

## Revalorización del calor solar para un suministro energético continuo

Luis Adrián López Pérez<sup>1</sup> y Armando Huicochea Rodríguez<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,  
Universidad Autónoma del Estado de Morelos

\* Dirección para correspondencia: [huico\\_chea@uaem.mx](mailto:huico_chea@uaem.mx)

La energía solar es por mucho, la fuente renovable más abundante de que dispone nuestro planeta. Sin embargo, en 2023, de toda la energía solar incidente, la humanidad logró aprovechar aproximadamente 2 500 TWh en forma de electricidad fotovoltaica y 500 TWh en forma de calor mediante colectores solares térmicos, de acuerdo con lo reportado por la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, 2023). Sumadas ambas contribuciones, la energía solar aprovechada corresponde a menos del 2 % del consumo energético total mundial, demostrando su creciente, aunque aún limitado, papel en la matriz energética global. El poco aprovechamiento se debe, en parte, a su intermitencia natural y al clima, que dificultan el aprovechamiento continuo de este inmenso recurso natural.

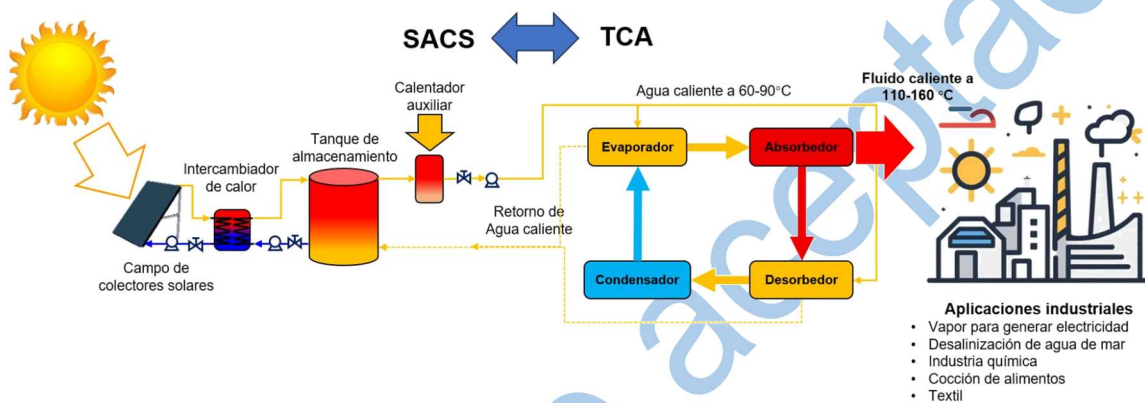
Para aprovechar el calor solar de forma continua, una tecnología sobresaliente es el Sistema de Almacenamiento de Calor Solar (SACS), como se detalla en un artículo previo (López-Pérez y Huicochea, 2026). Sin embargo, esta tecnología presenta una limitación fundamental: almacenar calor a altas temperaturas conlleva pérdidas térmicas crecientes y mayores costos de

aislamiento (López-Pérez *et al.*, 2024; López-Pérez y Huicochea, 2025). Por ello, resulta técnicamente viable y eficiente almacenar el calor a bajas temperaturas, donde las pérdidas y los costos de aislamiento son menores. El Transformador de Calor por Absorción (TCA) ofrece solución a esta limitación al revalorizar la temperatura del calor almacenado. El TCA, basado en un ciclo termodinámico con el par bromuro de litio-agua (LiBr/H<sub>2</sub>O), toma el calor almacenado por el SACS a 60-90 °C y lo revaloriza hasta 110-160 °C, entregándolo de forma continua para procesos industriales como pasteurización, secado, desalinización o generación de vapor sobrecalentado. Esta sinergia tecnológica permite reducir hasta en un 60 % el área de colectores solares térmicos, lo que disminuye los costos en equipos e instalaciones industriales (López-Pérez *et al.*, 2024). Simultáneamente, logra una Fracción Solar (FS) de hasta el 90 %, minimizando el uso de energías auxiliares provenientes de combustibles fósiles y, con ello, las emisiones de CO<sub>2</sub> (López-Pérez y Huicochea, 2025). La FS representa el porcentaje de la energía total cubierta con energía solar e indica en qué medida un sistema depende del sol frente a otras fuentes de energía.

