



Tecnología Solar Térmica en el Contexto Global y Nacional

AUTORES

Ignacio Arias Olivares, Dr. en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Mecánica. Investigador, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica UC | ivarias@uc.cl

Ian Wolde Ponce, Dr. en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Mecánica. Postdoctorante, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica UC | iwolde@uc.cl

José M. Cardemil Iglesias, Dr. Eng. en Ingeniería Mecánica. Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica UC | jmcadem@uc.cl

Rodrigo Escobar Moragas, Dr. en Ingeniería Mecánica. Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica UC | rescobam@uc.cl

Tabla de Contenidos

Resumen Ejecutivo.....	4
1. Introducción y Contexto	5
2. Tecnologías Solares Térmicas y Soluciones de Almacenamiento	6
2.1. Principios Generales de Funcionamiento	7
2.2. Tecnologías de Captación Solar	7
2.2.1. Colectores de Placa Plana	7
2.2.2. Colectores de Tubo de Vacío	8
2.2.3. Tecnologías de Concentración (CSP)	9
2.2.4. Resumen de Tecnologías	11
2.3. Tecnologías de Almacenamiento Térmico (TES)	12
2.3.1. Almacenamiento Térmico Sensible	12
2.3.2. Almacenamiento con Materiales de Cambio de Fase (PCM)	13
2.3.3. Almacenamiento Termoquímico	13
2.4. Sistemas Solares Térmicos	14
2.4.1. Domiciliaria y Comercial Ligera	14
2.4.2. Calor Solar para Procesos (SHIP)	15
2.4.3. Concentración Solar de Potencia (CSP) con Almacenamiento	16
2.5. Tendencias y Avances Tecnológicos	18
2.5.1. Innovaciones Tecnológicas	18
2.5.2. Hibridación con Otras Tecnologías	19
3. Panorama Global de la Energía Solar Térmica	20
3.1. Evolución de la Capacidad Instalada de Agua Caliente Solar (SWH)	20
3.2. Estado y Dinámicas de la Termosolar de Concentración (CSP)	21
3.3. Adopción Residencial vs. Metas de Descarbonización	22
3.4. Tendencias de Costos	23
3.4.1. Definición del Costo Nivelado del Calor LCoH	23
4. Estado Actual del Mercado Solar Térmico en Chile	25
4.1. Generación Eléctrica con Concentración Solar de Potencia (CSP)	25
4.2. Sistemas Industriales para Calor de Proceso (Baja y Media Temperatura)	26
4.3. Aplicaciones Residenciales y Comerciales	27
5. Beneficios y Desafíos para Chile	28
5.1. Beneficios Estratégicos	28
5.2. Desafíos Críticos	30
5.3. Consideraciones	31
5.4. Políticas y Marcos Regulatorios	31
5.5. Recomendaciones de Financiamiento e I+D Colaborativa	34
5.5.1. Financiamiento Innovador y Esquemas Mixtos	34
5.5.2. Investigación, Desarrollo e Innovación Colaborativa	35
6. Conclusiones	37
7. Referencias	39

Índice de Figuras

Figura 1. a) Esquema de colector de placa plana (Carrión-Chamba, Murillo-Torres, and Montero-Izquierdo 2021), b) Campo solar de colectores planos (“Solar Heat for Industry” 2017).	8
Figura 2.a) Esquema de colector de tubo de vacío (Carrión-Chamba, Murillo-Torres, and Montero-Izquierdo 2021), b) Campo solar con tubos evacuados (“Solar Heat for Industry” 2017).	9
Figura 3. a) Esquema de colector parabólico (Carrión-Chamba, Murillo-Torres, and Montero-Izquierdo 2021), b) Campo solar con colectores cilindro parabólicos (“Solar Heat for Industry” 2017).	10
Figura 4. Planta de colectores PTC con sistema de almacenamiento en sales fundidas (Fuente: (Mehos et al. 2020)).	13
Figura 5. Sistema solar domiciliario con circuito primario cerrado, intercambiador y tanque estratificado.	15
Figura 6. Esquema ilustrativo de sistema SHIP con almacenamiento térmico (“Solar Heat for Industry” 2017).	16
Figura 7. Ciclo CSP de torre con almacenamiento en tanques caliente y frío (Praveen 2019).	17
Figura 8.Capacidad global de colectores solares de agua, por tipo (2014 2023).	21
Figura 9. Capacidad instalada de CSP, por país (2013 2023). (Fuente: REN21. 2024).	22
Figura 10. Despliegue acumulado de SWH en viviendas vs. objetivo IEA NZE (2000 2030). (Fuente: IEA and SHC TCP estimates; IEA Net Zero Emission by 2050 report).	22
Figura 11.Campo solar planta Cerro Dominador.	26
Figura 12.Campo solar planta minera Gaby.	27

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de tecnologías de colección solar.	11
Tabla 2.Rango de LCoH por segmento (datos ~2023)	24

Resumen Ejecutivo

El presente informe analiza el potencial, desarrollo actual y desafíos asociados a la implementación masiva de tecnologías solares térmicas en Chile, enfocándose en su contribución estratégica para alcanzar una matriz energética sostenible y diversificada. Frente a la creciente demanda térmica en sectores industriales, comerciales y residenciales, actualmente dependientes en gran medida de combustibles fósiles, la energía solar térmica emerge como una solución competitiva, sostenible y económicamente atractiva, especialmente considerando el excepcional recurso solar disponible en las regiones norte y centro del país, con niveles de irradiación solar anual superiores a los 2.500 kWh/m².

El reporte revisa en detalle las tecnologías disponibles, destacando la eficiencia y aplicabilidad de colectores solares (placa plana, tubo de vacío y sistemas de concentración solar) y soluciones avanzadas de almacenamiento térmico, incluyendo almacenamiento sensible, materiales de cambio de fase (PCM) y almacenamiento termoquímico. Asimismo, se analiza el panorama global de la energía solar térmica, enfatizando las tendencias tecnológicas emergentes, la competitividad económica mediante la reducción progresiva de costos nivelados del calor (LCoH), y la creciente adopción en diversos países como alternativa clave para descarbonizar el sector energético.

En Chile, aunque existen proyectos destacados como la planta CSP Cerro Dominador y aplicaciones específicas en la industria minera y sector residencial, el mercado nacional enfrenta desafíos relevantes que limitan una expansión más amplia y acelerada. Entre estos desafíos destacan los elevados costos iniciales (CAPEX), la necesidad de almacenamiento térmico eficiente, la competencia con tecnologías renovables alternativas, y una regulación aún insuficiente para incentivar inversiones masivas en esta tecnología.

Para abordar estos desafíos, el informe ofrece recomendaciones estratégicas concretas: impulsar innovación tecnológica mediante gemelos digitales y nanofluidos; establecer marcos regulatorios robustos que incluyan incentivos específicos; y promover esquemas de financiamiento innovadores, como bonos verdes, contratos ESCO y créditos blandos, que faciliten la inversión inicial. Además, enfatiza la importancia de fortalecer alianzas

colaborativas entre el sector académico, privado y público, promoviendo investigación, desarrollo y formación técnica especializada.

En conclusión, una acción estratégica y coordinada en estos ámbitos permitirá que Chile aproveche plenamente su excepcional potencial en energía solar térmica, posicionándose como líder regional en energías renovables y garantizando importantes beneficios ambientales, económicos y sociales en su camino hacia la sostenibilidad energética.

1. Introducción y Contexto

La actual transición energética global plantea desafíos significativos en términos de diversificación y sostenibilidad de las fuentes energéticas. En particular, la demanda térmica en sectores industriales, comerciales y residenciales representa una porción considerable del consumo energético mundial y nacional, siendo actualmente cubierta mayoritariamente mediante combustibles fósiles. En este escenario, las tecnologías solares térmicas se perfilan como soluciones altamente competitivas, capaces de proveer calor renovable y sostenible, contribuyendo directamente a los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y a la mejora de la seguridad energética.

Chile, debido a su excepcional recurso solar, especialmente en las regiones del norte y centro, presenta condiciones privilegiadas para el desarrollo y expansión significativa de la energía solar térmica. El país cuenta con niveles de irradiación solar anual que regularmente superan los 2.500 kWh/m², lo que posiciona a esta tecnología como estratégica tanto para la generación eléctrica mediante plantas solares de concentración (CSP) como para la entrega directa de calor en aplicaciones industriales y residenciales.

No obstante, y a pesar del considerable potencial disponible, el mercado nacional presenta un desarrollo aún limitado, concentrado en proyectos puntuales como la planta Cerro Dominador y diversas iniciativas en el sector minero. Esta situación se atribuye principalmente a desafíos técnicos, económicos y regulatorios que dificultan la masificación

de las tecnologías solares térmicas, tales como los elevados costos iniciales, la necesidad de almacenamiento térmico robusto y la competencia con otras tecnologías renovables emergentes.

