

Integración de Material de Cambio de Fase en una Residencia

Lucas Matas - Tomás Pérez Olivieri

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
2025

Integración de Material de Cambio de Fase en una Residencia

Lucas Matas - Tomás Pérez Olivieri

Proyecto Final de Ingeniería Mecánica presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero/a Mecánico/a

Director/a:
Ing. Pedro Sismondi – Ing. Guillermo Rodríguez – Ing. Juan Sismondi

Dedicatoria

Lucas Matas

Este proyecto está dedicado a todas las personas que me acompañan día a día y que confiaron y apostaron en mí, sobre todo a mis padres quienes siempre estuvieron y están para mí. En mis amigos quienes me ayudan a crecer y compartir hermosos momentos. No nos olvidemos que lo único que nos llevaremos de este mundo serán las relaciones que formemos, lo que además, nos hace humanos.

Tomas Perez Olivieri

A mi familia, especialmente a mis padres, por su amor incondicional y apoyo constante.
A todas las personas que caminaron a mi lado: mis hermanos, Julio, mis compañeros de facultad y mis amigos de toda la vida, Santiago, Mariano, Bernardo y Lucas.

Un saludo especial para Pablo, Liliana, Paola, Gustavo, Eugenia, Luciano, Emilia, Simón, Otto, Ruffo, Agustín, Agustina, Sebastián, Carla, Luca, Pablo, Agustina, Cecilia, Nicolás y Antonella, por estar presentes en distintos momentos de este camino y haber contribuido con su compañía, ánimo y cariño

Agradecimientos

Un profundo agradecimiento a nuestras familias, que nos brindaron la oportunidad, el sostén y la motivación necesarios para hacer posible el estudio de esta carrera.

También queremos agradecer a la universidad pública, y en particular a la Universidad Nacional de Rosario, por abrirnos las puertas de la Escuela de Ingeniería Mecánica y ofrecernos una educación superior de calidad.

Por último, y no por eso menos importante, extendemos nuestro agradecimiento a todas aquellas personas que hemos conocido a lo largo de esta hermosa carrera, quienes hicieron que los momentos difíciles fueran más llevaderos y que los momentos felices lo fueran aún más.

Resumen

El presente trabajo aborda la integración de materiales de cambio de fase (PCM) en colectores solares térmicos como solución para mitigar la intermitencia de la irradiación solar y mejorar la capacidad de almacenamiento térmico sin aumentar significativamente el volumen del sistema. Partiendo de la realidad del recurso solar disponible y de las limitaciones de los sistemas convencionales de almacenamiento sensible, se plantea analizar la viabilidad de un sistema híbrido capaz de almacenar energía térmica y, simultáneamente, generar electricidad a partir de gradientes de temperatura.

En este contexto, se propone la incorporación de celdas termogeneradoras (TEG) basadas en el efecto Seebeck, las cuales permiten convertir directamente una diferencia de temperatura en energía eléctrica. Estas celdas se ubican entre la placa absorbente del colector y un disipador térmico, generando una diferencia de temperatura entre sus caras caliente y fría. La cara caliente se encuentra en contacto con la superficie que recibe la radiación solar, mientras que la cara fría se vincula térmicamente con un disipador y con el material de cambio de fase, que actúa como sistema de almacenamiento térmico y regulador de temperatura.

El uso combinado de PCM y módulos TEG permite aprovechar simultáneamente la energía térmica y eléctrica del sistema. El PCM contribuye a estabilizar la temperatura del sistema, prolongando la duración del gradiente térmico necesario para la generación eléctrica, mientras que las celdas termogeneradoras permiten recuperar una fracción de la energía en forma de electricidad sin partes móviles ni mantenimiento significativo. Entre las principales ventajas de esta solución se destacan la simplicidad constructiva, la posibilidad de integración en elementos constructivos modulares y la utilización de energía solar de forma más integral.

El desarrollo de este tipo de sistemas híbridos abre interesantes oportunidades de optimización y mejora tecnológica. Entre ellas se destacan la posibilidad de perfeccionar la gestión térmica del dispositivo, optimizar el diseño del disipador y mejorar la transferencia de calor entre los distintos componentes del sistema. Asimismo, la selección de materiales de cambio de fase con propiedades térmicas adecuadas y la correcta integración de las celdas termogeneradoras permiten incrementar el gradiente térmico disponible y, por lo tanto, el potencial de generación eléctrica. En este sentido, el presente trabajo sienta las bases para futuras investigaciones orientadas a incrementar la eficiencia global del sistema

y a explorar nuevas configuraciones que permitan un aprovechamiento más completo de la energía solar.

Palabras clave: energía solar, materiales de cambio de fase, celdas termogeneradoras, efecto Seebeck, almacenamiento térmico, generación termoeléctrica.

Abstract

This work addresses the integration of phase change materials (PCM) into solar thermal collectors as a solution to mitigate the intermittency of solar irradiation and improve thermal energy storage capacity without significantly increasing the system volume. Considering the characteristics of the available solar resource and the limitations of conventional sensible heat storage systems, the study analyzes the feasibility of a hybrid system capable of storing thermal energy while simultaneously generating electricity from temperature gradients.

In this context, the incorporation of thermoelectric generator cells (TEG) based on the Seebeck effect is proposed, allowing the direct conversion of a temperature difference into electrical energy. These cells are positioned between the collector's absorber plate and a thermal heat sink, creating a temperature gradient between their hot and cold sides. The hot side is in contact with the surface that receives solar radiation, while the cold side is thermally connected to a heat sink and to the phase change material, which acts both as a thermal energy storage medium and as a temperature regulator.

The combined use of PCM and TEG modules enables the simultaneous utilization of the system's thermal and electrical energy. The PCM contributes to stabilizing the system temperature, extending the duration of the thermal gradient required for electrical generation, while the thermoelectric cells allow part of the energy to be recovered in the form of electricity without moving parts or significant maintenance requirements. Among the main advantages of this solution are its constructive simplicity, the possibility of integration into modular building elements, and a more comprehensive utilization of solar energy.

The development of this type of hybrid system opens interesting opportunities for optimization and technological improvement. These include enhancing the thermal management of the device, optimizing the heat sink design, and improving heat transfer between the different system components. Furthermore, the selection of phase change materials with suitable thermal properties and the proper integration of thermoelectric cells can increase the available temperature gradient and, consequently, the electrical generation

potential. In this sense, the present work establishes a basis for future research aimed at improving the overall efficiency of the system and exploring new configurations that allow a more complete use of solar energy.

Keywords: solar energy, phase change materials, thermoelectric generator cells, Seebeck effect, thermal energy storage, thermoelectric generation.

Contenido

Dedicatoria....3
Agradecimientos....4
Resumen....5
Abstract....6
Contenido....8
Índice Tablas y Figuras....13
1.Introducción....15
1.1 Antecedentes y origen tecnológico:....15
Figura 1: Prototipo inicial de Colector Solar....16
1.2 Desarrollo e integración de los materiales de cambio de fase (PCM):....16
Figura 2: Funcionamiento físico de un PCM....17
1.3 Importancia y necesidad tecnológica:....17
1.5 Objetivos, alcances y limitaciones:....18
1.6 Significado del estudio:....18
2. Marco Teórico....19
2.1 Fenómenos Físicos en Colectores Solares con PCM....20
Figura 3: Funcionamiento Colector Solar Térmico....22
Figura 4: Funcionamiento Colector Solar Térmico en una casa....22
2.1.2 Almacenamiento de Energía Térmica....23
2.1.3 Balance Global de Energía....24
2.2 Materiales de cambio de fase (PCM) para sistemas Solares Térmicos....25
Figura 5: Rangos de Temperatura PCM....25
2.2.1 Clasificación y Propiedades Fundamentales....26
Figura 6: parafina granulada....27
2.2.2. Estrategias de Mejora y Desarrollo de PCMs Compuestos....29
2.2.3. Criterios Integrales de Selección para STCS....31
2.2.4. Conclusiones sobre Materiales....32
2.3 Marco Teórico: Generación Termoeléctrica con PCM....32
2.3.1 Fundamentos de Generación Termoeléctrica (TEG)....32
Figura 7: figura esquemática de los elementos semiconductores de una celda termogeneradora....33
2.3.2 Materiales de Cambio de Fase (PCM)....33
● m: Masa del PCM....34
● L: Calor latente de fusión....34
● Tm: Temperatura de cambio de fase....34
● Cp: Capacidad calorífica específica....34
● Al acoplar el PCM al lado frío del TEG, se logra mantener ΔT máximo de....34
● forma pasiva mientras ocurre la transición de fase, optimizando la generación....34
● eléctrica según la ecuación (1)....34
2.3.3 Potencia generada....34

Transferencia hacia la celda (conducción)....36
3. Escala del Proyecto....39
3.1. Integración de Sistemas PCM-Colector Solar en el Ámbito Residencial....39
Figura 9: muestra de parafina encapsulada para colector solar....39
Tabla 1: propiedades de la parafina en distintas fases de estado....40
3.1.2. Objetivo y Relevancia en el Contexto Residencial....40
3.1.3. Configuraciones Típicas de Sistema....40
Figura 10: dibujo esquemático de colector solar con PCM integrado....41
Figura 11: dibujo esquemático de colector solar con PCM externo....42
3.1.4. Ejemplos de Aplicación y Sinergias....42
Figura 12: pared de 32 ladrillos termogeneradores con PCM....43
Figura 13: figura esquemática del funcionamiento del muro....43
3.1.5. Consideraciones Críticas de Diseño para la Implementación Residencial....44
3.1.7. Innovaciones en Sistemas de Agua Caliente Sanitaria (ACS)....44
3.1.8 Diseños de Sistemas para Maximizar el Almacenamiento y la Entrega....45
3.2 Viabilidad del Proyecto....45
3.2.1 Propósitos definidos....46
3.2.2 Zonas de alta radiación solar....46
Figura 14: distribución de la intensidad de radiación solar en Argentina....46
1. Radiación Solar por Zonas....46
Tabla 2: distribución de la radiación solar por zonas....47
2. Perspectiva Numérica: Comparación con el Promedio Mundial....47
3.2.3 Rentabilidad de instalaciones solares térmicas....47
Figura 15: eficiencia en el calentamiento de agua....48
3.2.4 Impulso a la investigación e innovación....48
4. Desafíos y Soluciones....49
4.1 Posibles Soluciones....49
4.1.1 Solución 1: Sistema Híbrido Solar-Eólico con Almacenamiento PCM....49
4.1.2 Solución 2: Colector Solar Térmico con Almacenamiento Integrado PCM y Geometrías de Mejora de Transferencia, Complementado con Pared TEG....50
4.1.3 Solución 3: Paneles Fotovoltaico-Térmicos (PVT) con Almacenamiento Híbrido PCM-Baterías....51
4.2 Justificación de la Selección: Superioridad de la Solución 2....53
5. Solución Final (imagenes)....56
Figura 16: colector solar diseñado en SolidWorks....56
5.1 Justificación Técnica de las Decisiones de Diseño....56
5.1.1 Configuración del Colector: Tubos Paralelos vs. Serpentina....56
Figura 18: colector solar vista en corte en SolidWorks....58
5.1.2. Integración de Aluminio Poroso....58
5.2 Solar Tracker....59
Figura 21: figura esquemática de un solar tracker con paneles fotovoltaicos....60
Figura 22: solar tracker acoplado al colector....60

Figura 23: colector solar con solar tracker y pintura selectiva en placa absorbente....61
5.3 Integración Celdas TEG con Materiales de Cambio de Fase....61
Figura 24: imagen esquemática hecha por inteligencia artificial....62
Figura 25: vista explosionada del ladrillo colector con PCM en SolidWorks..63
Figura 27: vista isométrica a la izquierda y en corte a la derecha del ladrillo donde se puede observar donde estaría almacenada la parafina....64
5.4 Justificación Cálculos....64
5.4.1 Colector Solar....64
Tabla 3: tabla de variables con valores iniciales y condiciones de borde para la realización de hoja de cálculo....65
Tabla 4: hoja de cálculo obtenida para la época de verano....66
Figura 28: gráficas concatenadas del estado de carga y energía demandada del PCM en función del tiempo para verano....68
Tabla 5: hoja de cálculo obtenida para época invernal....70
Figura 29: gráficas concatenadas del estado de carga y energía demandada del PCM en función del tiempo para invierno....71
5.4.2 Celdas TEG....72
Tabla 6: hoja de cálculo obtenida para época de verano....75
Tabla 7: variables y valores utilizados en las estimaciones....76
Figura 30: gráfica de la potencia de salida obtenida en función de la resistencia de la carga....77
Figura 31: gráficas concatenadas de la irradiación solar y la potencia generada en función del tiempo....78
Tabla 8: hoja de cálculo obtenida para época invernal....80
Tabla 9: variables y valores utilizados en las estimaciones....81
5.5 Justificación Costos....82
Conclusión....101
Referencias....102
Anexo....104
Plano Conjunto Colector Solar....104
Plano Conjunto Pared PCM + Celdas TEG....104

Índice Tablas y Figuras

Figura 1: Prototipo inicial de Colector Solar..... 16

Figura 2: Funcionamiento físico de un PCM..... 17

Figura 3: Funcionamiento Colector Solar Térmico..... 22

Figura 4: Funcionamiento Colector Solar Térmico en una casa..... 22

Figura 5: Rangos de Temperatura PCM..... 25

Figura 6: parafina granulada..... 27

Figura 7: figura esquemática de los elementos semiconductores de una celda termogeneradora..... 36

