiento y la operación de un proceso industrial. El primer criterio a considerar es la temperatura requerida para la aplicación específica. Por ejemplo, los colectores de baja y media temperatura, como los concentradores de canal parabólico y los reflectores lineales Fresnel, son ideales para procesos que requieren temperaturas de hasta 400°C . Para aplicaciones que necesitan temperaturas superiores, como los procesos termoquímicos, las torres centrales y los concentradores parabólicos de disco son más apropiados. También es esencial tener en cuenta el espacio disponible, ya que los sistemas de concentración solar requieren áreas amplias debido a la necesidad de seguimiento solar. Además, la continuidad del suministro de calor es clave, y puede garantizarse mediante sistemas de almacenamiento térmico, lo que permite una operación constante incluso en condiciones de baja radiación solar.

Figura 7
Comparativa de rangos de temperatura para diferentes aplicaciones y tecnologías

Industria	Baja		Media		Alta
	Por debajo de los 150°C		150 a 400°C		>400°C
Química	Reacciones bioquímicas	Ebullición	Destilación	Jabones	Producción de combustibles
Alimentos y bebidas	Escaldado	Evaporación			
		Cocción	Secado		
		Pasteurización			
Papel		Esterilización			
	Entintado	Blanqueado	Secado		
Goma y plástico			Cocinado		
	Precaentamiento	Secado			
Textiles	Secado	Entintado			
		Blanqueado	Fijado		
Madera		Cocción			
			Compresión		
Lácteos			Secado		
	Concentrados	Esterilización			
Ladrillos	Pasteurización		Secado		
		Preparación	Curado		
Plásticos			Destilado		
			Separación		
			Extensión		
Farmacia			Secado		
			Diferentes procesos		
Industria en general	Precaentamiento de agua				
	Calefacción		Enfriamiento industrial		

100°C	150°C	250°C	350°C
 Plano Tubos evacuados	 Canal parabólico / Reflector Fresnel lineal de pequeñas dimensiones (sin receptor evacuado)	 Disco parabólico Canal parabólico / Reflector Fresnel lineal de grandes dimensiones (con receptor evacuado)	

Fuente: Elaboración propia con datos de (D'Auria et al., 2024; Schoeneberger et al., 2020; Solar Payback, 2018; Zarza et al., 2022).

En la industria alimentaria, el calor de proceso solar se aplica en diversas áreas clave. Los rangos de temperatura típicos incluyen secado (30-90°C), lavado (60-90°C), pasteurización (60-80°C), ebullición (95-105°C) y esterilización (110-120°C). Estos procesos son esenciales para garantizar la producción de alimentos seguros y de alta calidad. Integrar la energía solar en estos procesos no solo reduce la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también

disminuye los costos operativos y las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a una industria más sostenible.

Por otro lado, la industria química, uno de los sectores con mayor consumo energético, también puede beneficiarse del calor de proceso solar. Este sector, que consume más del 10% de los combustibles fósiles a nivel global y emite 3.3 gigatoneladas de gases de efecto invernadero anualmente, ofrece un gran potencial para la adopción de tecnologías solares. La energía solar puede emplearse para convertir la luz solar en energía química, realizar síntesis fotoquímicas de moléculas valiosas y reducir la contaminación mediante procesos fotoquímicos. Estas aplicaciones permiten que la industria química avance hacia prácticas más sostenibles, reduciendo de manera significativa su huella de carbono.

Asimismo, en la industria textil, la energía solar térmica ofrece importantes oportunidades para reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂. Hasta el 50% de la energía utilizada en una fábrica textil típica puede ser reemplazada por energía solar. Las aplicaciones clave en este sector incluyen blanqueo (60-100°C), teñido (70-90°C), secado y desengrasado (100-130°C), lavado (40-80°C), fijación (160-180°C) y prensado (80-100°C). Implementar sistemas solares térmicos en estos procesos no solo mejora la eficiencia energética, sino que también reduce los costos operativos y contribuye a la sostenibilidad ambiental de la industria.