Por lo anterior, la integración de un SACS con un TCA permite que las industrias utilicen energías renovables de manera eficiente y continua (Cudoket *et al.*, 2021), promoviendo la transición hacia una producción más limpia y sostenible. México es pionero en la integración SACS-TCA desde 1994, cuando comenzaron a desarrollarse estos sistemas (Rivera *et al.*, 1994).

## Funcionamiento del TCA

El funcionamiento del TCA se basa en un ciclo cerrado que utiliza un par absorbente-refrigerante, siendo el más común el par LiBr/H<sub>2</sub>O. El ciclo consta de cuatro componentes principales conectados en circuito (Figura 1).



**Figura 1.** Componentes principales de la integración SACS-TCA. El SACS captura el calor solar con colectores y lo almacena a bajas temperaturas (60 a 80°C). Posteriormente, este calor se transfiere al TCA, donde se revaloriza hasta 90 a 110°C. Esta configuración asegura un suministro continuo de calor en días nublados e incluso durante la noche.

En el desorbedor, el calor de baja temperatura (proveniente del SACS o de desecho industrial) evapora parcialmente el refrigerante (agua) de la solución de LiBr, generando vapor de agua. Este vapor se condensa en el condensador cediendo calor a una fuente externa (agua de enfriamiento), y el líquido refrigerante se bombea al evaporador. Ahí, el refrigerante se evapora nuevamente al recibir calor (también proveniente del SACS o de desecho industrial). El proceso principal ocurre en el absorbedor, donde el vapor de agua proveniente del evaporador es absorbido por la solución concentrada de LiBr que viene del desorbedor. Esta absorción es un

proceso exotérmico que libera calor a una temperatura mayor que la recibida en el desorbedor y el evaporador; ese calor es el producto útil del TCA. Finalmente, la solución diluida regresa al desorbedor, reiniciando el ciclo. El coeficiente de operación (COP) típico de un TCA es de 0.3 a 0.5, lo que significa que por cada 100 kW de calor de entrada se obtienen entre 30 y 50 kW de calor útil a alta temperatura.

## Otras tecnologías de TCA

Además del TCA convencional de una etapa con el par LiBr/H<sub>2</sub>O, existen otras configuraciones que alcanzan niveles térmicos mayores (Cudoket *al.*, 2021). El TCA de doble etapa o doble absorción permite revalorizar la temperatura hasta 180 °C, aunque con un COP menor, y se utiliza en procesos que requieren calor de alta calidad, como la generación de vapor sobrecalentado. Una innovación reciente es el TCA de tres etapas o avanzado, que integra tres procesos de absorción y dos de desorción, alcanzando simultáneamente temperaturas de hasta 140 °C para calefacción y tan bajas como 4 °C para refrigeración, todo ello accionado por una única fuente de calor de baja temperatura. En cuanto a los fluidos de trabajo, además del par LiBr/H<sub>2</sub>O, se emplean el par agua-hidróxido de litio (LiOH/H<sub>2</sub>O) para evitar la cristalización, el par amoníaco-nitrato de litio (NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub>) para aplicaciones de refrigeración por debajo de 0 °C, y las sales iónicas (como CH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub><sup>-</sup>) que eliminan el riesgo de cristalización y permiten trabajar a mayores concentraciones. Cada combinación de configuración y fluido responde a necesidades específicas:

calentamiento a media temperatura, producción simultánea de frío y calor, o recuperación de calor residual en sectores como el químico, el alimentario o el de tratamiento de aguas. La elección del TCA depende del perfil térmico de la fuente, de la temperatura útil requerida y de las limitaciones de espacio y costo.