Figura 9: muestra de parafina encapsulada para colector solar..... 42

Tabla 1: propiedades de la parafina en distintas fases de estado..... 42

Figura 10: dibujo esquemático de colector solar con PCM integrado..... 43

Figura 11: dibujo esquemático de colector solar con PCM externo..... 44

Figura 12: pared de 32 ladrillos termogeneradores con PCM..... 45

Figura 13: figura esquemática del funcionamiento del muro..... 45

Figura 14: distribución de la intensidad de radiación solar en Argentina..... 48

Tabla 2: distribución de la radiación solar por zonas..... 48

Figura 15: eficiencia en el calentamiento de agua..... 50

Figura 16: colector solar diseñado en SolidWorks..... 57

Figura 17: colector solar vista superior en SolidWorks..... 58

Figura 18: colector solar vista en corte en SolidWorks..... 58

Figura 21: figura esquemática de un solar tracker con paneles fotovoltaicos.... 60

Figura 22: solar tracker acoplado al colector..... 61

Figura 23: colector solar con solar tracker y pintura selectiva en placa absorbente..... 62

Figura 24: imagen esquemática hecha por inteligencia artificial..... 63

Figura 25: vista explosionada del ladrillo colector con PCM en SolidWorks.. 64

Figura 26: vista explosionada del ladrillo colector con PCM en SolidWorks.. 65

Figura 27: vista isométrica a la izquierda y en corte a la derecha del ladrillo donde se puede observar donde estaría almacenada la parafina..... 65

Tabla 3: tabla de variables con valores iniciales y condiciones de borde para la realización de hoja de cálculo.....66

Tabla 4: hoja de cálculo obtenida para época de verano..... 68

Figura 28: gráficas concatenadas del estado de carga y energía demandada del PCM en función del tiempo para verano..... 70

Tabla 5: hoja de cálculo obtenida para época invernal.....71

Figura 29: gráficas concatenadas del estado de carga y energía demandada del PCM en función del tiempo para invierno.....72

Tabla 6: hoja de cálculo obtenida para época de verano..... 76

Tabla 7: variables y valores utilizados en las estimaciones.....77

Figura 30: gráfica de la potencia de salida obtenida en función de la resistencia de la carga.....78

Figura 31: gráficas concatenadas de la irradiación solar y la potencia generada en función del tiempo..... 79

Tabla 8: hoja de cálculo obtenida para época invernal.....81

Tabla 9: variables y valores utilizados en las estimaciones.....82

1.Introducción

El aprovechamiento de la energía solar térmica constituye una de las estrategias más relevantes dentro del conjunto de tecnologías renovables orientadas a mitigar el impacto ambiental derivado del uso de combustibles fósiles. Sin embargo, la intermitencia propia de la radiación solar ha sido, desde los inicios de su aplicación práctica, una de las principales limitaciones para su aprovechamiento continuo. La posibilidad de almacenar la energía captada y liberarla cuando las condiciones solares no son favorables se ha convertido en un desafío tecnológico que ha guiado gran parte de la investigación en el campo de la ingeniería térmica. En este contexto, los colectores solares con materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) surgen como una solución innovadora que permite incrementar la eficiencia y autonomía de los sistemas solares térmicos mediante un almacenamiento compacto, de alta densidad energética y temperatura estable.

1.1 Antecedentes y origen tecnológico:

Los primeros colectores solares térmicos surgieron a comienzos del siglo XX, y su desarrollo más significativo se dio entre las décadas de 1950 y 1970. Estos sistemas clásicos consistían en una placa metálica absorbente, generalmente de cobre o aluminio, recubierta con pintura negra para maximizar la absorción de radiación, un fluido térmico (agua o aire) que circulaba por tubos para transportar el calor, y una cubierta transparente acompañada de aislamiento térmico para minimizar pérdidas.

A pesar de su sencillez y eficiencia en condiciones de radiación directa, estos colectores presentaban una limitación fundamental: la ausencia de un sistema de almacenamiento térmico eficiente que permitiera utilizar el calor captado fuera de las horas de insolación. El resultado era una dependencia directa del sol, que reducía la utilidad de la energía captada a los momentos de máxima irradiancia.

A partir de la crisis energética de 1973, el interés en el almacenamiento térmico aumentó considerablemente. Las primeras soluciones emplearon almacenamiento sensible, utilizando grandes volúmenes de agua, rocas o materiales cerámicos para acumular energía mediante el aumento de su temperatura. Sin embargo, esta modalidad requería sistemas voluminosos y presentaba pérdidas térmicas significativas, ya que la energía almacenada dependía directamente del rango de temperatura alcanzado por el material. La búsqueda de alternativas más eficientes llevó a explorar nuevos métodos de acumulación basados en el calor latente, lo que dio origen a la investigación de los materiales de cambio de fase.

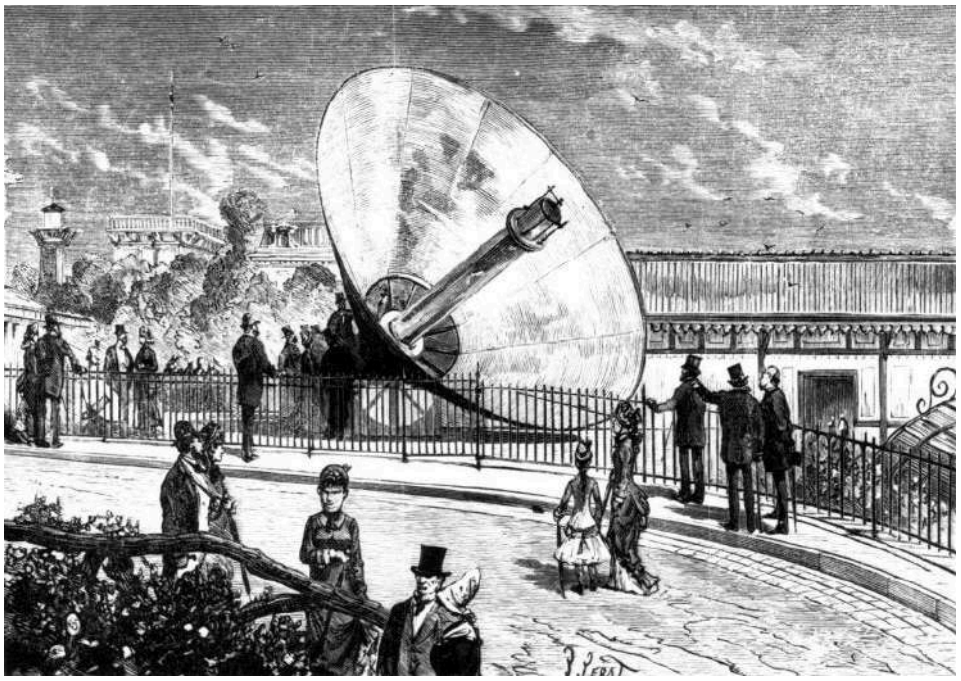


Figura 1: Prototipo inicial de Colector Solar

1.2 Desarrollo e integración de los materiales de cambio de fase (PCM):

Los PCM poseen la capacidad de almacenar o liberar grandes cantidades de energía durante sus procesos de fusión y solidificación, manteniendo una temperatura prácticamente constante. Este comportamiento los hace especialmente adecuados para aplicaciones solares, donde los rangos operativos suelen encontrarse entre 30 y 80 °C. Durante las décadas de 1980 y 1990, instituciones como el National Renewable Energy Laboratory (NREL, Estados Unidos) y el Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Alemania) impulsaron estudios sobre parafinas, sales hidratadas y ácidos grasos como posibles materiales de almacenamiento térmico.

A partir de los años 1990 comenzaron a desarrollarse los primeros colectores solares experimentales con PCM integrados. En estas configuraciones, el material de cambio de fase se colocaba en la parte posterior de la placa absorbente o dentro de compartimientos específicos, permitiendo almacenar el exceso de calor durante las horas de máxima radiación y liberarlo cuando la temperatura del fluido descendía. También surgieron sistemas híbridos, como los colectores PVT (fotovoltaico-térmicos), en los cuales el PCM cumple la función de estabilizar la temperatura del panel, mejorando su eficiencia eléctrica y térmica simultáneamente.

Durante este período se comprobó que el uso de PCM contribuía a suavizar las fluctuaciones térmicas, mejorar la eficiencia diaria de los colectores y ampliar su autonomía de funcionamiento, aunque también se evidenció la necesidad de optimizar la transferencia térmica mediante el uso de aletas, encapsulados metálicos o microencapsulación del material.

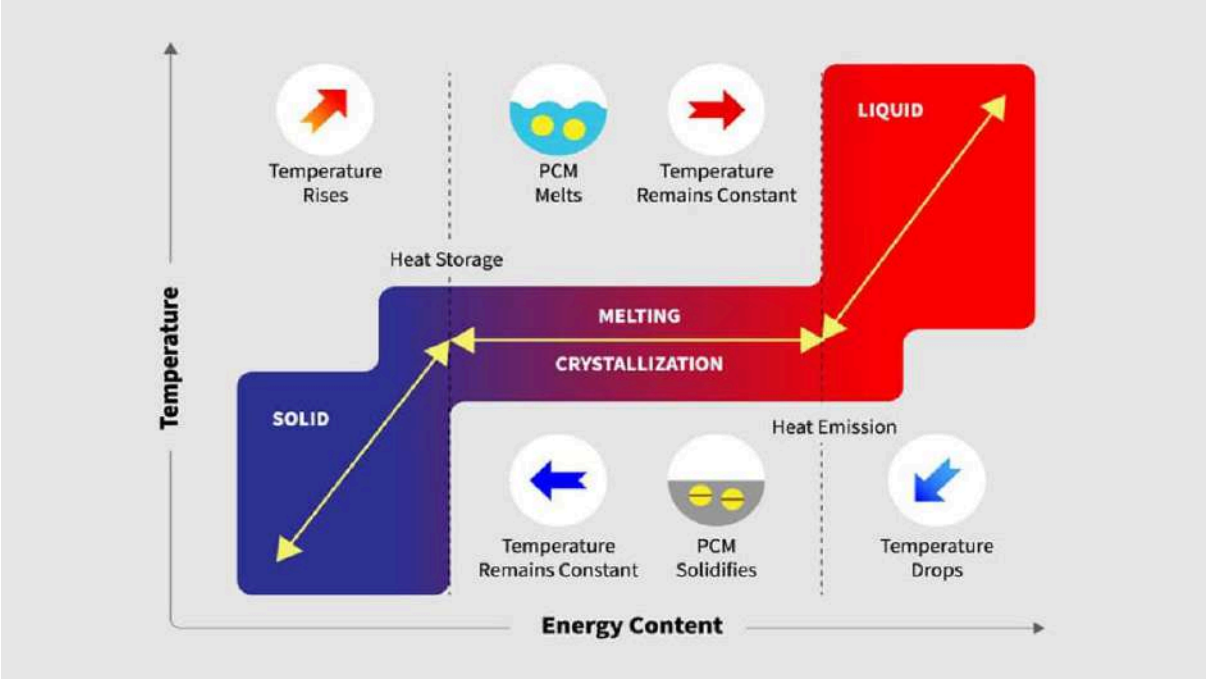


Figura 2: Funcionamiento físico de un PCM.

1.3 Importancia y necesidad tecnológica:

La incorporación de materiales de cambio de fase responde a una necesidad fundamental: incrementar la capacidad de almacenamiento térmico sin aumentar el volumen ni la masa del sistema. A diferencia de los métodos convencionales, los PCM ofrecen una alta densidad energética y una temperatura de operación constante, lo que disminuye las pérdidas térmicas y simplifica la gestión del calor.

Desde una perspectiva energética, esta tecnología permite aprovechar de manera más efectiva la radiación solar, reduciendo la dependencia de calderas auxiliares o resistencias eléctricas, y contribuyendo a la transición hacia un modelo energético sostenible.

Asimismo, factores socioeconómicos y ambientales, como las crisis energéticas, la volatilidad del precio del petróleo, las políticas de descarbonización y el crecimiento urbano, han impulsado la búsqueda de soluciones de almacenamiento térmico compacto y eficiente.

Los colectores solares con PCM se presentan así como una respuesta viable a la demanda de confort térmico constante, eficiencia energética y sostenibilidad ambiental.

1.5 Objetivos, alcances y limitaciones:

El presente proyecto tiene como objetivo general analizar el funcionamiento y desempeño térmico de colectores solares con materiales de cambio de fase, identificando las ventajas comparativas frente a los sistemas tradicionales y evaluando las variables de diseño que afectan su rendimiento.

Entre los objetivos específicos se destacan:

- Examinar los distintos tipos de PCM y sus propiedades térmicas relevantes para aplicaciones solares.
- Estudiar configuraciones geométricas y métodos de encapsulación adecuados para mejorar la transferencia de calor.
- Analizar la eficiencia global del colector considerando el comportamiento dinámico del PCM.
- Mejora de la conductividad térmica del PCM.
- Evaluar la viabilidad técnica y económica de la implementación de estos sistemas en entornos domésticos o industriales.
- Integración de Celdas Termogeneradoras (TEG) integradas a material de Cambio de Fase
- El alcance del estudio abarca la revisión teórica, el análisis comparativo y la modelización del comportamiento térmico del sistema. No se contempla, en esta instancia, la fabricación de prototipos a escala real ni la medición experimental de campo.

1.6 Significado del estudio:

El desarrollo de colectores solares con materiales de cambio de fase representa una contribución significativa al campo de la ingeniería energética, ya que combina la captación solar con un almacenamiento térmico eficiente y sostenible. Esta tecnología promueve una mayor autonomía de los sistemas solares, reduce el consumo de energía auxiliar y se integra armónicamente con los objetivos de eficiencia y sustentabilidad ambiental que caracterizan a la ingeniería moderna.

En el presente trabajo se analizan distintos avances vinculados al uso de materiales de cambio de fase (PCM) aplicados al almacenamiento térmico en sistemas solares. En particular, se estudian diversas estrategias orientadas a mejorar el desempeño térmico de estos materiales, tales como técnicas de encapsulación y la incorporación de materiales con mayor conductividad térmica. En este sentido, se considera la microencapsulación como una alternativa que permite dispersar el material activo en matrices poliméricas o metálicas, aumentando la superficie de intercambio térmico y reduciendo posibles problemas de segregación. Asimismo, se analiza la combinación de PCM con materiales como grafito expandido o estructuras metálicas porosas, con el objetivo de mejorar la transferencia de calor y, en consecuencia, la eficiencia del almacenamiento térmico.