La Red Temática ESTCI, parte de la red CYTED, ha impulsado el desarrollo y la transferencia de conocimiento sobre la energía solar térmica de concentración en México y otros países de Iberoamérica (CYTED, 2024). La Red ha promovido la investigación, la capacitación y la implementación de estas tecnologías para aplicaciones industriales y energéticas, fortaleciendo capacidades locales y fomentando proyectos innovadores. En este contexto, el calor de proceso solar se ha consolidado como una herramienta clave para la descarbonización y la mejora de la eficiencia energética en diversas industrias (SENER, 2018; Solar Payback, 2018). Su versatilidad para satisfacer necesidades térmicas, desde bajas hasta altas temperaturas, y su potencial para transformar el panorama energético industrial, refuerzan la importancia de seleccionar e integrar estas tecnologías de manera eficiente, maximizando los beneficios de esta fuente de energía renovable y avanzando hacia un futuro industrial más sostenible.

Un ejemplo destacado en México es la empresa Inventive Power, especializada en la instalación de concentradores de canal parabólico desarrollados por ellos mismos para suministrar calor al sector industrial (Inventive Power, 2024). Con más de 40 proyectos exitosos en todo el país, Inventive Power ofrece dos modelos de concentradores de canal parabólico: el Power Trough 110, que opera entre 60 y 200 °C, y el Power Trough 250, que trabaja entre 90 y 250 °C. Esta flexibilidad permite su implementación en sectores como el alimentario, agropecuario, textil, farmacéutico, químico, y minero (SENER, 2018), así como en otros descritos en la Figura 7.

PROSPECTIVA

El consumo energético en la industria continúa en aumento, y a medida que la crisis climática se intensifica, los compromisos internacionales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, como los del Acuerdo de París, impulsarán a las industrias a buscar alternativas sostenibles. En este contexto, en países altamente industrializados como México, las tecnologías solares térmicas están destinadas a desempeñar un papel clave, no solo por su capacidad para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, sino también por su potencial de mejora continua y adaptación a las demandas futuras.

El desarrollo e implementación de sistemas de concentración solar en la industria vislumbra un futuro donde la mejora del rendimiento energético será clave para el crecimiento industrial sostenible. Las innovaciones en almacenamiento térmico y sistemas de concentración solar harán que estas soluciones sean más accesibles y competitivas, fomentando su adopción en una mayor variedad de sectores industriales. A corto plazo, se espera que las industrias alimentaria y química, altamente dependientes del calor de proceso, lideren la integración de estos sistemas. Sin embargo, a medida que el sector industrial se familiarice con la tecnología y ésta se optimice para reducir costos, sectores con un mayor consumo energético, como el textil y el metalúrgico, también podrán adoptar estas soluciones a mediano plazo.

A largo plazo, el uso de tecnologías solares térmicas podría ir más allá de sus aplicaciones actuales y expandirse a otras áreas críticas. Por ejemplo, la combinación de calor solar con tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial y la automatización industrial podría optimizar los procesos productivos, reduciendo tanto el consumo energético como los residuos y las emisiones contaminantes. La integración de estas tecnologías con redes

inteligentes en la industria permitirá una gestión más eficiente de los recursos energéticos, así como la capacidad de generar múltiples formas de energía a partir del recurso solar. De esta manera, además de producir calor, se podría integrar la generación de frío, agua potable e incluso combustibles como el hidrógeno.

Un factor crucial para asegurar un futuro deseable es anticipar y prevenir posibles barreras tecnológicas y económicas. La implementación masiva de estas tecnologías requiere políticas públicas sólidas que incentiven la inversión en investigación y desarrollo, junto con mecanismos de financiación que faciliten su adopción por parte de pequeñas y medianas empresas. También es esencial prever los posibles obstáculos regulatorios y promover un marco normativo que fomente la estandarización de estas soluciones a nivel nacional, facilitando su escalabilidad.