## **Integración SACS- TCA**

La Figura 1 muestra la integración típica de un SACS con un TCA. El SACS opera a baja temperatura para minimizar las pérdidas térmicas y los costos de aislamiento. El TCA toma ese calor acumulado y lo revaloriza mediante el ciclo de absorción ya descrito, evitando así la necesidad de almacenar calor a alta temperatura. Esta sinergia genera ventajas cuantitativas demostradas teóricamente. Por un lado, se reduce el área de colectores solares hasta en un 60 % en comparación con sistemas que calientan agua directamente a 90 °C (López-Pérez *et al.*, 2024). Por otro lado, la eficiencia del aprovechamiento del calor almacenado supera el 90 % —entendida como la relación entre el calor útil entregado al proceso y el calor solar capturado— debido precisamente a las bajas pérdidas del almacenamiento a baja temperatura. Además, el sistema suministra calor de forma continua durante la noche y en días nublados, superando la intermitencia solar. En nuestro país se han desarrollado integraciones teóricas SACS-TCA con un FS de hasta el 95 % y un COP de 0.78, gracias a la optimización de los intercambiadores de calor y al control de variables críticas (López-Pérez y Huicochea, 2025).

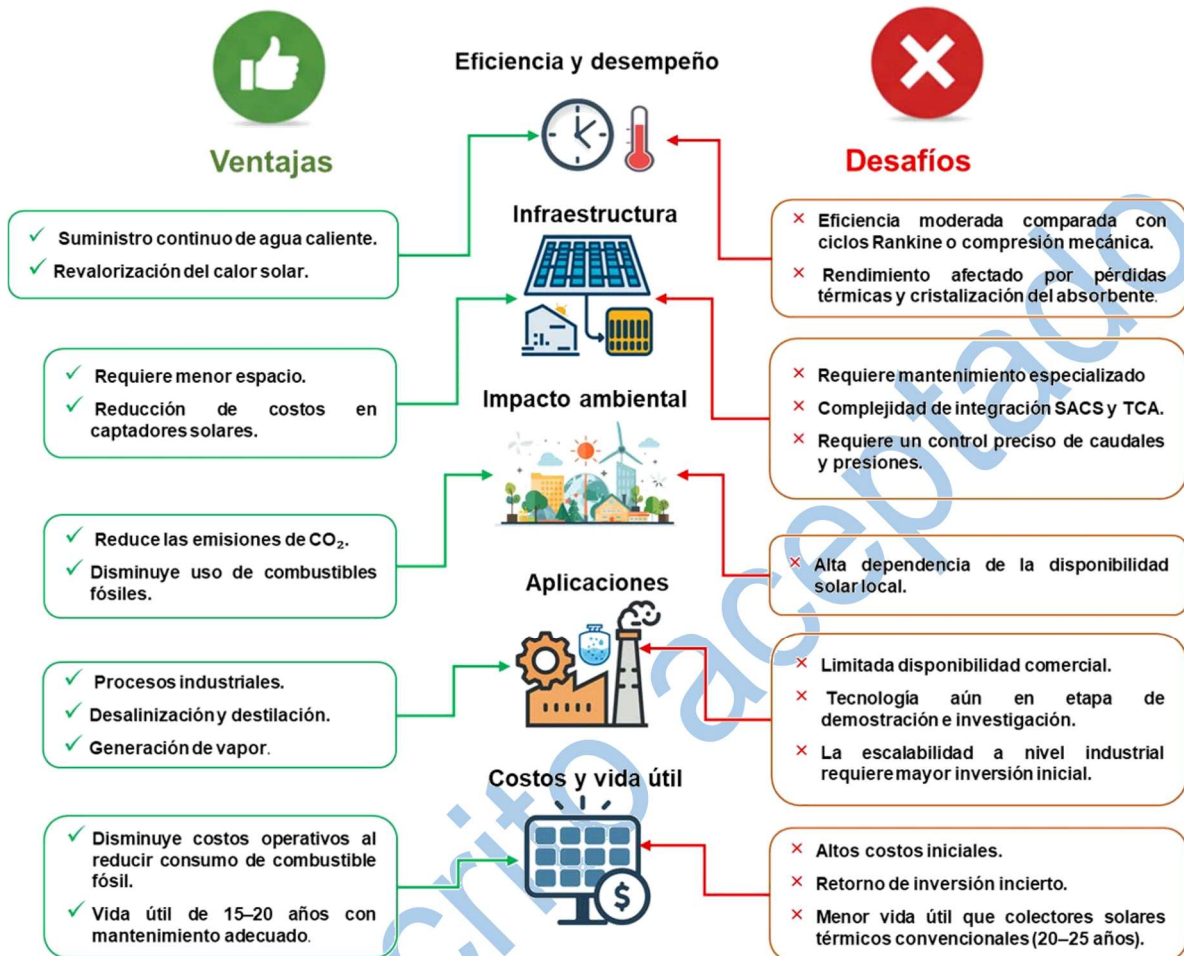


Figura 2. Ventajas y desafíos del SACS-TCA.

## Ventajas y desafíos

La Figura 2 muestra una comparativa de las ventajas y desafíos de la integración SACS-TCA. La integración SACS-TCA logra un mejor aprovechamiento de la energía solar térmica, optimiza el uso de colectores solares y logra un suministro continuo de energía térmica. Sin embargo, su implementación se ve dificultada por

los elevados costos iniciales, la necesidad de mantenimiento especializado, el riesgo de cristalización del absorbente y la limitada disponibilidad comercial. En conjunto, la integración SACS-TCA se perfila como una solución prometedora, pero requiere mayor desarrollo tecnológico y apoyo económico para lograr su consolidación a gran escala.

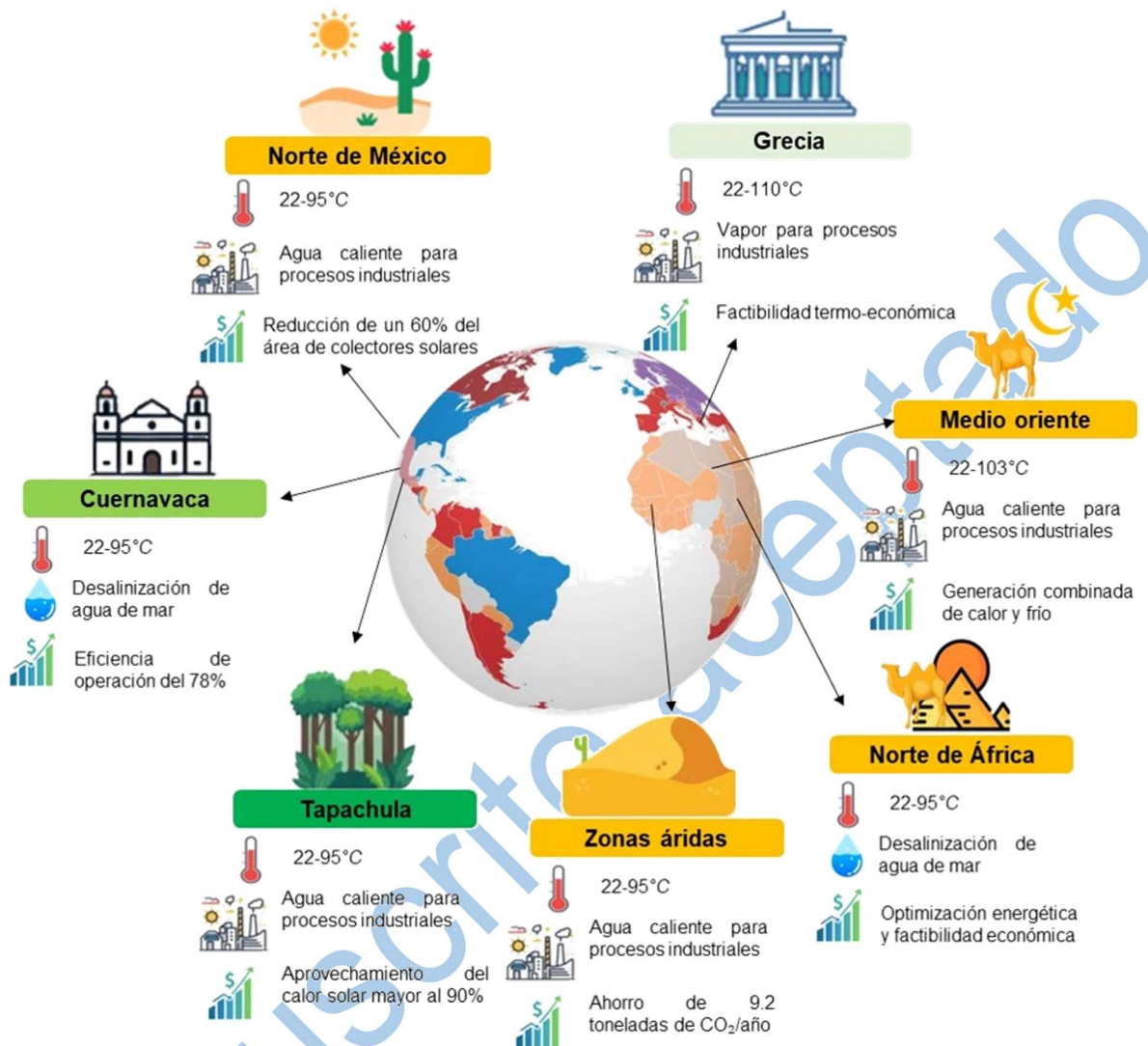
## **Otras tecnologías punteras de revalorización del calor solar**