De forma complementaria, se estudia la aplicación de colectores solares con PCM de temperatura de fusión adecuada para distintas aplicaciones energéticas, tales como la producción de agua caliente sanitaria, la calefacción de ambientes y la climatización pasiva de edificaciones.

En el desarrollo del proyecto también se analizan distintas aplicaciones de colectores solares con PCM en diversos contextos, tanto en sistemas domésticos como industriales o agrícolas. En el ámbito de la arquitectura sustentable, se evalúa cómo la integración de PCM en elementos constructivos, como fachadas o cubiertas, puede contribuir a reducir picos térmicos y mejorar las condiciones de confort interior. Asimismo, se consideran configuraciones híbridas en las que los materiales de cambio de fase permiten gestionar el calor dentro del sistema, favoreciendo un aprovechamiento más eficiente de la energía solar. En este marco, el trabajo se orienta a explorar alternativas que permitan optimizar la transferencia de calor, mejorar la integración de los materiales dentro del sistema y avanzar hacia soluciones energéticas más eficientes y sustentables.

2. Marco Teórico

Los colectores solares con PCM aprovechan fenómenos de transferencia de calor y almacenamiento de energía latente para proporcionar calor estable y continuo. Las ecuaciones de balance de energía, conducción térmica y movimiento de interfase son esenciales para modelar su comportamiento. La integración de PCM no solo incrementa la eficiencia del colector, sino que también permite aplicaciones en sistemas híbridos y gestión térmica en edificios, alineándose con los objetivos de sostenibilidad energética.

2.1 Fenómenos Físicos en Colectores Solares con PCM

El colector solar con PCM es un sistema térmico que captura energía de la radiación solar, la transfiere a un fluido o material interno y la almacena para liberarla posteriormente. La transferencia de calor en este sistema involucra tres mecanismos fundamentales, la conducción, la convección y la radiación.

2.1.1 Transferencias de calor

Conducción: la conducción es la transferencia de calor a través de un material sólido debido a un gradiente de temperatura. La conducción térmica es el mecanismo predominante en la transferencia de calor a través de los componentes sólidos del colector y dentro del propio PCM. En él, la conducción ocurre principalmente en:

- La placa absorbente metálica (cobre, aluminio), que recibe la radiación solar y transfiere el calor al PCM adyacente.
- Los encapsulados o matrices que contienen el PCM, donde la conductividad térmica del material determina la velocidad de carga y descarga del calor.

Para la conducción se utiliza la fórmula de Fourier:

$$\vec{q}'' = -k\nabla T$$

donde:

- $\vec{q}''$: Flujo de calor por unidad de área [W/m²]
- k: Conductividad térmica del material [W/m·K]
- ∇T: Gradiente de temperatura [K/m]

Uno de los desafíos es que muchos PCM orgánicos (como la parafina) tienen baja conductividad térmica (0.2–0.5 W/m·K), lo que puede limitar la eficiencia del colector. Para mejorarla, se suelen incorporar aletas metálicas o superficies extendidas, materiales compuestos o nanomateriales conductores.

Convección: se refiere al transporte de calor mediante un fluido en movimiento, que puede ser líquido o gas.

En colectores solares el fluido térmico (agua, aceite o aire) circula en contacto con el PCM o con la placa absorbente. Este movimiento permite disipar el calor hacia el sistema de almacenamiento o hacia el punto de uso. En PCM parcialmente fundido, también ocurre

convección natural interna, donde las zonas líquidas en fusión generan corrientes internas que aceleran la transferencia de calor dentro del material. Esto es especialmente importante para materiales con baja conductividad. La ecuación que modela la transferencia de calor por convección es la siguiente:

$$q_{conv} = hA(T_{superficie} - T_{fluido})$$

donde:

- q_{conv}: Tasa de transferencia de calor [W]
- h: Coeficiente de convección [W/m²·K]
- A: Área de contacto [m²]

Radiación: La radiación térmica es la transferencia de energía mediante emisión de ondas electromagnéticas. En colectores solares la placa absorbente recibe radiación directa del sol. La cubierta transparente y el aislamiento minimizan las pérdidas de radiación hacia el ambiente.

Aunque la radiación es el mecanismo de captación inicial, su eficiencia depende del coeficiente de absorción de la superficie y de la emisividad del PCM y de los encapsulados. La radiación solar incidente se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$S = G_T \cdot (\tau\alpha)$$

donde:

- S: Radiación solar absorbida [W/m²]
- G_T: Irradiancia solar total [W/m²]
- τ: Transmitancia de la cubierta
- α: Absortancia de la placa absorbedora

Y por la caución de Stefan-Boltzmann:

$$q_{rad,emitida} = \epsilon\sigma A(T^4_{absorbedor} - T^4_{cubierta})$$

donde:

- ϵ: Emisividad de la superficie
- σ: Constante de Stefan-Boltzmann ($5{,}67 \times 10^{-8}$ W/m²·K^4)

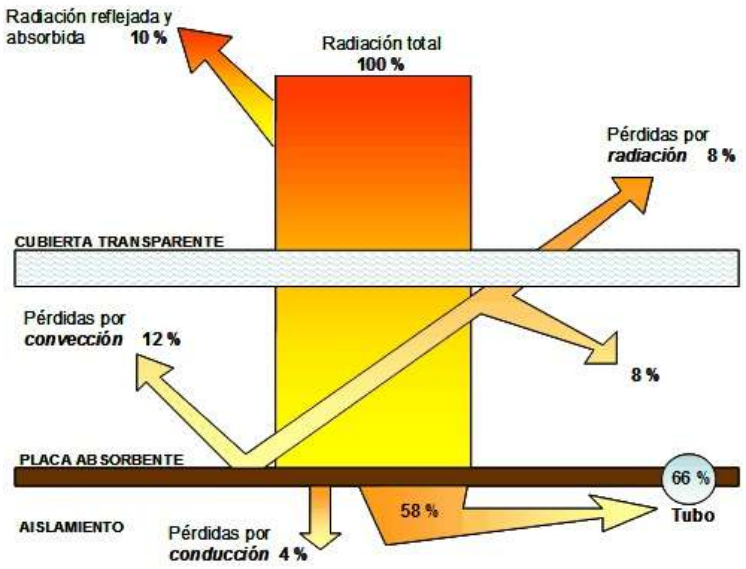


Figura 3: Funcionamiento Colector Solar Térmico

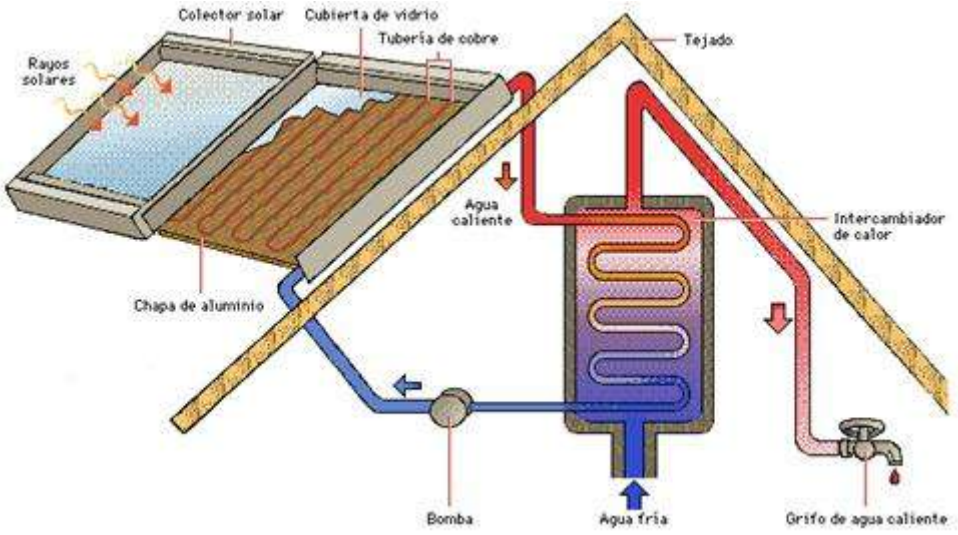


Figura 4: Funcionamiento Colector Solar Térmico en una casa

2.1.2 Almacenamiento de Energía Térmica

El almacenamiento de energía en un colector con PCM combina calor sensible y calor latente.

El calor sensible es la energía almacenada cuando la temperatura del material cambia sin que ocurra cambio de fase.

Fórmula:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

donde:

m: masa del material

c_p: capacidad calorífica específica

ΔT: variación de temperatura

En un PCM, el calor sensible permite que el material absorba energía antes de alcanzar la temperatura de fusión o después de solidificar.

El calor latente es la energía absorbida o liberada durante el cambio de fase, sin que la temperatura del material varíe significativamente.

Fórmula:

$$c_{p,efectivo} = c_p + \frac{L}{\Delta T}$$

donde:

- L: Calor latente de fusión [J/kg]
- ΔT: Rango de temperatura de cambio de fase [K]

Este mecanismo es el que le confiere a los PCM su alta densidad energética y estabilidad térmica.

Permite almacenar grandes cantidades de calor en un rango de temperatura casi constante, ideal para aplicaciones de agua caliente o calefacción, donde se requiere regular la temperatura del fluido.

2.1.3 Balance Global de Energía

La energía solar incidente se distribuye según:

$$\dot{Q}_{absorbido} = \dot{Q}_{util} + \dot{Q}_{almacenado} + \dot{Q}_{prdidas}$$

donde:

$$\dot{Q}_{absorbido} = A_c \cdot G \cdot \tau\alpha$$
$$\dot{Q}_{til} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})$$
$$\dot{Q}_{prdidas} = U_L \cdot A_c \cdot (T_{placa} - T_{ambiente})$$

donde,

A_c: Área del colector [m^2]

G: Radiación solar incidente [$\mathrm{W\,m^{-2}}$]

τ: Transmitividad de la cubierta

α: Absortividad de la placa

$\dot{m}$: Flujo másico del fluido [$\mathrm{kg\,s^{-1}}$]

c_p: Calor específico del fluido [$\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$]

U_L: Coeficiente global de pérdidas [$\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$]

La eficiencia depende de la conductividad del encapsulado y del material base. La energía fluye desde la placa absorbente hacia el PCM durante el día y regresa al fluido térmico cuando el PCM libera calor.

La convección del fluido asegura que el calor almacenado se distribuya de manera uniforme hacia el sistema de uso. La convección natural interna del PCM líquido acelera la transferencia, evitando zonas frías en el material.

La radiación garantiza que la energía solar se absorba inicialmente en la placa y se transfiera al PCM. La radiación también puede causar pérdidas si no se controla con cubierta transparente y aislamiento.

El funcionamiento eficiente de un colector solar con PCM depende de la correcta combinación de los tres mecanismos de transferencia de calor y del aprovechamiento del calor latente del PCM. El diseño debe maximizar la conducción hacia el PCM, optimizar la convección del fluido térmico y minimizar las pérdidas por radiación, para garantizar un

almacenamiento compacto, estable y de alta densidad energética. Esta interacción permite que los colectores con PCM superen las limitaciones de los sistemas solares tradicionales, logrando mayor autonomía y eficiencia energética.

2.2 Materiales de cambio de fase (PCM) para sistemas Solares Térmicos

La selección y optimización del Material de Cambio de Fase (PCM) constituyen el núcleo del desarrollo de sistemas de almacenamiento térmico latente eficaces. Esta sección detalla la clasificación, propiedades, métodos de mejora y criterios de selección de PCMs aplicables a Sistemas de Térmicos Solares (STS)

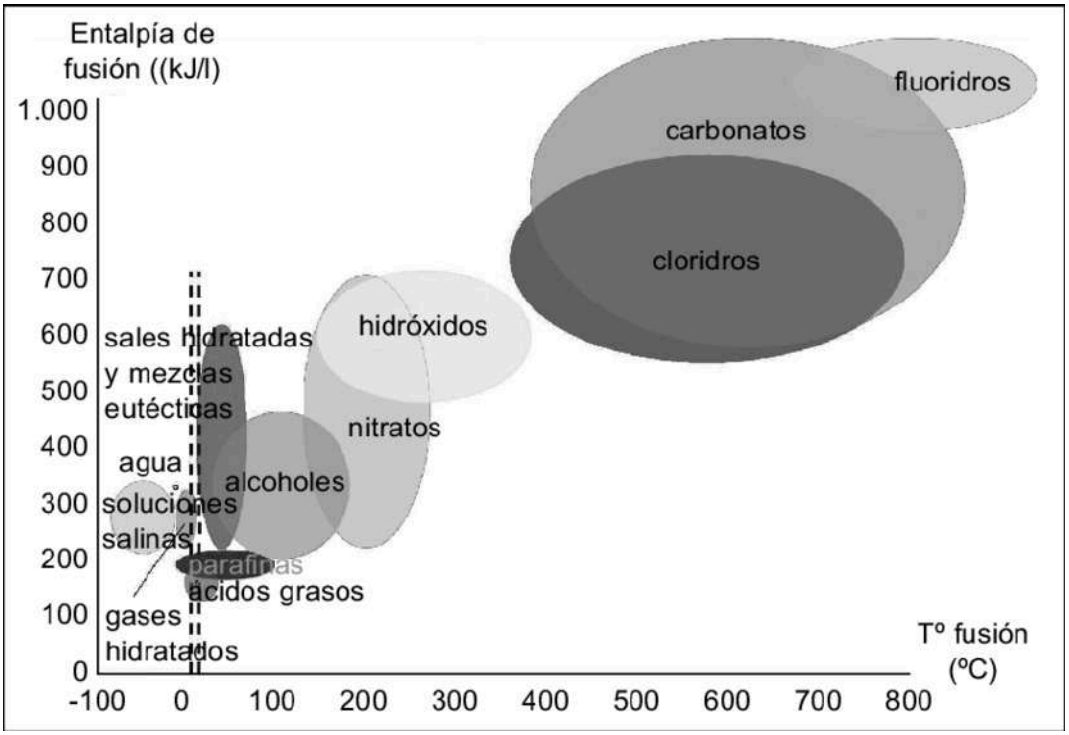


Figura 5: Rangos de Temperatura PCM

2.2.1 Clasificación y Propiedades Fundamentales

Los PCMs se clasifican principalmente en dos categorías, cada una con ventajas y desafíos distintivos:

PCMs Orgánicos (Parafinas, Ácidos Grasos):

Son sustancias que almacenan y liberan energía térmica mediante el calor latente durante su transición de estado (generalmente de sólido a líquido). Se dividen principalmente en parafinas y compuestos no parafínicos, como los ácidos grasos.