Desde el punto de vista ambiental, el impacto positivo de la expansión de estas tecnologías en la mitigación del cambio climático es evidente. Las proyecciones internacionales a largo plazo sugieren que, con una adopción decidida de las tecnologías solares térmicas, se podría lograr una reducción significativa de las emisiones globales de CO₂, contribuyendo a la estabilización de la temperatura global, ya que aproximadamente el 50% del consumo energético industrial es en forma de calor. En este sentido, los actores industriales no solo deben adoptar estas tecnologías, sino también innovar en su implementación, colaborando con instituciones académicas y gubernamentales para maximizar su efectividad.

En México, las empresas que buscan demostrar un compromiso profundo con el medio ambiente pueden obtener el certificado de Industria Limpia, otorgado por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). Este reconocimiento se basa en una evaluación rigurosa que garantiza el cumplimiento de las normas ambientales más exigentes y la implementación de prácticas sostenibles que van más allá de las obligaciones legales. Para obtener esta certificación, una empresa debe demostrar un alto nivel de cumplimiento normativo, gestionar sus residuos de manera responsable, optimizar su consumo de recursos y minimizar su impacto en el aire, el agua y el suelo. Además de proyectar una imagen responsable y positiva ante la sociedad, el certificado permite a las empresas diferenciarse de sus competidores, atraer clientes ambientalmente conscientes, acceder a nuevos mercados y reducir costos a largo plazo.

De tal manera, el calor solar para procesos industriales representa una oportunidad histórica para transformar el sector industrial hacia un camino más sostenible. Es crucial actuar con rapidez para consolidar el desarrollo y la adopción de estas tecnologías, anticipando los desafíos futuros y estableciendo los marcos necesarios para asegurar que la transición energética sea no solo exitosa, sino también inclusiva y equitativa para todas las regiones y sectores.

CONCLUSIONES

El calor solar para procesos industriales ofrece una oportunidad importante para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y avanzar hacia la sostenibilidad energética en sectores clave como el alimentario, químico y textil. Aunque el uso de energía solar concentrada en la industria todavía es limitado, tecnologías como los concentradores de canal parabólico y los reflectores Fresnel lineales han demostrado ser soluciones viables para generar calor en un amplio rango de temperaturas.

A nivel mundial, el consumo energético de la industria es considerable, y gran parte de esta energía se utiliza en forma de calor. En México, el sector industrial consume una porción importante de la energía del país, pero el uso de energía solar térmica en este ámbito sigue siendo marginal. Esto indica una oportunidad subexplotada para implementar tecnologías solares térmicas de media temperatura, las cuales podrían contribuir significativamente a la descarbonización y a mejorar la eficiencia energética en las industrias.

La versatilidad de la energía solar térmica permite su aplicación en una amplia gama de procesos industriales, que van desde bajas hasta altas temperaturas. A medida que las empresas buscan cumplir con los compromisos nacionales e internacionales para reducir emisiones, la integración de estas tecnologías surge no solo como una solución sostenible, sino también como una inversión estratégica capaz de reducir los costos operativos a largo plazo.

El desarrollo de políticas públicas adecuadas, el acceso a financiamiento y la colaboración entre sectores industriales y académicos serán fundamentales para impulsar la adopción masiva de estas tecnologías. El calor solar para procesos industriales no solo tiene el potencial de transformar la forma en que se genera y utiliza la energía, sino que también abre el camino hacia un futuro más sostenible y resiliente para la industria a nivel global.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo del Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) a través del Programa Investigadoras e Investigadores. Asimismo, agradecemos a los árbitros por sus valiosas sugerencias y comentarios, que contribuyeron significativamente a mejorar la estructura y claridad del presente trabajo.

REFERENCIAS

Anderson, B. (1977). Solar energy: fundamentals in building design. McGrawHill.