En este contexto, el presente reporte realiza un análisis exhaustivo del panorama actual y las perspectivas futuras de la energía solar térmica en Chile. En primer lugar, se describen detalladamente las tecnologías disponibles, incluyendo colectores solares y sistemas avanzados de almacenamiento térmico. Luego, se revisa el panorama global de estas tecnologías, analizando tendencias de crecimiento, evolución tecnológica y competitividad económica. Posteriormente, se aborda el estado actual del mercado solar térmico nacional, destacando los principales proyectos y aplicaciones en distintos sectores económicos.

Finalmente, se identifican los beneficios estratégicos, los desafíos críticos y las barreras regulatorias y financieras que enfrenta Chile para consolidar esta tecnología. El documento concluye ofreciendo recomendaciones estratégicas claras que buscan facilitar la adopción masiva y sostenible de soluciones solares térmicas, subrayando la necesidad de innovación tecnológica, cooperación intersectorial y esquemas de financiamiento innovadores. De este modo, el reporte pretende entregar una visión integral y fundamentada que permita acelerar la transición energética del país hacia una matriz energética más limpia, segura y económicamente competitiva.

2. Tecnologías Solares Térmicas y Soluciones de Almacenamiento

Para entender plenamente el potencial y los desafíos del mercado solar térmico chileno, es necesario describir con claridad las tecnologías disponibles actualmente. En esta sección se abordan en detalle tanto los sistemas de captación solar, usualmente colectores y sistemas de concentración, como las principales tecnologías de almacenamiento térmico, considerando especialmente aquellas ya validadas en el contexto nacional e internacional, mencionando figuras ilustrativas contenidas en el informe original.

2.1. Principios Generales de Funcionamiento

La energía solar térmica aprovecha la radiación proveniente del sol para generar calor útil en diversas aplicaciones. El funcionamiento básico consiste en captar la energía solar a través de superficies especialmente diseñadas, llamadas colectores solares, que absorben la radiación solar y transfieren ese calor hacia un fluido que circula en su interior.

El proceso puede resumirse en tres etapas fundamentales:

- **Captación:** Los colectores solares utilizan materiales con recubrimientos especiales que maximizan la absorción de la radiación solar (más del 95%) y minimizan las pérdidas térmicas, permitiendo que la mayor cantidad posible de energía incidente se convierta en calor útil.
- **Transferencia:** Una vez absorbido el calor, este es transferido a un fluido (generalmente agua, glicol o aceite térmico) que fluye dentro del colector. La selección del fluido depende de la temperatura deseada y la aplicación específica.
- **Almacenamiento y distribución:** Finalmente, el calor captado puede ser utilizado directamente o almacenado temporalmente en tanques térmicos para asegurar disponibilidad cuando no hay radiación solar, como en las noches o días nublados.

2.2. Tecnologías de Captación Solar

2.2.1. Colectores de Placa Plana

Esta tecnología es ampliamente utilizada para aplicaciones de baja temperatura (30–90 °C), tales como calentamiento de agua sanitaria (ACS) y calefacción en edificaciones residenciales y comerciales. El colector consiste en un absorbedor metálico plano (generalmente cobre o aluminio), cubierto por un recubrimiento selectivo de alta absorción solar (>95%) y baja emisividad térmica, protegido por una o dos cubiertas de vidrio templado. Un esquema constructivo típico se puede apreciar en la Figura 1. Este diseño reduce significativamente las pérdidas térmicas por radiación y convección, con aislamiento que

suele ser de poliuretano o lana mineral. La eficiencia promedio de estos colectores alcanza valores cercanos al 70–80% bajo condiciones estándar.

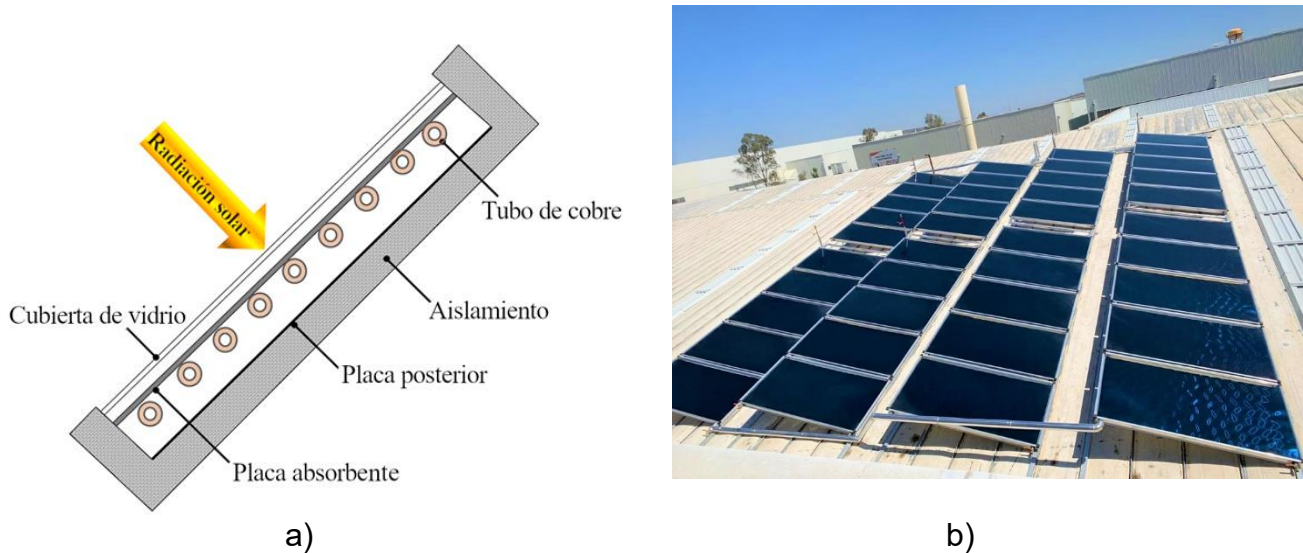


Figura 1. a) Esquema de colector de placa plana (Carrión-Chamba, Murillo-Torres, and Montero-Izquierdo 2021), b) Campo solar de colectores planos (“Solar Heat for Industry” 2017).

2.2.2. Colectores de Tubo de Vacío

Estos colectores ofrecen rendimientos superiores en aplicaciones que requieren temperaturas intermedias, típicamente entre 80–200 °C. Consisten en tubos de vidrio con vacío interno para minimizar drásticamente pérdidas por conducción y convección, como se puede ver en la Figura 2. La eficiencia operativa alcanza valores de hasta un 75% a temperaturas cercanas a los 100°C, y mantienen buenos niveles (>60%) incluso a temperaturas mayores a 150 °C. Poseen ventajas como la modularidad en la instalación y el reemplazo individualizado de tubos dañados.

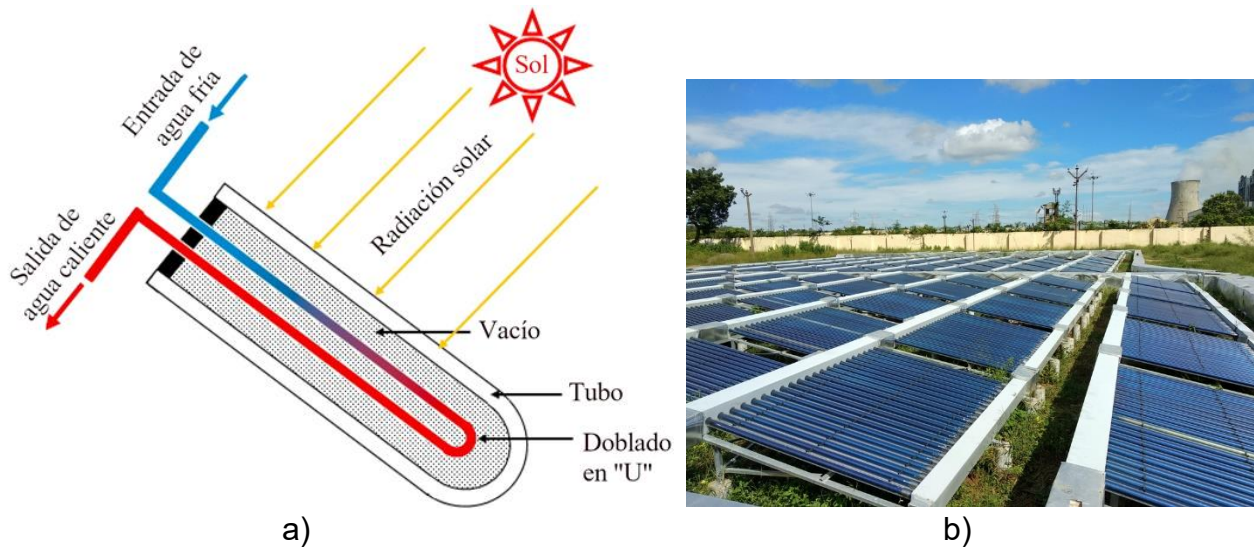
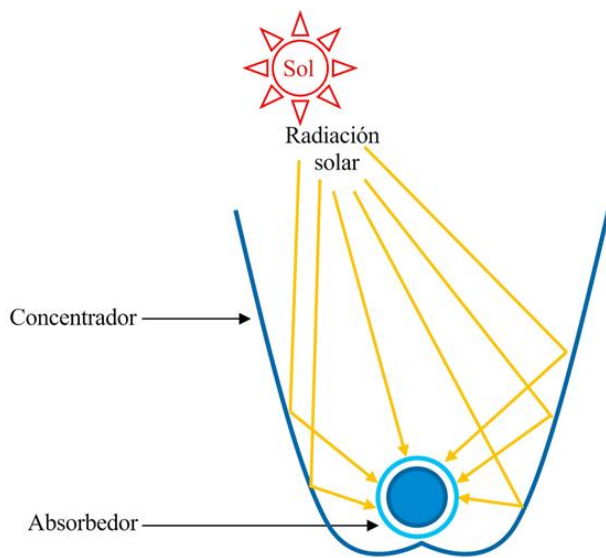


Figura 2. a) Esquema de colector de tubo de vacío (Carrión-Chamba, Murillo-Torres, and Montero-Izquierdo 2021), b) Campo solar con tubos evacuados (“Solar Heat for Industry” 2017).