- **Parafinas:** Son hidrocarburos de cadena lineal (n-alcanos) derivados mayoritariamente del petróleo.
    - Ventajas:
        - Estabilidad Térmica: Soportan miles de ciclos de congelación/fusión sin degradar sus propiedades.
        - Bajo Subenfriamiento: Solidifican a una temperatura muy cercana a su punto de fusión.
        - Seguridad: Son químicamente inertes, no corrosivas y no segregan fases
        - Estabilidad química, no corrosivos, congelención insensible y amplia gama de temperaturas de fusión..
    - Desventajas:
        - Inflamabilidad: Tienen un punto de inflamación relativamente bajo.
        - Baja Conductividad Térmica: Requieren sistemas adicionales (como aletas o espumas metálicas) para mejorar la transferencia de calor.
        - Origen: Al ser derivados del petróleo, su huella de carbono es mayor que la de los bio-basados. Alta inflamabilidad y baja densidad energética volumétrica.

- **Ácidos Grasos (Bio-basados):** Son compuestos orgánicos derivados de fuentes vegetales (aceites de palma, coco) o animales. Ejemplos comunes incluyen el ácido láurico, ácido palmítico y ácido esteárico.
    - Ventajas:
        - Sostenibilidad: Son renovables y biodegradables.
        - Calor Latente: Poseen valores de calor latente comparables o superiores a las parafinas.
        - Estabilidad: Al igual que las parafinas, no presentan segregación de fases.
    - Desventajas:
        - Corrosión: Pueden ser ligeramente corrosivos para ciertos metales como el cobre o el aluminio, lo que exige un encapsulado cuidadoso.
        - Costo: Históricamente han sido más costosos que las parafinas comerciales.
        - Olor: Algunos pueden desprender aromas suaves durante el cambio de fase si no están bien sellados.



Figura 6: parafina granulada.

PCMs Inorgánicos (Sales Hidratadas, Eutécticos, Nitratos):

Los materiales de cambio de fase (PCMs) inorgánicos almacenan y liberan energía mediante el calor latente de fusión/solidificación. Se emplean ampliamente en almacenamiento térmico a gran escala y en control de temperatura en construcción por su alta densidad energética volumétrica y su buena conductividad térmica relativa. La estabilidad térmica cíclica es un parámetro de validación esencial: ensayos que someten PCMs a 100, 300 y 500 ciclos de fusión-solidificación son habituales para confirmar que

propiedades como el calor latente y el punto de fusión se mantienen estables y, por tanto, garantizar una vida útil prolongada.

- **Sales Hidratadas** : Son los PCMs inorgánicos más comunes. Consisten en una sal cristalina con moléculas de agua integradas.
    - Ventajas:
        - Alta densidad energética volumétrica.
        - Buena conductividad térmica (sensiblemente superior a la de muchos PCMs orgánicos).
        - Elevado calor latente.
        - No inflamables y, en general, de bajo costo.
    - Desventajas
        - Tendencia al sobreenfriamiento (supercooling): pueden permanecer en estado líquido por debajo de su punto de fusión, dificultando la liberación de la energía latente.
        - Segregación de fases: separación entre la sal y el agua tras ciclos repetidos, lo que degrada el rendimiento.
        - Suelen ser corrosivas, por lo que exigen materiales de contención compatibles o inhibidores/cargas.

Usos típicos: almacenamiento térmico en edificación y aplicaciones donde se prioriza densidad energética y coste.

- **Eutécticos (Inorgánicos):** Son mezclas de dos o más sales que se funden y solidifican a una temperatura constante, inferior a la de sus componentes individuales.
    - Ventajas:
        - No presentan segregación de fases, ya que la mezcla funde de forma congruente (como un solo componente).
        - Sus propiedades se pueden "sintonizar" ajustando las proporciones.

- Desventajas:
  - Algunos eutécticos pueden requerir formulación cuidadosa y controles de compatibilidad con el sistema de almacenamiento (contenedores, intercambiadores).
  - Dependiendo de la composición, pueden presentar corrosividad y/o costes de formulación superiores a soluciones simples.

Uso común: Aplicaciones industriales donde se requiere una temperatura de cambio de fase muy específica.

- **Nitratos:** Sales basadas en el ion nitrato, frecuentemente utilizadas en mezclas binarias o ternarias (como la "Sal Solar").
  - Ventajas:
    - Estabilidad térmica extrema. Pueden operar a temperaturas muy altas (desde 150°C hasta más de 500°C).
    - Aptas para almacenamiento térmico de larga duración en procesos a alta temperatura.
  - Desventajas:
    - Suelen ser **corrosivas** para metales convencionales, por lo que exigen aleaciones o recubrimientos resistentes a la corrosión.
    - A muy altas temperaturas pueden ocurrir descomposición química si no se controla el ambiente y la estabilidad del fluido.

Uso común: Centrales de Energía Solar Concentrada (CSP) para el almacenamiento térmico de larga duración, permitiendo generar electricidad incluso de noche.

2.2.2. Estrategias de Mejora y Desarrollo de PCMs Compuestos

Para superar las limitaciones de los PCMs puros (principalmente baja conductividad térmica, problemas de estabilidad o contención en estado líquido), se desarrollan materiales compuestos y estrategias de encapsulación que permiten mejorar su desempeño térmico y su integración en sistemas de almacenamiento.

Encapsulación: Es un método fundamental para contener el PCM cuando se encuentra en estado líquido, evitar fugas y aumentar el área de intercambio de calor entre el material y el fluido de transferencia térmica (HTF).

- **Micro y nanoencapsulación**:
  Técnicas como la polimerización in-situ en emulsión permiten formar microcápsulas compuestas por un núcleo de PCM y una cubierta polimérica (por ejemplo, PMMA). Un ejemplo es el docosano microencapsulado, utilizado en sistemas de calefacción solar. Este tipo de encapsulación mejora la estabilidad del material y contribuye a mitigar problemas como la inflamabilidad y la baja conductividad térmica.

- **Encapsulación a macroescala**:
  Consiste en encapsular el PCM en recipientes de mayor tamaño (cápsulas cilíndricas o esféricas), dentro de los cuales el material cambia de fase mientras el fluido de transferencia de calor (HTF) circula alrededor o a través del sistema para absorber o liberar energía térmica.

Mejora de la conductividad térmica

Debido a que muchos PCMs, especialmente los orgánicos, presentan baja conductividad térmica, se desarrollan estrategias para mejorar la transferencia de calor dentro del material.

- **Adición de matrices de aluminio poroso:**
  Una de las estrategias más efectivas consiste en impregnar el PCM dentro de estructuras de aluminio poroso. Estas matrices metálicas actúan como una red conductora tridimensional que facilita la propagación del calor dentro del material. Cuando se combinan con PCMs como las parafinas, se obtienen compuestos de forma estable con una conductividad térmica que puede aumentar entre 10 y 50 veces, sin producir reacciones químicas entre el PCM y la matriz.

- **Dispersión de nanopartículas:**
  La incorporación de nanopartículas (por ejemplo, nano-grafito o partículas metálicas como Cu o TiO_2) en PCMs como el polietilenglicol (PEG) permite mejorar la conductividad térmica y, en algunos casos, la estabilidad térmica del sistema. Compuestos como Cu/PEG/TiO_2 han demostrado un mejor comportamiento térmico en aplicaciones de almacenamiento de energía.

Sistemas de PCM múltiple o en cascada

Otra estrategia consiste en utilizar dos o más PCMs con diferentes temperaturas de cambio de fase dentro de una misma unidad de almacenamiento térmico latente (LHTES).
Esta configuración escalonada permite:

- homogeneizar la temperatura del sistema,

- aumentar la temperatura de salida del HTF,
- acelerar la tasa global de fusión del material,
- y mejorar la eficiencia exergética del sistema de almacenamiento térmico.

2.2.3. Criterios Integrales de Selección para STCS

La selección del PCM óptimo para un STCS va más allá de la temperatura y el calor latente. Debe basarse en una evaluación multicriterio que incluya:

- Propiedades Termofísicas: Calor latente específico alto, conductividad térmica adecuada, densidad.
- Propiedades Químicas: Estabilidad a largo plazo, no corrosividad, no toxicidad, no inflamabilidad.
- Propiedades de Ciclado: Resistencia a la degradación tras miles de ciclos, sin subfusión o separación de fases significativas.
- Propiedades Económicas: Bajo costo, disponibilidad.
- Compatibilidad Sistémica: Ausencia de reacciones con materiales del contenedor o del HTF. Para aplicaciones innovadoras, se consideran materiales multifuncionales, como el Compuesto PCM de Urea/Bromuro de Amonio (UAB), que ofrece estabilidad tras 1000 ciclos y puede actuar como fertilizante, abordando aspectos de economía circular.

2.2.4. Conclusiones sobre Materiales

A partir del análisis de los distintos tipos de PCMs, sus rangos de temperatura de operación y las estrategias de mejora disponibles, para aplicaciones residenciales de baja y media temperatura (20 °C – 80 °C) se selecciona un PCM orgánico basado en parafina microencapsulada.

Las parafinas resultan adecuadas para este rango térmico debido a su estabilidad química, buena capacidad de almacenamiento de calor latente y baja corrosividad, lo que facilita su integración en sistemas domésticos como colectores solares o almacenamiento térmico para agua caliente sanitaria.

Para superar su baja conductividad térmica y evitar problemas asociados al estado líquido, se emplean dos estrategias complementarias. En primer lugar, la microencapsulación, que permite contener el PCM, evitar fugas y aumentar el área de intercambio térmico. En segundo lugar, la integración del material en una matriz de aluminio poroso, que mejora significativamente la transferencia de calor dentro del sistema.

En consecuencia, el uso de parafina microencapsulada combinada con aluminio poroso constituye una solución adecuada para sistemas de almacenamiento térmico latente a escala residencial, al mejorar la estabilidad del material y la eficiencia del intercambio térmico.

2.3 Marco Teórico: Generación Termoeléctrica con PCM

2.3.1 Fundamentos de Generación Termoeléctrica (TEG)

El principio de funcionamiento de los dispositivos termoeléctricos se basa en el aprovechamiento de gradientes térmicos para la producción de energía eléctrica.

El fenómeno principal es el Efecto Seebeck, donde se genera un potencial eléctrico proporcional a la diferencia de temperatura entre las uniones de dos materiales semiconductores (tipo p y tipo n):

$$V = \alpha \cdot \Delta T = \alpha \cdot (Th - Tc) \quad (1)$$

Donde V es el voltaje en circuito abierto, α es el coeficiente Seebeck del módulo, y Th, Tc son las temperaturas de la cara caliente y fría, respectivamente.

La eficiencia de un material para convertir calor en electricidad se cuantifica mediante la figura de mérito adimensional:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{\kappa}$$

Donde σ representa la conductividad eléctrica y κ la conductividad térmica del material.

El flujo de calor en la cara caliente del dispositivo (Qh) se describe considerando el transporte por portadores de carga, la conducción térmica y la disipación por efecto Joule:

$$Q_h = \alpha I T_h + \kappa \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R$$

Siendo I la corriente eléctrica y R la resistencia interna del módulo.

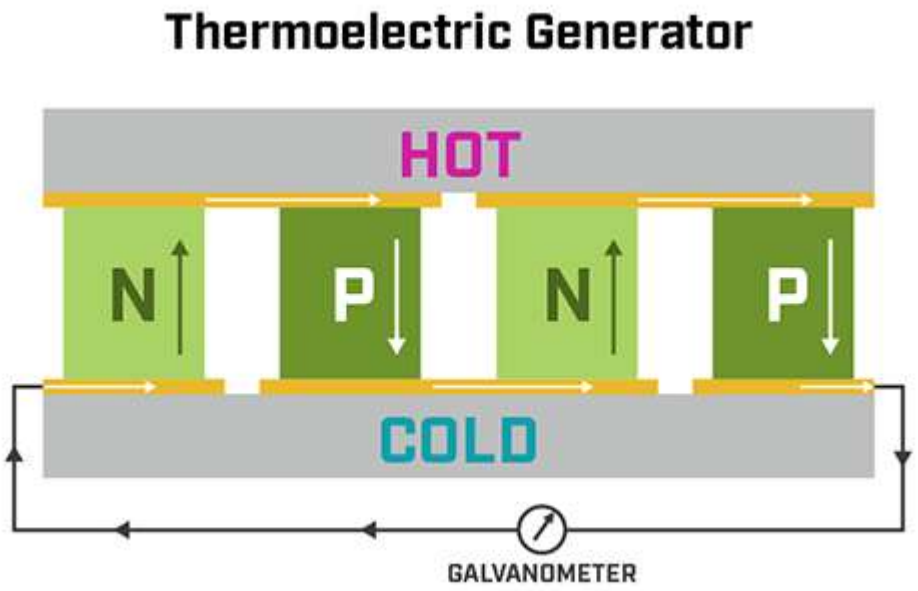


Figura 7: figura esquemática de los elementos semiconductores de una celda termogeneradora.