CYTED. (2024). ESTCI - Energía solar térmica de concentración en iberoamérica. https://cyted.org/conteudo.php?idm=246&id_rede=445

D'Auria, M., Grena, R., Lanchi, M., & Liberatore, R. (2024). Heat Supply to Industrial Processes via Molten Salt Solar Concentrators. *Energies*, 17(18), 4541. <https://doi.org/10.3390/en17184541>

Delyannis, E. (2003). Historic background of desalination and renewable energies. *Solar Energy*, 75(5), 357–366. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.002>

Elizabeth Rios. (2023, octubre 26). Menos del 15% de las viviendas en México cuentan con un calentador solar. El Sol de Toluca. <https://www.elsoldetoluca.com.mx/local/menos-del-15-de-las-viviendas-en-mexico-cuentan-con-un-calentador-solar-10909494.html#!#:~:text=%E2%80%9CA%20nivel%20nacional%20solamente%20el%2013.4%25%20de%20las,con%20calentadores%20solares%20en%20sus%20viviendas%E2%80%9D%2C%20expres%C3%B3%20Alvarado.>

Goswami, D. Y. (2022). Principles of Solar Engineering (4a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003244387>

Hénault, F., Grange, B., & Falcoz, Q. (2022). Optics of Concentrating Systems. En Gilles Flamant (Ed.), *Concentrating Solar Thermal Energy: Fundamentals and Applications* (1a ed., p. 85). John Wiley & Sons.

Inventive Power. (2024). Inventive Power. Breaking new ground in Energy.

<https://inventivepower.com.mx>

Kalogirou, S. A. (2024). Solar Energy Collectors. En *Solar Energy Engineering* (3a ed., pp. 127–224). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99350-0.00017-X>

Kemper, J. (1977). Pictorial history of solar energy use. *Sunworld*, 5, 17–32.

Kreider, J. F., & Kreith, F. (1977). *Solar heating and cooling: active and passive design*. McGrawHill.

Kreith, F., & Kreider, J. F. (1978). *Principles of solar engineering*. McGraw-Hill.

Meinel, A. B., & Meinel, M. P. (1977). *Applied Solar Energy. An Introduction* (2a ed.). Addison-Wesley.

ONU. (2024). *Objetivos de desarrollo sostenible*.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

Perrot, M. (1979). Extrait de l’allocution du Professeur Perrot. *Revue Internationale d’Heliotechnique*, 2e Semestre, 1–6.

Platzer, W. J., Mills, D., & Gardner, W. (2021). Linear Fresnel Collector (LFC) solar thermal technology. En K. Lovegrove & W. Stein (Eds.), *Concentrating Solar Power Technology* (2a ed., pp. 165–217). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00006-2>

REN21. (2024a). *Renewables 2024 Global Status Report Collection, Renewables in Energy Demand*.

REN21. (2024b). *Renewables 2024 Global Status Report Collection, Renewables in Energy Supply*.

Schiel, W., & Keck, T. (2021). Parabolic dish concentrating solar power systems. En Keith Lovegrove & Wes Stein (Eds.), *Concentrating Solar Power Technology* (2a ed., pp. 311–355). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00007-4>

Schoeneberger, C. A., McMillan, C. A., Kurup, P., Akar, S., Margolis, R., & Masanet,

E. (2020). Solar for industrial process heat: A review of technologies, analysis approaches, and potential applications in the United States. *Energy*, 206, 118083. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118083>

SENER. (2018). Mapa de ruta tecnológica energía termosolar.

SENER. (2023). Balance Nacional de Energía 2022.

Solar Payback. (2018). Calor solar para la industria: México. En Technical Report (. Solar Payback,.

Vant-Hull, L. L. (2021). Central tower concentrating solar power systems. En Keith Lovegrove & Wes Stein (Eds.), *Concentrating Solar Power Technology* (2a ed., pp. 267–310). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00019-0>

Winston, R., Jiang, L., & Olikar, V. (2020). *Nonimaging Optics: Solar and Illumination System Methods, Design, and Performance*. Crc Press.

Zarza, E., Alarcón, D., Frasquet, M., & Saini, P. (2022). Integration schemes and BOPs more commonly used in commercial SHIP applications. *International Energy Agency (IEA)*.

Zarza Moya, E. (2021). Parabolic-trough concentrating solar power systems. En K. Lovegrove & W. Stein (Eds.), *Concentrating Solar Power Technology* (2a ed., pp. 219–266). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00009-8>

CC BY-NC-ND