Además del TCA, existen otras tecnologías emergentes capaces de revalorizar el calor solar o de otras fuentes (Jouhara *et al.*, 2018). Los transformadores de calor por adsorción utilizan materiales porosos, como zeolitas o gel de sílice, que al adsorber un refrigerante liberan calor a mayor temperatura. Esta tecnología opera con fuentes de calor de 60-90 °C y lo revaloriza hasta 130 °C, aunque su ciclo es discontinuo y alcanza un COP menor de 0.4. Las bombas de calor químicas se basan en reacciones reversibles sólido-gas con hidruros metálicos o sales amoniacales. Estos dispositivos pueden almacenar y revalorizar calor simultáneamente, logrando revalorizaciones térmicas mayores de 100 °C, pero aún se encuentran en fase experimental debido a la degradación de los materiales reactivos. Otra alternativa son los sistemas de compresión mecánica de vapor accionados por energía solar fotovoltaica, que toman calor a 50-70 °C y lo revalorizan hasta 120 °C, con un COP equivalente de 3 a 6 en términos de electricidad, aunque su dependencia de componentes rotatorios y refrigerantes con

potencial de calentamiento global limita su sostenibilidad. Finalmente, los sistemas termoeléctricos convierten directamente un gradiente de temperatura en electricidad, pero su eficiencia es menor del 10 % y no son competitivos para la revalorización térmica. Frente a estas opciones, el TCA destaca por su madurez tecnológica, sus escasas partes móviles y su capacidad de operación continua, lo que lo posiciona como la solución más equilibrada para aplicaciones industriales de media temperatura.

## **Panorama actual de SACS-TCA**

Alrededor del mundo, la integración SACS-TCA ha demostrado un alto potencial en aplicaciones de calentamiento de agua para procesos industriales y desalinización de agua de mar (López-Pérez *et al.*, 2024; López-Pérez y Huicochea, 2025). La Figura 3 muestra una comparativa de casos reportados de la implementación de SACS-TCA, destacando su adaptabilidad en distintos contextos climáticos y operativos. En regiones áridas y templadas, el SACS-TCA mostró un buen desempeño en el calentamiento de agua desde temperatura ambiente hasta 103 °C, con un COP de hasta 0.5 y una FS de hasta un 80 %. Estos altos desempeños permitieron una reducción de hasta 9.2 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales.