2.3. Tecnologías de Concentración (CSP)

Estas tecnologías concentran la irradiación solar directa sobre zonas receptoras mediante espejos, como se puede apreciar en la Figura 3. Existen distintas configuraciones de concentración, ya sea en configuraciones lineales como los colectores Fresnel y cilindro parabólicos, con concentración puntual como en los discos parabólicos, o mediante heliostatos que concentran sobre un receptor central en lo alto de una torre. El factor de concentración típico de las configuraciones lineales es del orden de 30 a 80 veces, permitiendo alcanzar temperaturas entre 250–400 °C, ideales para su aplicación en procesos industriales. Por el otro lado, la tecnología de torre central alcanza factores de concentración mayores a 500 veces, permitiendo temperaturas superiores a 550 °C, ideales para generación eléctrica a través de ciclos de potencia.



a)



b)

Figura 3. a) Esquema de colector parabólico (Carrión-Chamba, Murillo-Torres, and Montero-Izquierdo 2021), b) Campo solar con colectores cilindro parabólicos ("Solar Heat for Industry" 2017).

2.3.1. Resumen de Tecnologías

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las tecnologías de concentración, destacando sus aplicaciones típicas, ventajas y desventajas.

Tabla 1. Resumen de tecnologías de colección solar.

Tipo de colector	Rango de temperatura	Principio de operación	Aplicaciones típicas	Ventajas	Desventajas
Placa plana	30–90 °C	Absorbedor selectivo bajo cubierta de vidrio	Agua caliente sanitaria, climatización	Económico; sencillo de fabricar	Menor eficiencia a alta temperatura
Tubo de vacío	80–200 °C	Tubo interior con vacío	ACS de alta T, procesos de baja/media T	Alta eficiencia; modularidad	Costo inicial superior; fragilidad
Cilindro – parabólico	250–400 °C	Espejos parabólicos concentrando sobre receptor tubular	Procesos industriales, precalentamiento	Temperaturas intermedias altas; altas eficiencias	Requiere seguimiento 1 eje; Costo elevado
Fresnel	150–300 °C	Series de espejos planos que simulan parábola	CSP de menor escala, industrias	Menor costo estructural; bajo perfil	Eficiencias medias
Torre de heliostatos	> 550 °C	Campo de espejos (heliostatos) dirige a receptor torre	CSP con almacenamiento en sales fundidas	Máxima temperatura; despacho semi-continuo	Mayor complejidad y costo

2.4. Tecnologías de Almacenamiento Térmico (TES)

Para gestionar la intermitencia del recurso solar, resulta imprescindible integrar sistemas robustos de almacenamiento térmico. Estos sistemas permiten capturar calor durante horas de alta radiación solar y entregarlo durante la noche o días nublados, garantizando estabilidad operativa.

2.4.1. Almacenamiento Térmico Sensible

Este método utiliza materiales cuyo calor se almacena aumentando su temperatura (sin cambios de fase). Las opciones más empleadas son:

- **Sales fundidas** (mezcla de nitratos de sodio y potasio): utilizadas en CSP, con temperaturas típicas de operación entre 250 y 550 °C y estabilidad térmica en ciclos repetidos. Se muestra un ejemplo en la Figura 4.
- **Agua caliente**: soluciones comunes y económicas para aplicaciones residenciales o comerciales de baja temperatura (<100 °C).
- **Lechos de rocas o arena**: sistemas más simples, económicos y robustos, operando con amplios rangos de temperatura, adecuados especialmente para procesos industriales. Pese a sus ventajas en simplicidad y coste, requieren grandes volúmenes y adecuada gestión de la estratificación térmica, aumentando la complejidad del diseño.



Figura 4. Planta de colectores PTC con sistema de almacenamiento en sales fundidas (Fuente: (Mehos et al. 2020)).

2.4.2. Almacenamiento con Materiales de Cambio de Fase (PCM)

Estos sistemas almacenan energía durante cambios de fase sólido-líquido, entregando calor a temperatura constante durante el proceso. Los materiales más utilizados son parafinas (40–80 °C) y sales inorgánicas (150–350 °C) y pueden entregar calor de forma estable. Sin embargo, su mayor costo, necesidad de encapsulación resistente y estabilidad a largo plazo aún representan desafíos técnicos relevantes para su masificación en Chile.

2.4.3. Almacenamiento Termoquímico

Sistemas que emplean reacciones químicas reversibles (como sales hidratadas, hidruros metálicos o reacciones ácido-base) para el almacenamiento térmico. Poseen pérdidas muy bajas en almacenamiento prolongado, ideales para almacenamiento estacional o de largo plazo. No obstante, actualmente tienen un menor grado de madurez tecnológica y enfrentan desafíos en costes, complejidad operativa y desarrollo de reactores eficientes.

2.5. Sistemas Solares Térmicos

Los sistemas solares térmicos pueden leerse como un continuo de integración que va desde aplicaciones domiciliarias de baja temperatura, pasa por soluciones industriales de calor para procesos (SHIP) y alcanza configuraciones de mayor escala y temperatura propias de la concentración solar de potencia (CSP). En todos los casos, el desempeño final no depende solo del colector: lo determinan la calidad del recurso solar, el acoplamiento hidráulico y térmico con la demanda, el tipo de fluido de trabajo, el dimensionamiento y la tecnología de almacenamiento, y la calidad de la aislación e instrumentación. El resultado de estas decisiones se expresa en indicadores como factor de planta, cobertura solar y costo nivelado del calor, que mejoran cuando la arquitectura calza con la realidad operativa del usuario y cuando el almacenamiento convierte la captación variable en un servicio térmico predecible.

2.5.1. Domiciliaria y Comercial Ligera

En viviendas y edificios pequeños, el objetivo típico es producir agua caliente sanitaria entre 30 y 80 °C con perfiles de consumo intermitentes. Predominan colectores planos o de tubos de vacío conectados en un circuito primario cerrado, habitualmente con mezcla agua-glicol para la protección frente al congelamiento y sobre temperatura, que cede calor a un tanque estratificado mediante un serpentín interno o intercambiador externo. Esta separación hidráulica preserva la calidad sanitaria del lado de consumo y permite trabajar con fluidos de captación optimizados. El almacenamiento cumple un rol central al amortiguar la variabilidad solar diaria, acercar la temperatura de entrega a la de uso y reducir la potencia pico requerida del sistema auxiliar.

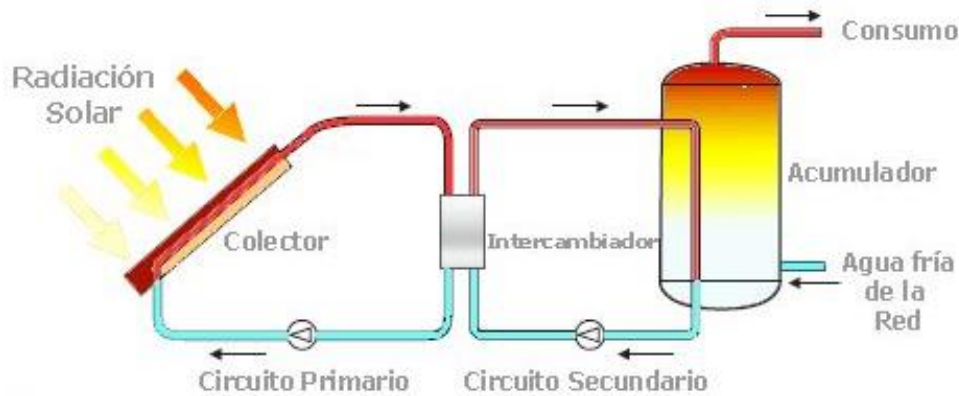


Figura 5. Sistema solar domiciliario con circuito primario cerrado, intercambiador y tanque estratificado.

El factor de planta queda fuertemente condicionado por la estacionalidad y, sobre todo, por el calce entre la disponibilidad solar y los horarios de demanda; mejora cuando existen cargas base estables (por ejemplo, ocupación constante o servicios comunes). En costos, el CAPEX se concentra en colectores, tanque e intercambiador, mientras el OPEX es bajo y está dominado por mantenimiento de bombas, aislación y recambio periódico de glicol. La operación cotidiana pone énfasis en la limpieza de superficies ópticas, el control de incrustaciones del lado de agua y la verificación de la estratificación del tanque, porque de ello dependen la temperatura útil y la cobertura solar alcanzable a lo largo del año.