2.3.2 Materiales de Cambio de Fase (PCM)

La integración de un Material de Cambio de Fase permite estabilizar la temperatura de una de las caras mediante la absorción de calor latente. La energía total almacenada durante el proceso se define como:

$$Q_{PCM} = m \left[\int_{T_i}^{T_m} C_p \, dT + L + \int_{T_m}^{T_f} C_p \, dT \right]$$

Donde:

- m: Masa del PCM.
- L: Calor latente de fusión.
- Tm: Temperatura de cambio de fase.
- Cp: Capacidad calorífica específica.
- Al acoplar el PCM al lado frío del TEG, se logra mantener ΔT máximo de
- forma pasiva mientras ocurre la transición de fase, optimizando la generación
- eléctrica según la ecuación (1).

2.3.3 Potencia generada

A continuación se describe de forma detallada el balance energético en una placa absorbente que alimenta una celda termoeléctrica (TEG). Se derivan las expresiones para la temperatura de equilibrio de la placa U_{placa}, la tasa de transferencia de calor hacia la TEG $Q_{conducción}$, la tensión de circuito abierto generada por la TEG Voc y la potencia eléctrica entregable P . Se discuten además las hipótesis usadas (linealización de radiación, elección de coeficiente global de pérdidas U_{loss}) y los pasos para implementación numérica.

Se considera una placa absorbente de área *A* expuesta a radiación solar de irradiancia *G* [W m^{-2}]. La placa absorbe una fracción *α* de la radiación incidente. La placa pierde calor por convección y por radiación hacia el ambiente y transfiere calor por conducción hacia la TEG/PCM (lado frío o sumidero térmico). Variables principales:

G : irradiancia solar [W m^{-2}].

A : área de la placa [m^2].

α : absortividad de la placa (adimensional).

T_{placa} : temperatura de la cara caliente de la TEG / placa [K].

T_{amb} : temperatura ambiente [K].

T_{pcm} : temperatura en contacto con el lado frío (p. ej. PCM) [K].

h : coeficiente convectivo [W m^{-2} K^{-1}].

ε : emisividad de la placa.

σ : constante de Stefan–Boltzmann ($\sigma \approx 5{,}670374419\times10^{-8}$ W $m^{-2}K^{-4}$).

R_{th} : resistencia térmica entre placa y PCM/TEG [K W^{-1}] (o resisten- cia térmica de la unión).

S : coeficiente de Seebeck efectivo de la celda [V K^{-1}].

R_{int} : resistencia interna de la célula/paquete TEG [Ω].

R_L : resistencia de carga [Ω].

La potencia (potencia instantánea) absorbida por la placa es:

$$Q_{solar} = G.\alpha.A \quad [W].$$

En hojas de cálculo con datos por hora a veces aparece un factor 3,6 para pasar W a kJ.h^{-1} (aquí trabajamos en Watts y Kelvin).

Las pérdidas combinadas desde la placa al ambiente son:

$$Q_{\text{pérdidas}} = A\left[\, h\,(T_{\text{placa}} - T_{\text{amb}}) + \sigma\varepsilon\left(T_{\text{placa}}^4 - T_{\text{amb}}^4\right)\right]$$

La segunda parte es no lineal en T_{placa}. Para obtener una expresión manejable, se suele linealizar la radiación alrededor de una temperatura intermedia T_{film} (temperatura película radiativa), usando la aproximación de primer orden:

$$T_{\text{placa}}^4 - T_{\text{amb}}^4 \approx 4\,T_{\text{film}}^3\,(T_{\text{placa}} - T_{\text{amb}}),$$

donde típicamente se toma $T_{film} \approx \frac{T_{placa}+T_{amb}}{2}$ o el valor medio conocido. Con esto definimos un coeficiente radiativo $h_{rad} = 4\sigma\varepsilon T^3_{film}$ y el coeficiente global de pérdidas por unidad de área:

$$U_{\text{loss}} = h + h_{\text{rad}}.$$

Así la ecuación del calor de pérdida se aproxima por:

$$Q_{\text{pérdidas}} \approx A\,U_{\text{loss}}\,(T_{\text{placa}} - T_{\text{amb}}).$$

Transferencia hacia la celda (conducción)

La tasa de calor conducida desde la placa hacia la TEG/PCM, asumida proporcional a la diferencia de temperatura mediante una resistencia térmica Rth,uni (resistencia total entre placa y sumidero) es:

$$Q_{\text{conducción}} = \frac{T_{\text{placa}} - T_{\text{pcm}}}{R_{\text{th}}} \quad [\text{W}].$$

Balance de energía en la placa

En régimen estacionario (energía entrante = pérdidas + energía conducida hacia la TEG):

$$Q_{\text{solar}} = Q_{\text{pérdidas}} + Q_{\text{conducción}}.$$

Sustituyendo las expresiones linealizadas:

$$G\alpha A = A\,U_{\text{loss}}\,(T_{\text{placa}} - T_{\text{amb}}) + \frac{T_{\text{placa}} - T_{\text{pcm}}}{R_{\text{th}}}.$$

Reagrupando términos en T_{placa} se obtiene la solución directa:

$$T_{\text{placa}} = \frac{G\alpha A + U_{\text{loss}}\,A\,T_{\text{amb}} + \dfrac{1}{R_{\text{th}}}\,T_{\text{pcm}}}{U_{\text{loss}}\,A + \dfrac{1}{R_{\text{th}}}}.$$

Esta expresión es algebraicamente explícita si se acepta la linearización para radiación (i.e. U_{loss} conocido).

Como se mencionó anteriormente, la diferencia de temperatura que genera el voltaje termoeléctrico es:

$$\Delta T \;=\; T_{\text{placa}} - T_{\text{pcm}}.$$

Con ΔT y el coeficiente de Seebeck efectivo S,

$$V_{oc} \;=\; S\,\Delta T \quad [\text{V}].$$

Relación tensión-potencia de la TEG y potencia máxima

Modelo eléctrico simple (modelo de fuente de tensión con resistencia interna):

$$\text{TEG} \quad \equiv \quad V_{oc}\ (\text{fuente}) \quad \text{en serie con } R_{\text{int}}.$$

La potencia entregada a una resistencia de carga R_L es:

$$P(R_L) \;=\; \frac{V_{oc}^2\,R_L}{(R_{\text{int}} + R_L)^2}.$$

Sustituyendo:

$$P(R_L) \;=\; \frac{(S\,\Delta T)^2\,R_L}{(R_{\text{int}} + R_L)^2}.$$

La potencia máxima se obtiene cuando $R_L = R_{int}$, con lo cual:

$$P_{\text{máx}} \;=\; \frac{(S\,\Delta T)^2}{4\,R_{\text{int}}}.$$

Esto significa:

- $P_{máx}$ crece con ΔT^2: doblar la diferencia térmica cuadruplica el poten cial de potencia (todo lo demás constante).
- Un S mayor mejora V_{oc} y por ende la potencia; sin embargo R_{int} (y las pérdidas térmicas) limitan fuertemente el rendimiento práctico. La eficiencia intrínseca de

conversión eléctrica es baja en TEGs comerciales; optimizar la extracción eléctrica requiere minimizar Rint y maximizar ΔT sin aumentar excesivas pérdidas térmicas.

- El coeficiente convectivo h puede variar con velocidad del aire y orientación; en campo su valor es frecuentemente estimado entre 5 y 25$Wm^{-2}K^{-1}$.
- El valor efectivo de S y Rint debe ser medido para el paquete TEG utilizado (valores teóricos de materiales pueden no corresponder al comportamiento real del módulo).
- Efectos térmicos transitorios (cambio de estado del PCM, capacidad térmica de la placa, etc.) requieren un modelo dinámico (ecuaciones diferenciales en el tiempo) y no están cubiertos por el balance estacionario presentado.

3. Escala del Proyecto

3.1. Integración de Sistemas PCM-Colector Solar en el Ámbito Residencial

La integración de Materiales de Cambio de Fase (PCM) con colectores solares térmicos representa una estrategia de optimización tecnológica de alto potencial para aplicaciones residenciales, orientada a incrementar la autonomía, la eficiencia y la rentabilidad de los sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS). Esta sección analiza la arquitectura, beneficios y consideraciones críticas para la implementación de dichos sistemas en viviendas.



Figura 9: muestra de parafina encapsulada para colector solar.

Propiedad	Estado Sólido	Estado Líquido	Transición (Fase)
Punto de Fusión	-	-	**45°C a 70°C**
Calor Latente	-	-	**180 - 230 kJ/kg**
Densidad	~900 kg/mş	~770 kg/mş	Expansión vol.
Conductividad Térmica	~0.24 W/m·K	~0.15 W/m·K	Muy baja
Calor Específico	~2.1 kJ/kg·K	~2.4 kJ/kg·K	-
Estabilidad Química	Alta (Inerte)	Alta (Inerte)	Sin segregación
Corrosividad	Nula	Nula	Compatible

Tabla 1: propiedades de la parafina en distintas fases de estado.

Podemos observar en la tabla superior, como la energía por unidad de masa es mucho mayor en el calor latente durante la transición de fase que en los estados líquido y sólido.

3.1.2. Objetivo y Relevancia en el Contexto Residencial

El principal objetivo de esta integración es superar el desfase temporal entre la disponibilidad de la radiación solar y la demanda térmica doméstica. Un sistema solar convencional sin almacenamiento efectivo puede sufrir de sobrecalentamiento diurno y carencia nocturna. La incorporación de un PCM, con su alta densidad de almacenamiento de calor latente, permite:

- Extender la operatividad: Proveer calor útil durante horas sin sol (tardes, noches, períodos nublados).
- Nivelar la producción: Estabilizar la temperatura de salida del sistema, mejorando el confort y la protección contra sobrecalentamientos.
- Reducir el volumen de almacenamiento: Almacenar la misma energía que un tanque de agua sensible en un volumen significativamente menor, un factor clave en instalaciones residenciales con espacio limitado.
- Aumentar la fracción solar: Incrementar el porcentaje de la demanda térmica anual cubierta por energía solar, mejorando la amortización de la inversión.

3.1.3. Configuraciones Típicas de Sistema

En entornos residenciales, la integración se materializa principalmente en dos configuraciones:

Sistemas con Almacenamiento Integrado en el Colector: El PCM se encapsula e incorpora directamente en los absorbedores o en cámaras adyacentes dentro del panel solar. Esta configuración es compacta y reduce las pérdidas térmicas por distribución. Es ideal para aplicaciones de calefacción de aire (donde el aire circula a través de canales en contacto con el PCM) o para precalentamiento de agua en sistemas de bajo perfil.

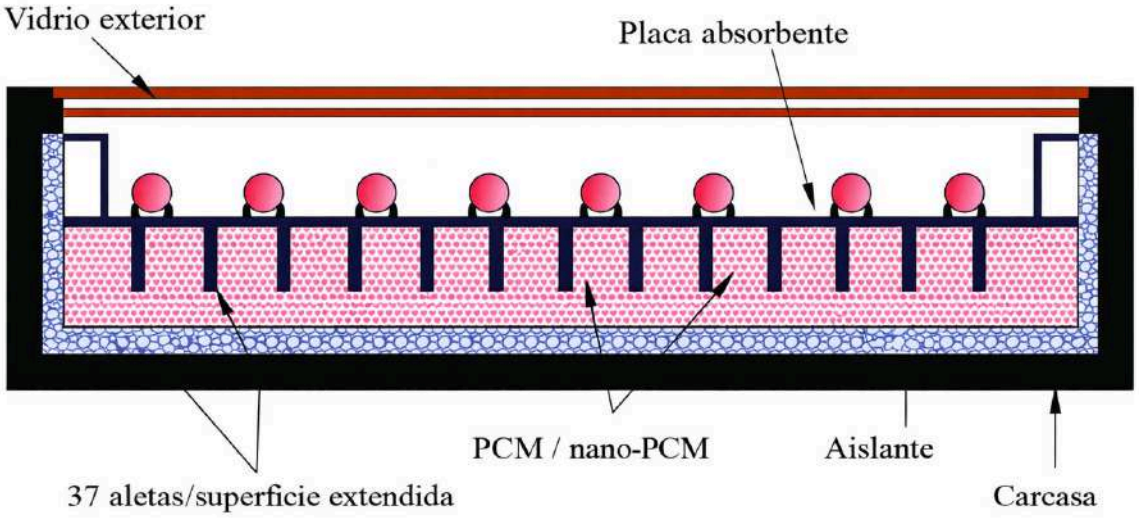


Figura 10: dibujo esquemático de colector solar con PCM integrado.

Sistemas con Unidad de Almacenamiento Externo Acoplada: El PCM se aloja en un tanque de almacenamiento especializado o en un intercambiador de calor de carcasa y tubos, ubicado entre el colector y el punto de uso (p.ej., acumulador de ACS). Esta es la configuración más común y flexible para sistemas de ACS y calefacción hidrónica, permitiendo una mayor capacidad de almacenamiento y un control más sencillo. El fluido caloportador (generalmente agua/glicol) transfiere el calor captado por el colector al módulo de PCM durante el día, y recupera ese calor durante la noche.