**Figura 3.** Aplicaciones y beneficios de la integración de SACS-TCA alrededor del mundo.

En México, estos sistemas aún están en etapa de investigación y desarrollo experimental, con resultados prometedores pero sin aplicaciones comerciales reportadas. En Cuernavaca, un prototipo alcanzó un COP de 0.78 y una FS del 60-90 %. Un estudio teórico en Saltillo reportó que la integración SACS-TCA logró reducir el área de colectores solares en un 60 %, manteniendo una temperatura de

salida estable de 95 °C (López-Pérez *et al.*, 2024; López-Pérez y Huicochea, 2025). Sin embargo, su implementación comercial enfrenta desafíos asociados a la optimización de costos iniciales, la estabilidad operativa y la escalabilidad tecnológica.

## Conclusiones

La integración de un Sistema de Almacenamiento de Calor Solar con un Transformador de Calor por Absorción es una tecnología prometedora para lograr un suministro de calor continuo y sostenible, incluso durante la noche. Estos sistemas capturan el calor solar y lo revalorizan a temperaturas más altas, lo que permite su aplicación en procesos industriales como la desalinización de agua de mar, el secado de cultivos, la cocción de alimentos y la generación de vapor. Sin embargo, su adopción enfrenta desafíos como la falta de inversión en investigación y desarrollo, y los altos costos iniciales. En nuestro país, esta tecnología está en fase de desarrollo y experimentación, a pesar de su alto potencial solar. México se ubica en la región conocida como el Cinturón Solar, la cual recibe una gran cantidad de radiación solar durante todo el año (CONUEE *et al.*, 2018). Sin embargo, el aprovechamiento de la energía solar en forma de calor sigue siendo limitado. En contraste, países con menor recurso solar, como China y Alemania, cubren con energía solar térmica hasta un 27 % y un 11 % de sus requerimientos anuales de agua caliente sanitaria, respectivamente (Spork-Dur, 2022). Aunque el camino para

la implementación industrial y comercial de esta tecnología es largo, el objetivo es claro: energía limpia y renovable.

## Agradecimiento

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico para la realización de este trabajo.

## Referencias

CONUEE, ANE, y GIZ. (2018). Energía Solar Térmica para Procesos Industriales en México: Estudio base de mercado [Informe técnico]. *Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía*.

Cudok F, Giannetti N, Ciganda JLC *et al.* (2021). Absorption heat transformer - state-of-the-art of industrial applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 141:110757.

International Energy Agency (2023). Renewables 2023. International Energy Agency. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Consultado el 18 de septiembre de 2025.

Jouhara H, Khordehgah N, Almahmoud S *et al.* (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress* 6:268–289.

López-Pérez LA y Huicochea A (2026). Almacenamiento del calor solar: una tecnología para el suministro energético continuo. *Elementos* 143:75-80.

López-Pérez LA and Huicochea A (2025). Solar-powered absorption heat transformer: energy performance assessment in dry climates. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 47(7):320.

López-Pérez LA, Torres-Díaz T, Pérez Grajales SG *et al.* (2024). Solar Water Heating System with Absorption Heat Transformer for Annual Continuous Water Heating. *Processes* 12(8):1650.

Rivera W, Best R, Hernández J *et al.* (1994). Thermodynamic study of advanced absorption heat transformers-II. Double absorption configurations. *Heat Recovery Systems and CHP* 14(2):185–193.

Spork-Dur W (2022). Solar heat worldwide: Global market development and trends in 2021 (2022 edition) [Informe técnico]. International Energy Agency – Solar Heating and Cooling Programme.

Recuperado de: <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>.

Manuscrito aceptado