2.5.2. Calor Solar para Procesos (SHIP)

En entornos industriales, el rango objetivo asciende a 60–250 °C habitualmente, y la integración pasa de “sustituir combustible” a “encajar térmicamente” en líneas de agua caliente, aceite térmico o vapor de baja presión. La arquitectura más robusta desacopla el circuito solar del circuito de proceso a través de intercambiadores dedicados y añade almacenamiento térmico sensible, como tanques de agua presurizada o lecho empacado, o, cuando conviene mantener temperaturas constantes, almacenamiento por cambio de fase. Con este esquema, el calor solar puede ir directo al proceso o puede despacharse desde el TES para estabilizar la entrega en horarios menos favorables, elevando así el factor de planta efectivo del bloque térmico.

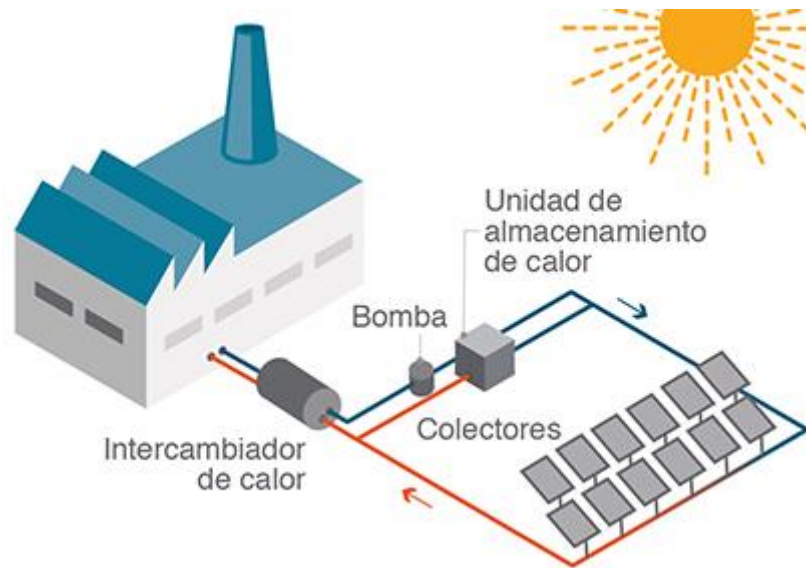


Figura 6. Esquema ilustrativo de sistema SHIP con almacenamiento térmico (“Solar Heat for Industry” 2017).

La selección de fluidos en el lado solar prioriza la estabilidad térmica y compatibilidad con los materiales; en el lado de proceso, el fluido lo determina la unidad consumidora, lo que exige seleccionar intercambiadores con aproximaciones térmicas razonables para contener caudales y pérdidas. Económicamente, el almacenamiento tiene más peso en el CAPEX, pero habilita ahorros de combustible y una operación más predecible; la viabilidad termina dependiendo tanto del dimensionamiento del TES y la calidad de la aislación como del costo del combustible fósil desplazado y del perfil real de demanda. La experiencia de operación subraya la importancia de un diseño hidráulico funcional, aislamiento térmico, y puntos de medición suficientes para mantener el balance energético.

2.5.3. Concentración Solar de Potencia (CSP) con Almacenamiento

En el extremo de mayor escala y temperatura, la CSP mediante colectores parabólicos, Fresnel o torre, introduce almacenamiento en sales fundidas con tanques caliente y frío. Esta

topología separa nítidamente la captación de la entrega, de modo que el calor puede despacharse en ventanas horarias largas o incluso nocturnas, elevando el factor de planta del bloque térmico y posibilitando contratos de suministro firmes.

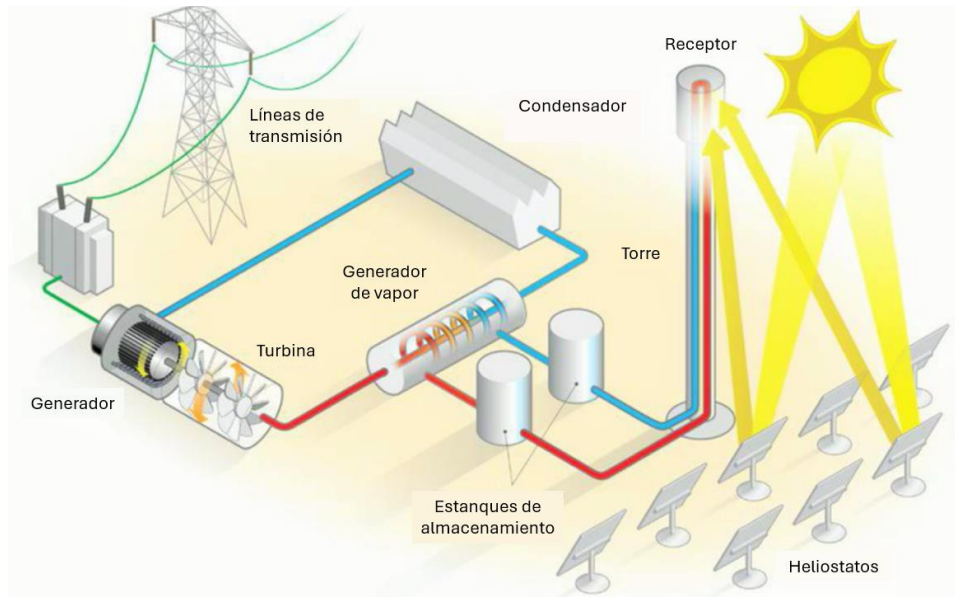


Figura 7. Ciclo CSP de torre con almacenamiento en tanques caliente y frío (Praveen 2019).

El CAPEX es alto debido a la superficie del campo solar, estructuras, receptor, intercambiadores y el propio almacenamiento. Para lograr un buen desempeño, la óptica del campo y la reducción de pérdidas térmicas son determinantes; cuando el sitio cuenta con buena irradiancia y el despacho se ajusta a las necesidades del usuario, la combinación de captación y TES permite una oferta térmica con alta disponibilidad y costos competitivos frente a las alternativas fósiles en escenarios de precio volátil. Las implicancias prácticas incluyen requerimientos de suelo, accesos y gestión del punto de fusión de las sales.

2.6. Tendencias y Avances Tecnológicos

Chile presenta un panorama prometedor para la adopción intensiva de estas tecnologías solares térmicas y de almacenamiento. La elección adecuada del sistema dependerá siempre del perfil térmico requerido, condiciones locales de radiación solar y viabilidad financiera del proyecto específico. La continua investigación y validación de nuevas soluciones tecnológicas serán factores clave para consolidar la posición del país como líder regional en energía solar térmica, facilitando su integración efectiva y sostenible dentro de la matriz energética nacional.

2.6.1. Innovaciones Tecnológicas

La competitividad de la energía solar térmica depende en gran medida de la incorporación de tecnologías de vanguardia que mejoren la eficiencia, reduciendo costos y ampliando su aplicabilidad. A continuación, se describen tres avances clave:

Gemelos digitales y control predictivo

Los gemelos digitales o *digital twins* replican en tiempo real el comportamiento de plantas CSP y sistemas de baja/media temperatura, integrando flujos de datos meteorológicos, operativos y de mantenimiento. Estas réplicas virtuales permiten simular escenarios. Por ejemplo, cambios en el ángulo de incidencia, variaciones de la irradiación solar directa (DNI) o perfiles de demanda térmica. Con esto, se pueden ajustar dinámicamente los parámetros de operación y anticipar fallas antes de que ocurran.

Ejemplos en eficiencia energética muestran que la adopción de *digital twins* puede generar ahorros de hasta un 30% en consumo energético y reducir los costos de mantenimiento no planificado en un 20% gracias a la detección temprana de anomalías y a la optimización de los intervalos de revisión (Ba et al. 2025).

Recubrimientos selectivos y nanofluidos

Para maximizar la absorción solar y minimizar pérdidas radiativas, los colectores incorporan **recubrimientos selectivos** con alta absorbanza en el espectro solar y baja emisividad

térmica. Los desarrollos más recientes utilizan multicapas de óxidos metálicos y nanocompuestos que mantienen su rendimiento incluso tras 10 años de operación sin degradación significativa (Noč and Jerman 2022).

Por otro lado, la adición de **nanofluidos** mejora la conductividad térmica y el coeficiente de transferencia convectiva hasta en un 20%. Esta tecnología está basada en la dispersión estable de nanopartículas de Al_2O_3 , CuO o grafeno en agua, glicol o aceites, lo que posibilita diseños de intercambiadores más compactos o la reducción del área de colectores sin sacrificar rendimiento (Kasaeian, Eshghi, and Sameti 2015).