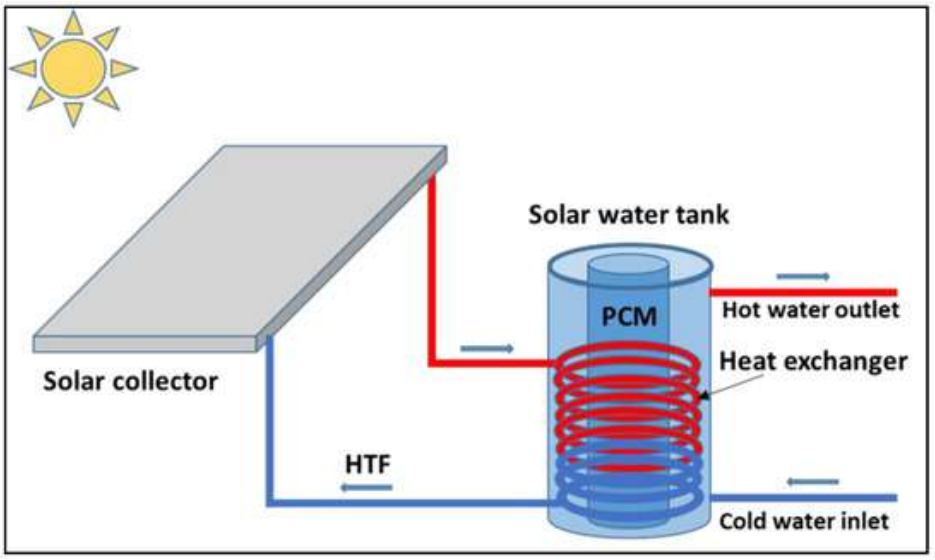


Figura 11: dibujo esquemático de colector solar con PCM externo.

3.1.4. Ejemplos de Aplicación y Sinergias

Combinación con Suelo Radiante: Un sistema solar con almacenamiento PCM puede alimentar un circuito de suelo radiante a baja temperatura (30-40°C), una combinación altamente eficiente dado el buen ajuste entre la temperatura de fusión de PCMs orgánicos (p.ej., parafinas) y el rango operativo del suelo radiante.

Rehabilitación Energética: Los módulos de PCM compactos pueden integrarse en sistemas solares térmicos para viviendas existentes con limitaciones de espacio para tanques de agua voluminosos.

"**Muros Solares" Activos**: Evolución del muro Trombe, donde un colector de aire integra PCM en su estructura, almacenando calor durante el día y liberándolo por convección natural o forzada hacia el interior de la vivienda al atardecer.

Pared con TEG: Este muro representa un sistema de fachada activa multicapa diseñado para la eficiencia energética extrema. El conjunto integra una placa absorbente exterior que capta la radiación solar, conectada a celdas termogeneradoras (TEG) que convierten el calor directamente en electricidad. Para optimizar el rendimiento, incluye una capa de material de cambio de fase (PCM) que actúa como almacenamiento térmico, estabilizando la temperatura y prolongando la generación de energía, todo respaldado por una estructura de ladrillos que aporta la inercia y resistencia final al cerramiento.

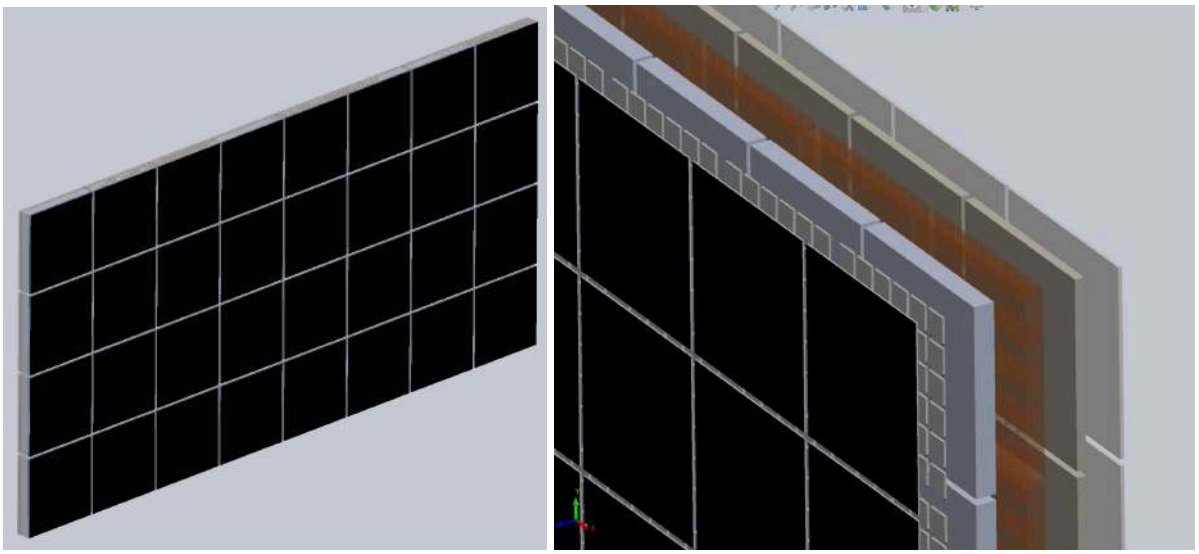


Figura 12: pared de 32 ladrillos termogeneradores con PCM.

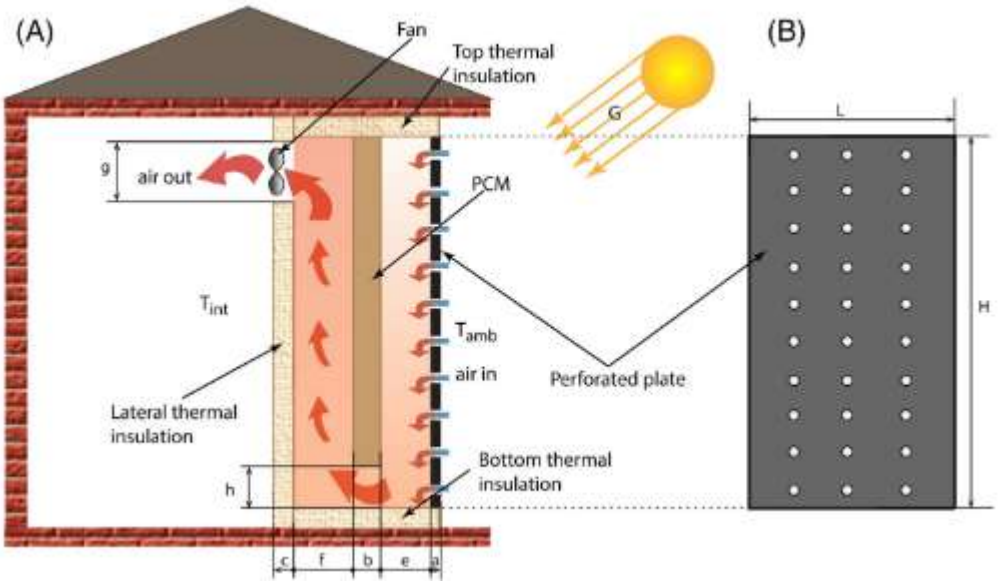


Figura 13: figura esquemática del funcionamiento del muro.

3.1.5. Consideraciones Críticas de Diseño para la Implementación Residencial

Para un despliegue exitoso y duradero, el diseño debe abordar desafíos específicos del entorno doméstico:

Selección del PCM: La temperatura de cambio de fase es el parámetro cardinal. Para ACS, se requieren PCM con punto de fusión entre 55-70°C. Para calefacción de espacios, el rango óptimo es 20-35°C. Además, debe priorizarse la seguridad (no inflamable, no tóxico) y la estabilidad cíclica a largo plazo (>5000 ciclos).

Transferencia de Calor (Principal Limitación): La baja conductividad térmica de la mayoría de los PCMs ralentiza la carga/descarga. En sistemas residenciales, donde la demanda es intermitente, es crucial incorporar mejoradores de conductividad (compuestos con grafito, metales) o diseñar intercambiadores de calor con alta área superficial (placas, tubos con aletas) para garantizar potencia térmica suficiente.

Gestión de la Congelación/Expansión: Se debe diseñar el contenedor del PCM para resistir los esfuerzos mecánicos durante la congelación y la expansión térmica sin fugas.

Viabilidad Económica: El análisis debe incluir el costo incremental del sistema PCM frente al ahorro energético esperado. Actualmente, los sistemas con PCM tienen mayor costo de capital, pero ofrecen mayor densidad energética y beneficios en confort. La optimización del diseño y la producción a escala son claves para mejorar la relación costo-eficacia.

3.1.7. Innovaciones en Sistemas de Agua Caliente Sanitaria (ACS)

La integración de PCM en calentadores solares de agua ha generado diseños eficientes y compactos, ideales para el espacio residencial:

Sistemas con Aletas: La incorporación de aletas (cilíndricas, longitudinales) dentro del contenedor de PCM aumenta drásticamente el área de intercambio. En colectores de placa plana, esto puede elevar la eficiencia media estacional y en destiladores solares, extender la producción de agua fresca más de 7 horas tras la puesta de sol.

Módulos de PCM en Tanques: Colocar cápsulas o módulos de PCM en la parte superior del tanque de almacenamiento de agua aumenta la capacidad efectiva de agua caliente y prolonga su disponibilidad sin aporte solar externo. Los sistemas de Almacenamiento Térmico Latente (LHTES) cilíndricos pueden ahorrar hasta un 75% del espacio de almacenamiento en comparación con un tanque de agua sensible equivalente.

PCM Dual y en Cascada: El uso de dos PCM con puntos de fusión diferentes (bajo y alto) en un mismo colector permite optimizar la captura de energía a lo largo de un rango más amplio de temperaturas, mejorando la eficiencia tanto en condiciones de helada como de alta temperatura. Los sistemas en cascada en tanques ofrecen un gradiente térmico más estable.

3.1.8 Diseños de Sistemas para Maximizar el Almacenamiento y la Entrega

La arquitectura del sistema es clave para un desempeño robusto en una vivienda:

Sistemas de Dos Circuitos (ECL/ELL): Separan el circuito de captación y almacenamiento (Energy-Collecting Loop - ECL, que contiene el PCM) del circuito de consumo (Energy Load Loop - ELL). Esto permite un control independiente y un almacenamiento más eficiente de la energía térmica.

Concepto de Almacenamiento Integrado en el Colector (ICS): Diseños compactos que eliminan el intercambiador de calor externo, utilizando directamente el agua o un líquido orgánico en contacto con el PCM. Un ejemplo avanzado es el Colector Solar de Tubos de Vacío con Heat Pipe y Múltiple Integrado con PCM.

Lechos Empacados Combinados: Sistemas que combinan almacenamiento sensible (piedras, agua) y latente (PCM) en un mismo lecho, acoplados a colectores de placa plana, mostrando un mejor desempeño global que los sistemas convencionales.

3.2 Viabilidad del Proyecto

En el presente capítulo se establecerán y justificarán los parámetros objetivos que determinan la viabilidad técnica y ambiental del proyecto. Partiendo de premisas fundamentales como la maximización del aprovechamiento de la radiación solar, la reducción efectiva de emisiones de CO_2 y el desarrollo de sistemas de almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase (PCM), se definirán los criterios numéricos que servirán como base para el diseño de la solución. Esta definición cuantitativa es crucial para asegurar que la propuesta no solo sea conceptualmente sólida, sino también medible, rentable y alineada con los objetivos de innovación y autonomía energética planteados.

3.2.1 Propósitos definidos

3.2.2 Zonas de alta radiación solar

Las zonas noroeste y norte de Argentina destacan por su irradiancia solar muy alta. Por ejemplo, las regiones marcadas en rojo en los mapas oficiales reciben en promedio unos 5 kWh/m²·día. Esto equivale a unos 1.800 kWh/m²·año de energía solar captable. Otras zonas intermedias alcanzan ~4,5 kWh/m²·día (≈1.600 kWh/año) o más



Figura 14: distribución de la intensidad de radiación solar en Argentina.

Estos valores son mucho mayores que el promedio mundial (~3–4 kWh/m²·día), por lo que ubicar colectores térmicos en esas regiones maximiza la captación energética.

1. **Radiación Solar por Zonas**

La irradiancia se mide típicamente en kilovatios-hora por metro cuadrado por día (kWh/m²·día). Según los mapas de recurso solar, las zonas se pueden categorizar así:

Zona/Color en el Mapa	Promedio Diario	Energía Anual Aproximada
Zona de Muy Alta Radiación (Rojo: NOA, Cuyo)	~5.0 kWh/m²·día	~1,825 kWh/m²·año

Zona de Alta Radiación (Naranja)	~4.5 kWh/m²·día	~1,643 kWh/m²·año
Zona de Radiación Intermedia (Amarillo)	~4.0 kWh/m²·día	~1,460 kWh/m²·año

Tabla 2: distribución de la radiación solar por zonas.

Cálculo de la conversión diaria a anual:

- 5.0 kWh/m²·día * 365 días = 1,825 kWh/m²·año

Esta Irradiancia Global Horizontal (GHI) en las provincias de la Puna y los Andes áridos puede alcanzar valores excepcionales, entre 2,400 y 2,700 kWh/m² por año, situándose entre las más altas del mundo.

2. Perspectiva Numérica: Comparación con el Promedio Mundial

Para entender la magnitud de este recurso, es crucial compararlo:

- Promedio Mundial: ~3.0 - 4.0 kWh/m²·día
- Alta Radiación en Argentina: ~5.0 kWh/m²·día

Esto significa que las mejores zonas de Argentina reciben aproximadamente un 25% a 66% más de energía solar que muchas otras regiones del mundo. Por ejemplo, países líderes en energía solar como Alemania tienen un promedio de solo ~3.0 kWh/m²·día.

3.2.3 Rentabilidad de instalaciones solares térmicas

Los ahorros operativos hacen a estas instalaciones muy rentables. Los equipos instalados en 2017 (*~35.141 m²* de colectores) generaron *"un ahorro de combustible equivalente a más de 4 millones de m³ de gas natural"*. Esto, traducido a dinero, representa decenas de millones de dólares evitados anualmente en gas para agua caliente. Además, se estiman reducciones de costo del orden del **80–90%** en el consumo energético doméstico de agua caliente (pues se reemplaza casi totalmente el gas o electricidad por sol). Ese alto ahorro y los subsidios o créditos disponibles hacen que el periodo de retorno sea relativamente corto, aumentando la rentabilidad de la inversión.