Automatización avanzada y machine learning

La incorporación de algoritmos de *machine learning* para el **pronóstico de irradiación solar directa** y la **optimización en línea** de sistemas de seguimiento (SCADA + ML) refuerza la operación de plantas CSP y sistemas térmicos industriales. Revisiones de métodos basados en redes neuronales, bosques aleatorios y máquinas de vectores de soporte reportan errores normalizados (nRMSE) en predicción de irradiancia diaria por debajo del 15% en horizontes de 24 h, mejorando la gestión de almacenamiento y reduciendo pérdidas por subutilización de hasta un 5% en la producción anual de calor utilizable (Voyant et al. 2017).

2.6.2. Hibridación con Otras Tecnologías

La hibridación de la solar térmica con otras fuentes y equipos de aprovechamiento de calor amplía su utilidad y mejora la firmeza del suministro. Se destacan dos esquemas prioritarios:

Colectores PVT

Los paneles PVT generan de manera concurrente electricidad y calor, recuperando la energía térmica que de otro modo elevaría la temperatura de las celdas y degradaría su eficiencia. El calor extraído del módulo actúa como fuente de baja temperatura (30 – 60 °C) en sistemas de distribución de agua caliente. Los estudios muestran que los PVT pueden elevar la producción eléctrica en un 3–8% al enfriar las celdas, al tiempo que generan calor útil con eficiencias térmicas del 50–60% bajo condiciones de radiación moderada. Estos sistemas son especialmente adecuados para edificios con alta demanda simultánea de calor

y electricidad, mejorando el uso del espacio disponible en cubiertas y fachadas (Vallati et al. 2024).

Bombas de calor

Al acoplar bombas de calor aerotérmicas con colectores solares térmicos, se eleva el *coeficiente de rendimiento* (COP) al ofrecer una fuente de entrada precalentada al evaporador. Estudios han reportado COPs de 4,5–5,5 en configuraciones asistidas por calor solar, en contraste con COPs de 3,0–3,5 en ciclos alimentados exclusivamente con aire ambiente. Esto reduce el consumo eléctrico de la bomba hasta en un 30%, resultando en sistemas de climatización y ACS más eficientes y confiables, sobre todo en climas templados donde la irradiación solar acompaña las necesidades térmicas (Ganesan and Eikevik 2024).

3. Panorama Global de la Energía Solar Térmica

3.1. Evolución de la Capacidad Instalada de Agua Caliente Solar (SWH)

La capacidad global de colectores solares de agua (tanto vidriados como no vidriados) ha mostrado un crecimiento sostenido en la última década (Figura 8):

- En 2014 la capacidad total era de **409 GW_t**, en 2023 alcanzó **560 GW_t**, un alza del 37% en nueve años.
- Más del 90% de esta capacidad corresponde a **colectores vidriados**, que pasan de ~380 GW_t en 2014 a ~520 GW_t en 2023, mientras que los no vidriados se mantienen estables en ~40 GW_t.

- El ritmo de crecimiento anual ha oscilado entre 2% y 5%, con un ligero repunte entre 2020 y 2023 a pesar de los desafíos logísticos globales.

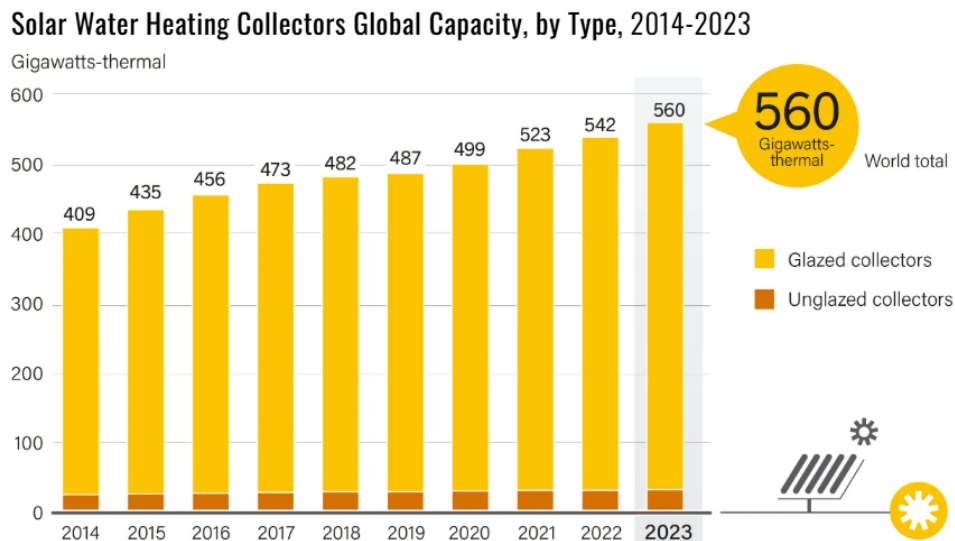


Figura 8. Capacidad global de colectores solares de agua, por tipo (2014-2023).

3.2. Estado y Dinámicas de la Termosolar de Concentración (CSP)

Aunque la CSP representa una fracción menor del mercado térmico solar, su papel en redes eléctricas con almacenamiento es creciente (Figura 9):

- La capacidad total de CSP ha pasado de **3,4 GWe** en 2013 a **6,7 GWe** en 2023.
- **España** mantiene una base estable de ~2,2 GWe; **Estados Unidos** se sitúa en ~1,2 GWe; mientras que el **Resto del Mundo** ha aumentado desde apenas 0,1 GWe en 2013 hasta ~3,3 GWe en 2023.
- El crecimiento post-2017 refleja nuevas plantas en Oriente Medio y Norte de África, donde la CSP con almacenamiento de sales fundidas mejora la flexibilidad de la red.

Concentrated Solar Thermal Power (CSP) Installed Capacity, by Country, 2013-2023

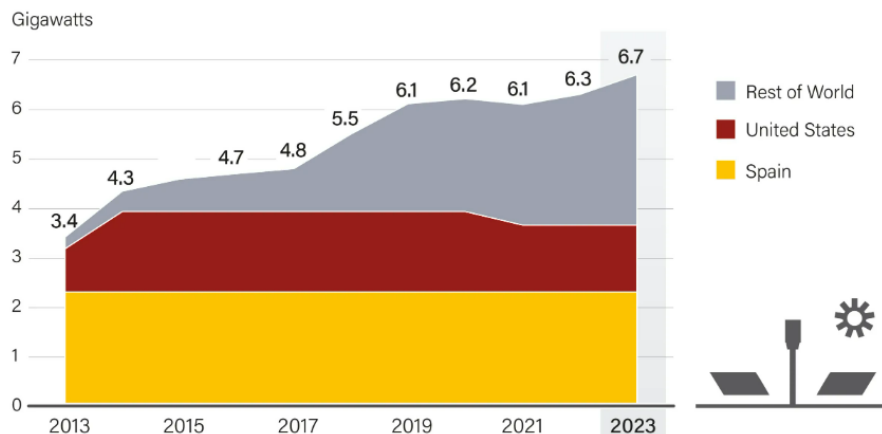


Figura 9. Capacidad instalada de CSP, por país (2013-2023). (Fuente: REN21, 2024).

3.3. Adopción Residencial vs. Metas de Descarbonización

La penetración de SWH en viviendas es clave para el ahorro de energía fósil. La Figura 10 compara el despliegue histórico (2000-2022), la proyección según tendencias actuales y el objetivo IEA “Net Zero Emissions by 2050” (400 M hogares en 2030):

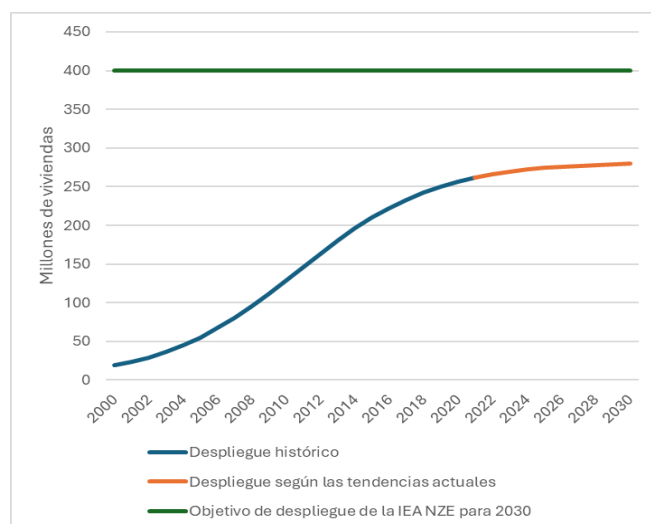


Figura 10. Despliegue acumulado de SWH en viviendas vs. objetivo IEA NZE (2000-2030). (Fuente: IEA and SHC TCP estimates; IEA Net Zero Emission by 2050 report).

- En el año 2000 había ~20 millones de viviendas con SWH; en 2022 se alcanzaron 260 M.
- Si las tendencias actuales continúan, en 2030 se llegará a ~280 M, quedando 120 M hogares por debajo de la meta de 400 M.
- Esta brecha subraya la necesidad de políticas activas: incentivos fiscales, normativas de construcción verde y programas de financiamiento dedicados.