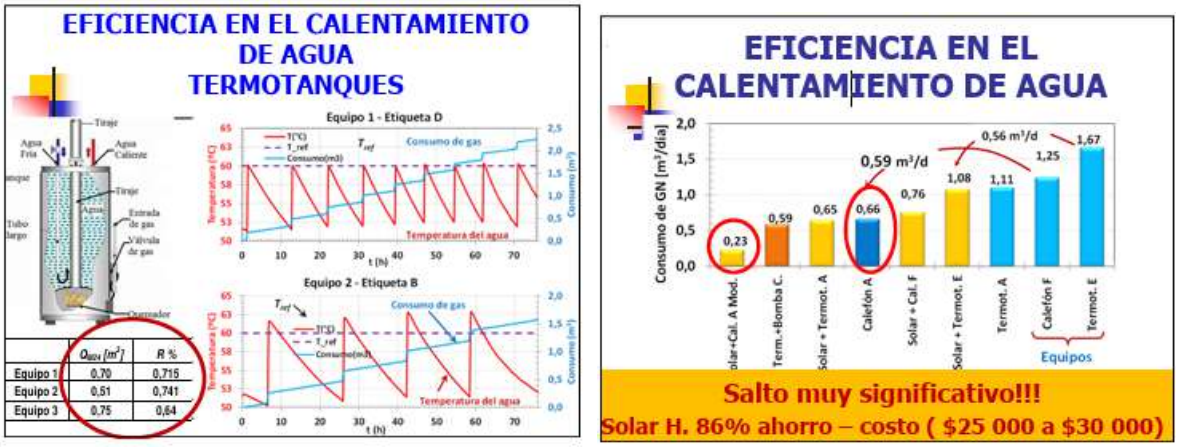


Figura 15: eficiencia en el calentamiento de agua.

3.2.4 Impulso a la investigación e innovación

El desarrollo de estos sistemas también potencia la I+D local. En Argentina existen grupos universitarios y tecnológicos dedicados al almacenamiento térmico de energía. Por ejemplo, se han identificado capacidades en la Universidad de Salta, La Plata y otras instituciones para trabajar con calor sensible, PCM y TES estacionales. Reconocer y financiar estos grupos (p.ej. vía FONCyT) impulsa nuevas soluciones térmicas. De hecho, la propia necesidad de optimizar la eficiencia TES –"necesita investigación y desarrollo para lograr alta eficiencia" motiva proyectos innovadores. Así, este proyecto serviría de plataforma para ensayar materiales avanzados o diseños óptimos de almacenamiento, adelantando la frontera tecnológica en energía limpia.

4. Desafíos y Soluciones

El desarrollo de sistemas térmicos eficientes para el ámbito residencial enfrenta desafíos tecnológicos significativos: el desfase entre generación solar y demanda, las limitaciones de espacio para almacenamiento, la necesidad de maximizar la eficiencia de captación y la búsqueda de soluciones económicamente viables. A continuación, se presentan tres soluciones tecnológicas que abordan estos desafíos, todas ellas incorporando materiales de cambio de fase (PCM) como elemento central de almacenamiento térmico.

4.1 Posibles Soluciones

4.1.1 Solución 1: Sistema Híbrido Solar-Eólico con Almacenamiento PCM

Esta solución propone un sistema de aprovechamiento multi-fuente donde la energía excedentaria, tanto de origen solar fotovoltaico como eólico, se convierte en energía térmica mediante resistencias eléctricas. Este calor se almacena en un banco de materiales de cambio de fase (PCM) de alta densidad energética, seleccionado con temperatura de fusión adecuada para aplicaciones de calefacción o ACS. El sistema se completa con un intercambiador de calor que permite extraer el calor útil para consumo doméstico, ya sea para agua caliente sanitaria o para alimentar circuitos de suelo radiante. Paralelamente, una pared orientada al norte equipada con celdas termogeneradoras (TEG) aprovecha la radiación solar incidente para generar electricidad mediante efecto Seebeck, complementando la generación del sistema eólico.

Ventajas: Aprovechamiento de excedentes renovables de múltiples fuentes, diversificación de la generación energética, integración de generación termoeléctrica en fachada.

Desafíos: Complejidad del sistema de control por la multiplicidad de fuentes, necesidad de espacio para aerogenerador, mayor costo de capital por la integración de múltiples tecnologías.



4.1.2 Solución 2: Colector Solar Térmico con Almacenamiento Integrado PCM y Geometrías de Mejora de Transferencia, Complementado con Pared TEG

Esta solución se basa en colectores solares térmicos con almacenamiento de calor latente mediante PCM, diseñados específicamente para maximizar la transferencia térmica y la compacidad del sistema, tomando como referencia los desarrollos más avanzados en integración PCM-colector. Se implementa un concepto de almacenamiento integrado en el colector (ICS) , eliminando la necesidad de intercambiadores externos y reduciendo pérdidas por distribución. Para superar la limitación crítica de la baja conductividad térmica del PCM, se incorporan sistemas con aletas (cilíndricas o longitudinales) dentro de los contenedores de PCM, aumentando drásticamente el área de intercambio y garantizando potencias de carga/descarga suficientes para la demanda residencial intermitente. El sistema se acopla eficientemente a aplicaciones de baja temperatura como suelo radiante o a sistemas de ACS mediante módulos PCM en la parte superior del tanque de almacenamiento, logrando una extensión significativa de la operatividad durante horas sin sol y una reducción notable del volumen de almacenamiento frente a sistemas de agua sensible.

De manera complementaria y totalmente independiente, la vivienda incorpora una pared con termogeneradores (TEG) en su fachada orientada al norte. Esta pared, conceptualizada como un sistema de fachada activa multicapa, integra una placa absorbente exterior que capta la radiación solar, conectada a celdas TEG que convierten el calor directamente en electricidad. Para optimizar su rendimiento, incluye una capa de PCM que actúa como almacenamiento térmico, estabilizando la temperatura y prolongando la generación de energía durante la noche, todo respaldado por una estructura de ladrillos que aporta inercia térmica y resistencia al cerramiento. Esta pared genera electricidad para consumos domésticos de baja potencia (iluminación, electrónica) sin interferir con el sistema de colectores solares térmicos dedicado a ACS y calefacción.

Ventajas:

- **Sistema de colectores**: Alta compacidad (ideal para espacio residencial limitado), excelente transferencia de calor gracias a geometrías optimizadas, simplicidad del circuito al integrar almacenamiento en el colector, madurez tecnológica de los componentes base.

- **Sistema de pared TEG**: Generación eléctrica directa aprovechando la radiación incidente en fachada, almacenamiento térmico integrado que prolonga la generación, independencia operativa respecto al sistema térmico principal, aporte a la eficiencia energética global sin consumir espacio adicional.

Desafíos: Gestión de la expansión del PCM en contenedores sellados, necesidad de seleccionar PCM con alta estabilidad cíclica para ambos sistemas, eficiencia moderada de las celdas TEG.



4.1.3 Solución 3: Paneles Fotovoltaico-Térmicos (PVT) con Almacenamiento Híbrido PCM-Baterías

Esta solución integra paneles fotovoltaicos-térmicos (PVT) que capturan simultáneamente electricidad y calor del sol. El calor extraído por el circuito de refrigeración de los paneles se almacena en un depósito de PCM, mejorando el rendimiento eléctrico de las celdas al mantenerlas a menor temperatura. La electricidad generada se almacena en baterías convencionales, mientras que el calor acumulado en el PCM se utiliza directamente para ACS o calefacción, o bien como respaldo para el sistema térmico convencional. El sistema se completa con un intercambiador de calor para transferir eficientemente la energía del PCM al circuito de consumo. Adicionalmente, podría complementarse con una pared TEG similar a la descrita en la Solución 2 para maximizar la generación eléctrica en fachada.

Ventajas: Generación simultánea de electricidad y calor en un mismo equipo, mejora de la eficiencia fotovoltaica por refrigeración, alta resiliencia energética al contar con dos formas de almacenamiento.

Desafíos: Mayor complejidad de integración y control, costo elevado por combinar tecnologías PVT, PCM y baterías, necesidad de gestionar dos sistemas de almacenamiento diferentes, menor densidad energética volumétrica comparada con soluciones puramente térmicas con PCM.



4.2 Justificación de la Selección: Superioridad de la Solución 2

Una vez analizadas las tres alternativas tecnológicas, se establece que la Solución 2 (Colector Solar Térmico con Almacenamiento Integrado PCM complementado con Pared TEG) constituye la opción óptima para el contexto residencial definido en la Sección 3. Esta superioridad se fundamenta en los siguientes criterios técnicos, económicos y operativos:

1. Máxima Adecuación al Perfil de Demanda Residencial:

La Solución 2 está específicamente diseñada para superar el desfase temporal entre la disponibilidad solar y la demanda doméstica, que es el objetivo principal planteado en la Sección 3.1.2. Mientras que la Solución 1 introduce un vector eólico que complejiza la gestión sin abordar directamente el núcleo del problema térmico, y la Solución 3 desvía recursos hacia la generación eléctrica fotovoltaica con almacenamiento electroquímico, la Solución 2 se enfoca en optimizar el almacenamiento de calor latente para proveer ACS y calefacción precisamente cuando se necesitan: durante la noche, tardes o períodos nublados. Los sistemas con aletas garantizan la potencia térmica suficiente para responder a demandas intermitentes, un aspecto crítico que la baja conductividad natural del PCM podría comprometer en diseños menos refinados.

2. Separación Clara de Funciones y Optimización por Tecnología:

La Solución 2 presenta la ventaja estratégica de separar funcionalmente la generación térmica (colectores con PCM para ACS/calefacción) de la generación eléctrica (pared TEG para consumos menores). Esta separación permite optimizar cada tecnología para su propósito específico:

Los colectores trabajan en rangos de temperatura óptimos para PCM dedicados a aplicaciones térmicas residenciales.

La pared TEG aprovecha una superficie (la fachada) que de otro modo estaría subutilizada, generando electricidad sin competir por espacio con los colectores.

En cambio, la Solución 1 mezcla fuentes sin una clara optimización por vectores, y la Solución 3 fuerza al panel PVT a un compromiso que puede suboptimizar tanto la generación térmica como la eléctrica.

3. Compacidad y Optimización del Espacio:

Tal como se destacó en la Sección 3.1.2, la reducción del volumen de almacenamiento es un factor clave en instalaciones residenciales con espacio limitado. La Solución 2, mediante el concepto ICS y el uso de PCM de alta densidad energética, permite almacenar la misma energía que un tanque de agua sensible en un volumen significativamente menor. Las Soluciones 1 y 3 requieren equipamiento adicional (baterías, aerogeneradores, sistemas de conversión) que incrementan el espacio necesario y complican la integración arquitectónica. La pared TEG, por su parte, no consume espacio interior ni exterior adicional, ya que se integra en la propia envolvente de la vivienda.

4. Simplicidad y Madurez Tecnológica:

La Solución 2 se basa en la evolución de tecnologías maduras (colectores solares térmicos de placa plana o tubos de vacío) mejoradas mediante la incorporación estratégica de PCM y geometrías de mejora de transferencia (aletas). La pared TEG, aunque innovadora, se integra como un sistema pasivo en fachada sin requerir mantenimiento complejo. Esta aproximación presenta menores riesgos tecnológicos que las Soluciones 1 y 3, que requieren la integración de múltiples sistemas con distintos grados de madurez y acoplamientos complejos. La gestión independiente de los dos vectores energéticos (calor desde colectores, electricidad desde pared) simplifica el control, la operación y el mantenimiento para el usuario residencial.

5. Relación Costo-Eficacia Superior:

Aunque los sistemas con PCM tienen un mayor costo de capital inicial que los sistemas solares convencionales (Sección 3.1.5), la Solución 2 optimiza esta inversión al:

- Maximizar la fracción solar anual (Sección 3.1.2), acelerando la amortización.
- Eliminar componentes costosos presentes en otras soluciones: no requiere baterías electroquímicas (Solución 3), ni aerogeneradores domésticos con su obra civil asociada (Solución 1), ni sistemas de conversión eléctrica-calor con sus pérdidas asociadas.
- Aprovechar la pared TEG como un sistema de generación eléctrica de bajo mantenimiento que no requiere infraestructura adicional.

6. Sinergias Comprobadas con Aplicaciones Residenciales:

La Solución 2 presenta sinergias naturales con tecnologías de alta eficiencia como el suelo radiante (Sección 3.1.4), cuyo rango operativo se alinea perfectamente con la temperatura de fusión de PCM orgánicos. Además, su aplicabilidad en rehabilitación energética de viviendas existentes (donde el espacio para tanques voluminosos es limitado) la posiciona como una solución versátil y adaptable al parque construido, a diferencia de las Soluciones 1 y 3 que requieren instalaciones de mayor complejidad y espacio. La pared TEG, por su parte, puede implementarse incluso en rehabilitaciones como mejora de la envolvente con generación asociada.

Por todas estas razones, la Solución 2 representa la alternativa tecnológica que mejor equilibra eficiencia energética, viabilidad económica, adaptabilidad al entorno residencial y potencial de innovación, constituyéndose como la opción seleccionada para el desarrollo del proyecto.

5. Solución Final (imagenes)

Luego de todo el estudio realizado, se optó por desarrollar la solución número 2, ya que, tras analizar todas las alternativas, se destacó como la opción más viable.