3.4. Tendencias de Costos

3.4.1. Definición del Costo Nivelado del Calor LCoH

El **Costo Nivelado del Calor (LCoH)** es el indicador que mide el coste medio por unidad de calor útil entregada por un sistema solar térmico a lo largo de su vida útil. Se calcula análogamente al LCoE eléctrico, considerando inversión inicial (CAPEX), operación y mantenimiento (OPEX), incentivos, tasa de descuento y energía producida año a año:

$$LCoH = \frac{I_0 - S_0 + \sum_{t=1}^T C_t}{\sum_{t=1}^T E_t}$$

donde:

- I_0 : inversión inicial
- S_0 : subvenciones e incentivos
- C_t : costes de O&M en el año t
- E_t : energía térmica entregada en el año t kWh_{th}
- T: horizonte de análisis (años)

Fuente: IEA SHC Task 54. 2015–2018. “Price Reduction of Solar Thermal Systems.”

La Tabla 2 muestra los costos nivelados típicos de las tecnologías de suministro de calor solar (Fuente: IEA. 2021. “Levelized cost of heating (LCOH) for consumers, for selected space and water heating technologies and countries.” IEA, Paris).

Tabla 2. Rango de LCoH por segmento (datos ~2023)

Segmento	LCoH típico
Residencial (SWC)	0,05 - 0,12 USD/kWh _t
Procesos industriales (SHIP)	0,04 – 0,09 USD/kWh _t

Los sistemas solares de agua caliente presentan un LCoH bajo, con lo que compiten directamente con el gas natural (0,04 – 0,07 USD/kWh_t). Esta paridad de costes hace que, en muchos lugares, la instalación de colectores represente una alternativa económicamente viable, reduciendo la dependencia de fuentes fósiles sin penalizar el gasto energético.

En el sector industrial, el rango de LCoH permite cubrir entre el 20% y el 30% de la demanda térmica de baja y media temperatura (hasta 200 °C) con solar térmica. Esto se traduce en ahorros significativos de combustible y en una disminución proporcional de emisiones de CO₂, especialmente en industrias de alimentación, textil y química que trabajan con calores moderados.

Para seguir bajando el LCoH y acelerar la adopción se pueden impulsar:

- **Estandarización de diseños y componentes**, facilitando la fabricación en serie.
- **Desarrollo de cadenas de suministro locales**, reduciendo costes de transporte e impuestos.
- **Programas de financiación específicos al CAPEX**, como créditos blandos o leasing de colectores, que alivien la carga de la inversión inicial.

Con estos elementos integrados, la sección muestra no solo los valores actuales de coste, sino también cómo la solar térmica puede competir con tecnologías convencionales, su efecto en la industria y las estrategias clave para su continuo abaratamiento.

4. Estado Actual del Mercado Solar Térmico en Chile

4.1. Generación Eléctrica con Concentración Solar de Potencia (CSP)

Actualmente, el mercado chileno cuenta con un único proyecto CSP en operación comercial, el cual es considerado un referente no solo a nivel nacional sino también latinoamericano.

Planta Cerro Dominador (María Elena, Región de Antofagasta):

Esta central híbrida, inaugurada en junio de 2021, posee una capacidad instalada combinada de 210 MW, divididos en una planta termosolar de concentración en torre con 110 MW térmicos (equivalentes a 100 MW eléctricos), complementada con 100 MW fotovoltaicos. Destaca especialmente por su sistema de almacenamiento térmico en sales fundidas con capacidad de 17,5 horas (1.925 MWh_e), lo que garantiza generación continua incluso en ausencia de radiación solar directa. La planta ocupa una superficie de aproximadamente 700 hectáreas, cuenta con más de 10.600 helióstatos y genera cerca de 950 GWh anuales, evitando la emisión de más de 600.000 toneladas de CO₂ cada año. Su éxito ha validado técnica y financieramente la tecnología CSP en Chile, aunque a la fecha no se han materializado nuevos proyectos comerciales de gran escala debido principalmente a las barreras económicas y regulatorias existentes.



Figura 11. Campo solar planta Cerro Dominador.

4.2. Sistemas Industriales para Calor de Proceso (Baja y Media Temperatura)

Este segmento del mercado ha mostrado un crecimiento acelerado, impulsado principalmente por proyectos en la industria minera, sector que presenta condiciones altamente favorables debido a su elevada demanda térmica y la necesidad de reducir emisiones y costos operativos.

Planta Solar Pampa Elvira – Minera Gabriela Mistral (Codelco):

Este proyecto emblemático entró en operación en 2013, utilizando tecnología de colectores planos para entregar alrededor del 85% del calor requerido en los procesos de electro-obtención de cobre (SX-EW). Con una potencia instalada de 34 MW_t y cerca de 44.000 m² de colectores solares, genera aproximadamente 55.000 MWh_t anuales, desplazando más del 60% del consumo de diésel en dicho proceso, lo que representa una reducción significativa de emisiones y costos operativos.



Figura 12. Campo solar planta minera Gaby.

4.3. Aplicaciones Residenciales y Comerciales

El mercado residencial y comercial de sistemas solares térmicos para agua caliente sanitaria (ACS) y climatización ligera ha experimentado un desarrollo considerable, impulsado principalmente por instrumentos de financiamiento público y subsidios gubernamentales.

Viviendas con sistemas solares térmicos:

Chile cuenta actualmente con más de 100.000 sistemas solares térmicos instalados en viviendas, resultado principalmente de programas del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y del Ministerio de Energía, con retornos de inversión en torno a los 3–7 años. Estos programas han permitido que numerosas familias chilenas reduzcan su dependencia del gas licuado (GLP), disminuyendo costos de energía domésticos y generando beneficios ambientales considerables.

Autoconsumo térmico empresarial:

En paralelo, el programa “Ponle Energía a tu Empresa” ha financiado desde 2021 numerosos proyectos solares térmicos para pymes y grandes empresas, incluyendo soluciones híbridas

(colectores solares más bombas de calor aerotérmicas). Este tipo de iniciativas ha contribuido al desarrollo inicial del mercado solar térmico comercial, generando capacidad instalada y validando modelos financieros que podrían replicarse en mayor escala en el futuro cercano. Fuente: Ministerio de Energía. “Ponle Energía a tu Empresa”.

5. Beneficios y Desafíos para Chile

La energía solar térmica emerge en Chile como una alternativa estratégica para abordar la necesidad crítica de descarbonizar el sector energético, especialmente en procesos industriales y en la generación térmica residencial y comercial. A continuación, se analizan en detalle los múltiples beneficios y los desafíos más significativos que enfrenta esta tecnología para alcanzar una implementación exitosa y sostenible a gran escala.

5.1. Beneficios Estratégicos

Reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

La energía solar térmica presenta ventajas notables en la reducción de emisiones respecto a fuentes convencionales. En aplicaciones industriales chilenas, como el proyecto de Pampa Elvira de Codelco, se han logrado disminuciones superiores al 60% en el consumo anual de diésel, lo que representa una reducción proporcional de emisiones de CO₂ y otros contaminantes. A nivel global, estudios demuestran que las plantas solares térmicas pueden reducir las emisiones por unidad energética generada hasta en un 90% frente al gas natural o el diésel. Esto convierte a esta tecnología en una herramienta clave para cumplir los compromisos nacionales en términos del Acuerdo de París y los objetivos locales definidos en la Política Energética Nacional (PEN) 2050.

Costos operativos competitivos y predecibles

Una vez que los sistemas solares térmicos han sido instalados, presentan costos operativos muy bajos, principalmente asociados al mantenimiento rutinario. Estudios recientes en la minería chilena han demostrado que, en comparación con combustibles fósiles, el calor generado por sistemas solares térmicos puede llegar a reducir los costos operacionales hasta en un 40%, ofreciendo estabilidad y previsibilidad financiera a largo plazo. Esto es especialmente valioso en industrias intensivas en energía, como la minería, manufactura de alimentos o industria química, sectores donde Chile tiene una fuerte participación económica.

Rápido retorno de la inversión (Payback)

Dependiendo del precio local de los combustibles y del nivel de irradiación solar disponible, los sistemas solares térmicos en Chile muestran periodos de recuperación relativamente breves, típicamente entre 3 y 7 años para aplicaciones industriales y comerciales, y entre 4 y 8 años para sistemas residenciales subsidiados. En escenarios con alto precio de combustibles fósiles, especialmente en regiones aisladas o mineras, este retorno puede ser incluso menor, aumentando significativamente el atractivo económico y facilitando la decisión de inversión.

Fortalecimiento de la seguridad energética nacional

Al sustituir combustibles fósiles importados por energía generada localmente, la energía solar térmica contribuye directamente a mejorar la independencia energética del país. Esto es especialmente relevante para Chile, que actualmente depende fuertemente de importaciones energéticas, exponiéndose a fluctuaciones en precios internacionales y riesgos logísticos asociados a combustibles líquidos como el diésel o GLP.

Desarrollo local y generación de empleo calificado

La implementación masiva de sistemas solares térmicos genera una importante demanda laboral local, creando empleos técnicos especializados en diseño, fabricación, instalación, operación y mantenimiento. El desarrollo de estos nuevos mercados laborales fomenta además la creación de nuevas empresas y cadenas de suministro locales, incrementando el

valor agregado nacional y fortaleciendo el tejido productivo interno en regiones con alto potencial solar.

5.2. Desafíos Críticos

Alto costo inicial de inversión (CAPEX)

Uno de los principales obstáculos es el elevado costo inicial, especialmente para tecnologías como CSP o grandes sistemas industriales. Por ejemplo, una planta de concentración solar puede requerir inversiones superiores a los 2.000 USD/kWt instalado, lo que genera barreras significativas de acceso financiero. Esto hace indispensable el desarrollo de instrumentos financieros específicos, como créditos blandos, subsidios parciales o modelos ESCO, para facilitar la decisión de inversión.

Dependencia del recurso solar y variabilidad climática

Si bien Chile posee excelentes condiciones solares en el Norte Grande y Centro-Norte, la generación térmica solar sigue siendo altamente sensible a variaciones en la irradiación solar directa (DNI). Esto implica que, en zonas con menos recurso o variabilidad climática marcada, la rentabilidad económica puede verse afectada, requiriendo sistemas de respaldo o almacenamiento térmico adicional que encarecen el proyecto.

Necesidad de almacenamiento térmico avanzado

La energía solar térmica generalmente requiere sistemas robustos de almacenamiento térmico para garantizar la continuidad del suministro. Tecnologías como sales fundidas, materiales de cambio de fase (PCM) o almacenamiento termoquímico son aún costosas y técnicamente complejas. Su desarrollo y adopción masiva en Chile demandan esfuerzos adicionales en I+D aplicada, validación en terreno y capacitación técnica especializada.

Competencia con tecnologías alternativas renovables

El avance acelerado y la reducción de costos de otras tecnologías renovables, especialmente fotovoltaica combinada con bombas de calor, generan una fuerte competencia en aplicaciones térmicas a baja temperatura. Esta situación obliga a la

tecnología solar térmica a mejorar continuamente su eficiencia técnica, viabilidad económica y flexibilidad operativa, potenciando la innovación tecnológica y buscando nichos específicos en aplicaciones industriales o comerciales donde tenga ventajas competitivas claras.

Marcos regulatorios incompletos y falta de incentivos específicos

La ausencia actual de un marco regulatorio específico claro para la solar térmica limita su penetración y genera incertidumbre a inversionistas, empresas tecnológicas y usuarios finales. Esta situación podría resolverse mediante normativas técnicas específicas, esquemas claros de certificación de calidad y desempeño, así como incentivos específicos que reconozcan explícitamente los beneficios ambientales y económicos de esta tecnología.

5.3. Consideraciones

La energía solar térmica ofrece importantes ventajas estratégicas para Chile, especialmente en reducción de emisiones, seguridad energética y beneficios económicos locales. No obstante, superar sus desafíos más importantes requerirá acciones coordinadas y decisivas en materia de política energética, instrumentos financieros innovadores, I+D aplicada continua y formación especializada de capital humano.

En definitiva, si Chile logra gestionar adecuadamente estos beneficios y desafíos, podría posicionarse como un país líder en el desarrollo de energía solar térmica a nivel regional y global, contribuyendo significativamente a la transición energética, al desarrollo sustentable y al cumplimiento de sus metas climáticas internacionales.

5.4. Políticas y Marcos Regulatorios

El desarrollo sostenido y acelerado de la energía solar térmica en Chile requiere de un entorno normativo robusto, coherente y con visión estratégica de largo plazo. La implementación exitosa de esta tecnología, tanto a nivel residencial e industrial como en

aplicaciones a gran escala, depende en gran medida de políticas públicas claras, incentivos específicos y marcos regulatorios bien definidos.

Política Energética Nacional y Estrategia de Calor y Frío

La Política Energética Nacional (PEN) 2050 constituye el marco general sobre el cual Chile ha estructurado sus metas de transición energética. Esta estrategia establece objetivos explícitos que promueven el uso de energías renovables térmicas, proponiendo alcanzar un 50% de combustibles bajos en emisiones para 2035, y elevando esta meta al 65% hacia 2050. Dentro de este contexto, la solar térmica se posiciona como una alternativa central para el logro de estas metas, especialmente en regiones del norte y centro del país, donde el potencial solar es particularmente elevado.

Complementariamente, la reciente Estrategia Nacional de Calor y Frío (2021) señala explícitamente la necesidad de fomentar el uso de energías renovables térmicas, indicando como objetivo que al menos el 80% de la demanda térmica nacional provenga de fuentes renovables o sostenibles hacia el año 2050. Este documento constituye un avance significativo al incluir la solar térmica como una prioridad estratégica, impulsando la generación de calor industrial y residencial mediante tecnologías renovables. Para alcanzar estos objetivos, la estrategia identifica claramente la necesidad de desarrollar normativas específicas y mecanismos de financiamiento que reduzcan el riesgo percibido por inversionistas.

Instrumentos de Financiamiento Público y Subsidios Específicos

Chile cuenta ya con programas exitosos como el Fondo de Acceso a la Energía (FAE), dirigido principalmente a zonas rurales y comunidades vulnerables, que financia hasta el 70% del costo inicial en sistemas solares térmicos para agua caliente sanitaria y climatización básica. Extender y fortalecer estos instrumentos con mayor presupuesto y mayor cobertura geográfica sería fundamental para acelerar la penetración de la tecnología solar térmica en hogares y pequeñas empresas.

Asimismo, el establecimiento de programas financieros específicos como el crédito para Autoconsumo Energético gestionado por instituciones como BancoEstado permite financiar proyectos solares térmicos mediante créditos preferenciales de largo plazo. Ampliar estas líneas de crédito, agregando la posibilidad de modelos ESCO (Energy Service Companies),

generaría condiciones especialmente atractivas para la adopción empresarial e industrial. Bajo estos modelos, las empresas proveedoras asumirían la inversión inicial y garantizarían el rendimiento y los ahorros generados, cobrando a partir del ahorro efectivo obtenido por los usuarios finales.

Normativas Técnicas y Certificación de Calidad

La consolidación del mercado solar térmico requiere también avanzar en la definición de estándares técnicos y esquemas de certificación obligatoria para sistemas y equipos, incluyendo colectores solares, tanques de almacenamiento térmico y sistemas híbridos. Una certificación nacional alineada con estándares internacionales (por ejemplo, Solar Keymark europeo o SRCC estadounidense) ayudaría a generar confianza y claridad técnica entre consumidores, instaladores y empresas, asegurando calidad, rendimiento y durabilidad.

Contratos de Compra de Calor (HaaS)

Un desafío central para los sistemas solares térmicos industriales es la percepción del riesgo financiero inicial por parte de inversionistas y usuarios finales. Para enfrentar esto, Chile podría avanzar hacia un mercado regulado de contratos de compra de calor o Heat-as-a-Service (HaaS), similares a los exitosos contratos PPA (Power Purchase Agreements) existentes en el sector eléctrico renovable. Estos contratos garantizarían estabilidad de ingresos para desarrolladores e inversionistas, y permitirían a las industrias beneficiarse directamente de ahorros en combustible sin asumir grandes riesgos financieros iniciales.

Fortalecimiento Institucional y Coordinación Intersectorial

Finalmente, la creación o fortalecimiento de una agencia o entidad específica que centralice la promoción, financiamiento, regulación y seguimiento del mercado solar térmico podría acelerar considerablemente la penetración de esta tecnología en Chile. Ejemplos internacionales exitosos, como la agencia alemana DENA (Deutsche Energie-Agentur), demuestran cómo un organismo especializado puede integrar esfuerzos públicos y privados, optimizando la implementación de políticas y maximizando los beneficios económicos, sociales y ambientales de la tecnología.

En definitiva, el éxito de la energía solar térmica en Chile no dependerá exclusivamente del potencial tecnológico o climático, sino principalmente de un marco regulatorio coherente,

políticas públicas claras e instrumentos financieros robustos y estables. La adopción rápida y coordinada de estos elementos habilitantes podría posicionar a Chile como líder regional e incluso global en el despliegue de soluciones solares térmicas, generando beneficios significativos en términos de desarrollo económico, descarbonización y seguridad energética nacional.

5.5. Recomendaciones de Financiamiento e I+D Colaborativa

El futuro desarrollo y posicionamiento estratégico de la energía solar térmica en Chile requiere de esquemas de financiamiento innovadores y una fuerte colaboración entre el sector académico, la industria privada y el sector público. En este contexto, es fundamental delinear claramente las recomendaciones que permitirán superar barreras financieras, tecnológicas y operacionales.

5.5.1. Financiamiento Innovador y Esquemas Mixtos

Modelos ESCO y Contratos de Desempeño Energético

Una de las principales barreras para la adopción masiva de tecnologías solares térmicas es el alto costo inicial de instalación (CAPEX). Para abordar esta limitación, Chile debe promover activamente modelos de negocios basados en Empresas de Servicios Energéticos (ESCO). Bajo este esquema, empresas especializadas financian, diseñan, instalan y operan los sistemas solares térmicos, recuperando la inversión a través del ahorro real de energía conseguido. Así, el usuario final se libera de la carga financiera inicial, pagando únicamente por resultados concretos de eficiencia energética y reducción de costos operacionales. Este modelo puede ser especialmente atractivo para industrias mineras y manufactureras, así como para complejos turísticos y comerciales, donde los ahorros operacionales son sustantivos y fácilmente medibles.

Bonos Verdes y Financiamiento Privado Institucional

Otro mecanismo clave para potenciar la energía solar térmica son los bonos verdes o bonos temáticos. La emisión de estos instrumentos de deuda, dirigidos específicamente al financiamiento de proyectos térmicos renovables, ofrece acceso a capital privado institucional y atrae inversionistas interesados en iniciativas sostenibles (ESG – Environmental, Social, Governance). CORFO y entidades financieras como BancoEstado podrían liderar emisiones específicas de bonos verdes para solar térmica industrial o CSP, proporcionando una fuente estable y predecible de financiamiento a mediano y largo plazo, tal como sucedió en el exitoso financiamiento de Cerro Dominador mediante instrumentos combinados de deuda y capital mixto.

Créditos Blandos y Subsidios Parciales del Estado

Chile podría profundizar en la expansión de líneas específicas de crédito con condiciones preferentes y subsidios parciales para proyectos solares térmicos residenciales, comerciales y especialmente industriales, administrados por entidades como Corfo o BancoEstado. Estos esquemas podrían incluir tasas preferenciales, períodos de gracia iniciales y plazos prolongados de amortización que hagan viable la inversión inicial. Además, estos programas podrían focalizarse en zonas específicas con altos índices de radiación solar directa, para optimizar recursos públicos y acelerar la penetración tecnológica donde más valor pueda generar.

5.5.2. Investigación, Desarrollo e Innovación Colaborativa

Fortalecimiento de Centros Tecnológicos Nacionales

La consolidación de centros de excelencia tecnológica representa una prioridad estratégica. Estos centros tienen un rol clave en la generación y transferencia de conocimiento aplicado, abordando desafíos críticos en eficiencia térmica, almacenamiento avanzado y desarrollo de nuevos materiales y el uso de tecnologías avanzadas.

Es esencial que estos centros reciban financiamiento sostenido del Estado y establezcan alianzas permanentes con empresas privadas interesadas en validar tecnologías emergentes. Esto permitirá reducir los tiempos de desarrollo, mitigar riesgos técnicos en

proyectos piloto y facilitar la transferencia rápida de innovaciones desde el laboratorio hasta implementaciones industriales concretas.

Programas de Cooperación Industria-Academia

La implementación de programas específicos que fomenten la cooperación permanente entre universidades, centros tecnológicos y empresas es una acción prioritaria. En esta línea, el Estado podría establecer fondos concursables especiales orientados a consorcios que vinculen universidades, empresas tecnológicas e industrias usuarias finales (minería, manufactura, etc.). Estos fondos deberían financiar investigación aplicada, prototipos industriales y proyectos piloto de escala real, facilitando así la adopción tecnológica y la reducción de incertidumbres en la etapa inicial.

Observatorios Nacionales y Plataformas de Transferencia Tecnológica

La creación de plataformas digitales abiertas de transferencia tecnológica y observatorios nacionales sería una herramienta clave para acelerar el desarrollo del sector solar térmico en Chile. Estas plataformas podrían almacenar y compartir datos operacionales anonimizados de plantas solares térmicas existentes, información técnica detallada sobre proyectos, resultados de pruebas de nuevos materiales o tecnologías, y casos exitosos de modelos de negocio implementados. Un observatorio así facilitaría el acceso de pequeñas y medianas empresas a conocimientos prácticos y actualizados, permitiendo replicar soluciones tecnológicas comprobadas y reduciendo significativamente los costos de aprendizaje.

Programas de Formación Técnica Especializada

Finalmente, para que la adopción masiva de la tecnología solar térmica tenga éxito es indispensable contar con capital humano altamente capacitado. El Estado debe fomentar programas educativos técnicos específicos (diplomados, cursos especializados y capacitaciones profesionales certificadas) que preparen expertos en instalación, operación, mantenimiento y gestión avanzada de sistemas solares térmicos. Instituciones académicas y técnicas chilenas podrían liderar estos programas, respaldados por certificaciones internacionales reconocidas, asegurando calidad y pertinencia laboral.

En resumen, una estrategia integral que combine financiamiento innovador con I+D colaborativa e intensiva permitirá que Chile supere barreras financieras, reduzca riesgos tecnológicos y facilite la adopción acelerada de la energía solar térmica en diferentes sectores económicos. Implementar estas recomendaciones estratégicas contribuirá significativamente a la consolidación de Chile como líder en transición energética y sostenibilidad a nivel regional y mundial.

6. Conclusiones

El análisis desarrollado en este reporte evidencia claramente el potencial significativo que posee la energía solar térmica para contribuir sustancialmente a la transición energética de Chile, especialmente en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), fortalecimiento de la seguridad energética y diversificación sostenible de la matriz energética nacional. La excepcional irradiación solar, particularmente destacable en las regiones del norte y centro del país, ofrece una ventaja competitiva singular para implementar sistemas solares térmicos tanto en aplicaciones industriales y comerciales como residenciales.

No obstante, y pese a las prometedoras condiciones del país, la penetración actual de esta tecnología aún presenta limitaciones considerables debido a factores críticos como los altos costos iniciales de inversión (CAPEX), la necesidad de sistemas robustos de almacenamiento térmico, y una regulación aún insuficiente para promover su masificación. En consecuencia, el mercado nacional sigue centrado en proyectos emblemáticos aislados, como la planta CSP Cerro Dominador y aplicaciones puntuales en minería y en el sector residencial.

Este informe destaca que superar estos desafíos requiere acciones estratégicas claras, entre las cuales se recomienda particularmente: fomentar la innovación tecnológica mediante la adopción de tecnologías avanzadas como gemelos digitales, materiales de cambio de fase (PCM) y nanofluidos; implementar marcos regulatorios robustos con incentivos específicos y metas bien definidas para la incorporación de energía solar térmica en sectores clave; y

establecer esquemas innovadores de financiamiento que mitiguen el impacto del alto CAPEX inicial y atraigan inversiones privadas mediante bonos verdes, créditos blandos y contratos ESCO.

Finalmente, se resalta la necesidad de fortalecer alianzas estratégicas y colaborativas entre el sector académico, privado y público, a través de iniciativas conjuntas de investigación, desarrollo e innovación, así como la creación de programas especializados de capacitación técnica que aseguren la disponibilidad de capital humano calificado. De esta manera, Chile podría no solo aprovechar plenamente su potencial en energía solar térmica, sino también consolidar una posición de liderazgo regional e internacional en la transición hacia un modelo energético más limpio, resiliente y sostenible.

7. Referencias

- Ba, Labouda, Fatma Tangour, Ikram El Abbassi, and Rafik Absi. 2025. "Analysis of Digital Twin Applications in Energy Efficiency: A Systematic Review." *Sustainability* 17 (8): 3560.
- Carrión-Chamba, Willian, Wilson Murillo-Torres, and Andres Montero-Izquierdo. 2021. "Una Revisión de Los Últimos Avances de Los Colectores Solares Térmicos Aplicados En La Industria." *Ingenius*, no. 27 (December). <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.06>.
- Ganesan, P., and Trygve M. Eikevik. 2024. "Current Scientific Progress in Solar-Assisted Vapor Compression Heat Pump Technology: Advanced Design and Configuration, Refrigerant, Performance, Economic and Environmental Assessments." *International Journal of Thermofluids* 23 (100783): 100783.
- Kasaeian, Alibakhsh, Amin Toghi Eshghi, and Mohammad Sameti. 2015. "A Review on the Applications of Nanofluids in Solar Energy Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (March): 584–98.
- Mehos, M., H. Price, R. Cable, D. Kearney, B. Kelly, G. Kolb, and F. Morse. 2020. "Concentrating Solar Power Best Practices Study." NREL. <https://doi.org/10.2172/1665767>.
- Noč, Luka, and Ivan Jerman. 2022. "Review of the Spectrally Selective (CSP) Absorber Coatings, Suitable for Use in SHIP." *Solar Energy Materials and Solar Cells: An International Journal Devoted to Photovoltaic, Photothermal, and Photochemical Solar Energy Conversion* 238 (111625): 111625.
- Praveen. 2019. "Performance Analysis and Optimization of Central Receiver Solar Thermal Power Plants for Utility Scale Power Generation." *Sustainability* 12 (1): 127.
- "Solar Heat for Industry." 2017. Solar Payback.
- Vallati, Andrea, Miriam Di Matteo, Gianluigi Lo Basso, Paweł Ocioń, and Costanza Vittoria Fiorini. 2024. "Definition of a PVT Coupled Water Source Heat Pump System through

Optimization of Individual Components.” *Energy (Oxford, England)* 307 (132455): 132455.

Voyant, Cyril, Gilles Notton, Soteris Kalogirou, Marie-Laure Nivet, Christophe Paoli, Fabrice Motte, and Alexis Fouilloy. 2017. “Machine Learning Methods for Solar Radiation Forecasting: A Review.” *Renewable Energy* 105 (May): 569–82.