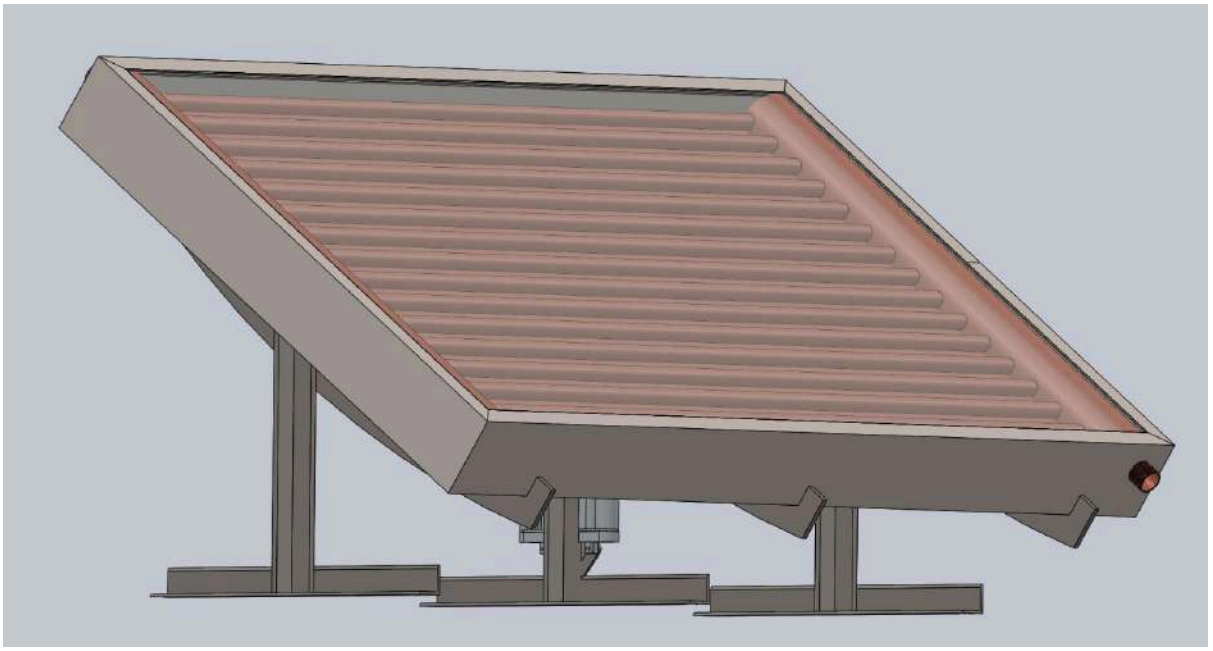


Figura 16: colector solar diseñado en SolidWorks.

5.1 Justificación Técnica de las Decisiones de Diseño

A continuación, se detallan y justifican las decisiones técnicas adoptadas en nuestra solución final, con el objetivo de maximizar la eficiencia térmica, la compactabilidad del sistema y la estabilidad operativa.

5.1.1 Configuración del Colector: Tubos Paralelos vs. Serpentina

Se optó por una configuración de tubos paralelos en lugar de un serpentín continuo basándose en criterios de eficiencia hidráulica y térmica. La elección se justifica por los siguientes motivos:

- **Menor Pérdida de Carga y Mejor Distribución del Flujo:** En un diseño de serpentina, el fluido recorre un camino largo y único, lo que incrementa significativamente la caída de presión y requiere bombas de mayor potencia. La configuración en paralelo divide el flujo total entre múltiples tubos, reduciendo la

velocidad del fluido en cada uno y, por ende, la pérdida de carga. Esto permite un funcionamiento más eficiente desde el punto de vista energético .

- **Mayor Eficiencia Térmica:** Al circular el fluido por múltiples canales, se maximiza el área de superficie en contacto con la placa absorbedora. Esto permite una transferencia de calor más uniforme y eficiente. Los estudios comparativos demuestran que las configuraciones en parrilla (paralelo) pueden alcanzar rendimientos superiores (alrededor del 50%) en comparación con las configuraciones mixtas o de serpentín, debido a una mejor velocidad y distribución del fluido caloportador . La elección del tipo de configuración es crucial y debe alinearse con las condiciones de flujo de trabajo para optimizar el rendimiento térmico global .



Figura 17: colector solar vista superior en SolidWorks.

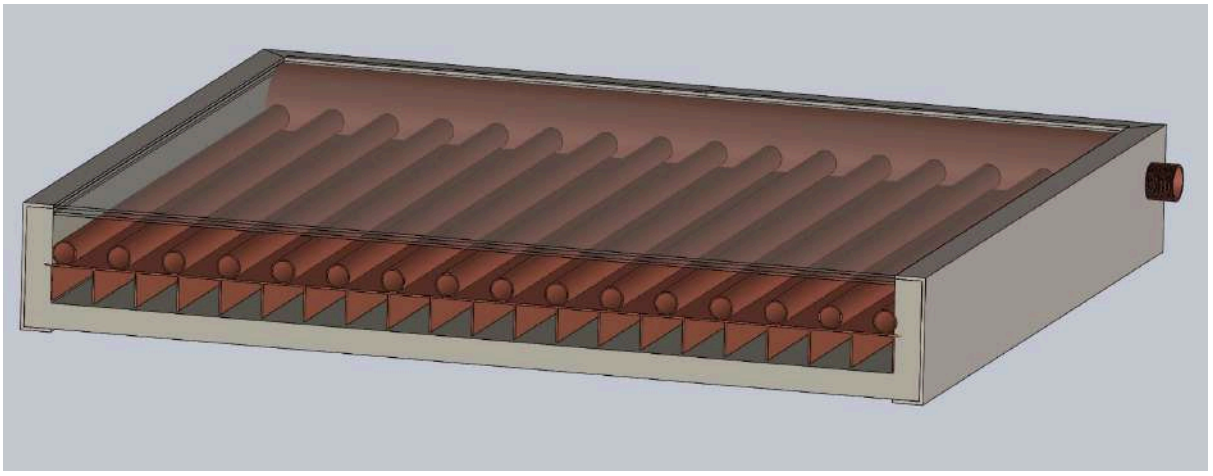


Figura 18: colector solar vista en corte en SolidWorks.

En la figura 18 se puede apreciar los tubos junto con la placa absorbente y las aletas de disipación, las cuales contienen el PCM y el aluminio poroso.

5.1.2. Integración de Aluminio Poroso

La decisión de incorporar aluminio poroso en el diseño responde a la necesidad de potenciar la transferencia de calor en el sistema de almacenamiento con Material de Cambio de Fase (PCM). Aunque los PCMs destacan por su alta densidad de almacenamiento energético, su principal limitación es la baja conductividad térmica.

- **Mejora de la Conductividad Térmica Efectiva:** La estructura de aluminio poroso actúa como una matriz de alta conductividad dentro del PCM. Al estar el PCM contenido en los poros del metal, se crea una red tridimensional que conduce el calor de manera mucho más rápida y eficiente que el PCM por sí solo. Esto acelera los procesos de carga (fusión) y descarga (solidificación) del material.
- **Aumento de la Superficie de Transferencia**: La estructura porosa del aluminio ofrece una superficie de contacto extensa con el PCM. Esta geometría intrincada facilita una distribución más homogénea del calor dentro del volumen de almacenamiento, eliminando puntos calientes y asegurando que todo el material participe activamente en el intercambio energético.
- **Compactibilidad y Reducción de Pérdidas**: Esta solución es coherente con nuestro enfoque de almacenamiento integrado. Al mejorar la transferencia de calor in-situ, garantizamos que la energía captada por el colector se almacene y esté disponible de forma rápida y eficiente, maximizando el rendimiento del sistema compacto.

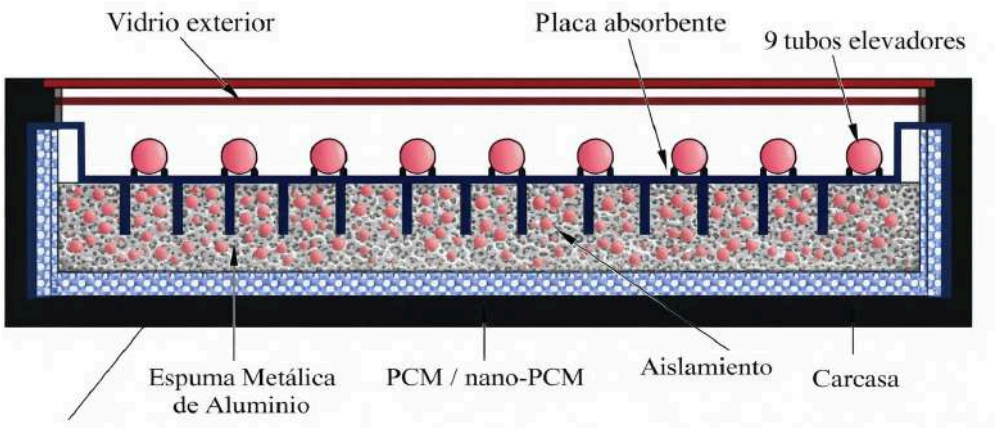


Figura 19: figura esquemática de corte transversal del colector solar.

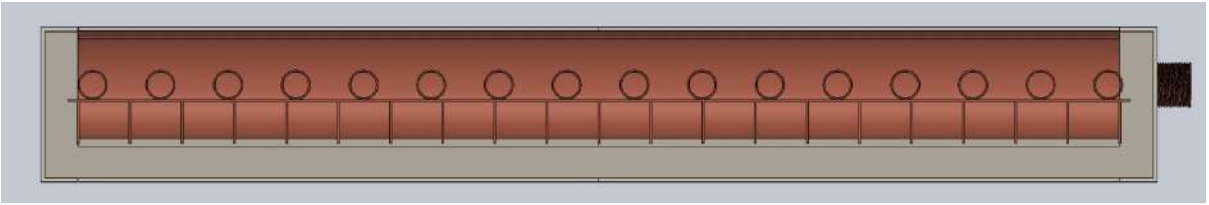


Figura 20: colector solar vista en corte transversal en SolidWorks.

5.2 Solar Tracker

Un solar tracker o seguidor solar es un sistema electromecánico diseñado para orientar automáticamente un colector solar de manera que mantenga la máxima incidencia posible de radiación solar a lo largo del día. En el caso de los colectores solares térmicos, su función principal es optimizar la captación de energía térmica aumentando la temperatura del fluido de trabajo y el rendimiento global del sistema. A diferencia de las estructuras fijas, que mantienen una inclinación constante determinada por la latitud del lugar, el seguidor solar ajusta continuamente la posición del colector en función de la trayectoria aparente del Sol, ya sea mediante algoritmos astronómicos preprogramados, sensores de radiación o sistemas combinados de control.

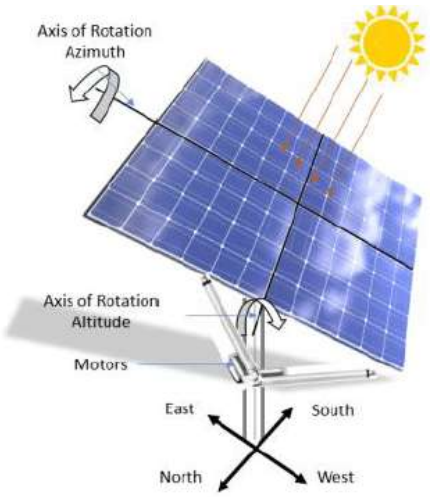


Figura 21: figura esquemática de un solar tracker con paneles fotovoltaicos.

Desde el punto de vista mecánico, el sistema está compuesto por una estructura móvil, actuadores eléctricos o hidráulicos, un sistema de transmisión (engranajes, tornillos sin fin o cremalleras), sensores de posición y una unidad de control que regula el movimiento. Existen configuraciones de un eje, que permiten el movimiento Este–Oeste y presentan un incremento de captación energética del orden del 15–25% respecto a sistemas fijos, y configuraciones de dos ejes, que incorporan movimiento adicional en elevación, logrando mantener el colector prácticamente perpendicular a los rayos solares durante todo el año y alcanzando incrementos de rendimiento de hasta 30–40%. Esta última configuración es especialmente relevante en colectores de concentración, donde pequeños errores angulares pueden generar pérdidas significativas de eficiencia.

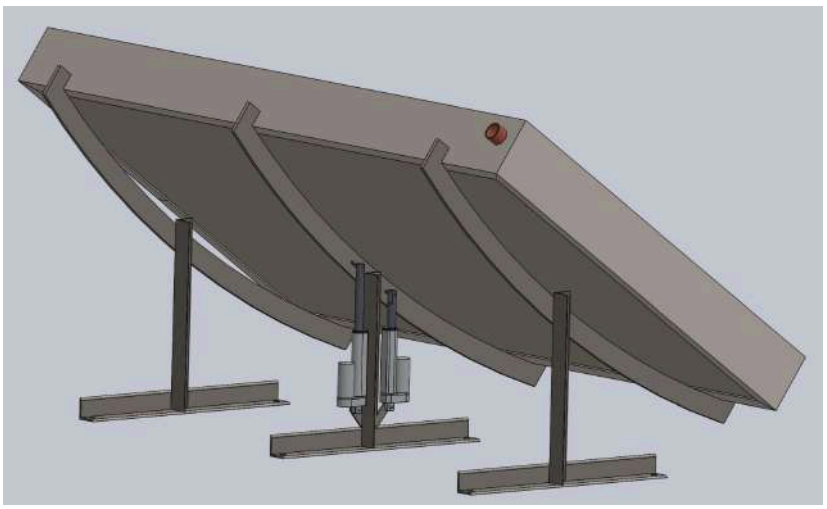


Figura 22: solar tracker acoplado al colector.

En términos de diseño, es fundamental considerar las cargas estructurales variables, especialmente las producidas por el viento, el dimensionamiento adecuado de los actuadores en función del par requerido, el consumo energético del sistema de seguimiento y su impacto en el balance energético global. Si bien el uso de un solar tracker implica un mayor costo inicial y mayores requerimientos de mantenimiento en comparación con un sistema fijo, su implementación puede justificarse cuando se busca maximizar la producción térmica, reducir la superficie instalada o alcanzar mayores niveles de temperatura en aplicaciones industriales o de generación de energía.

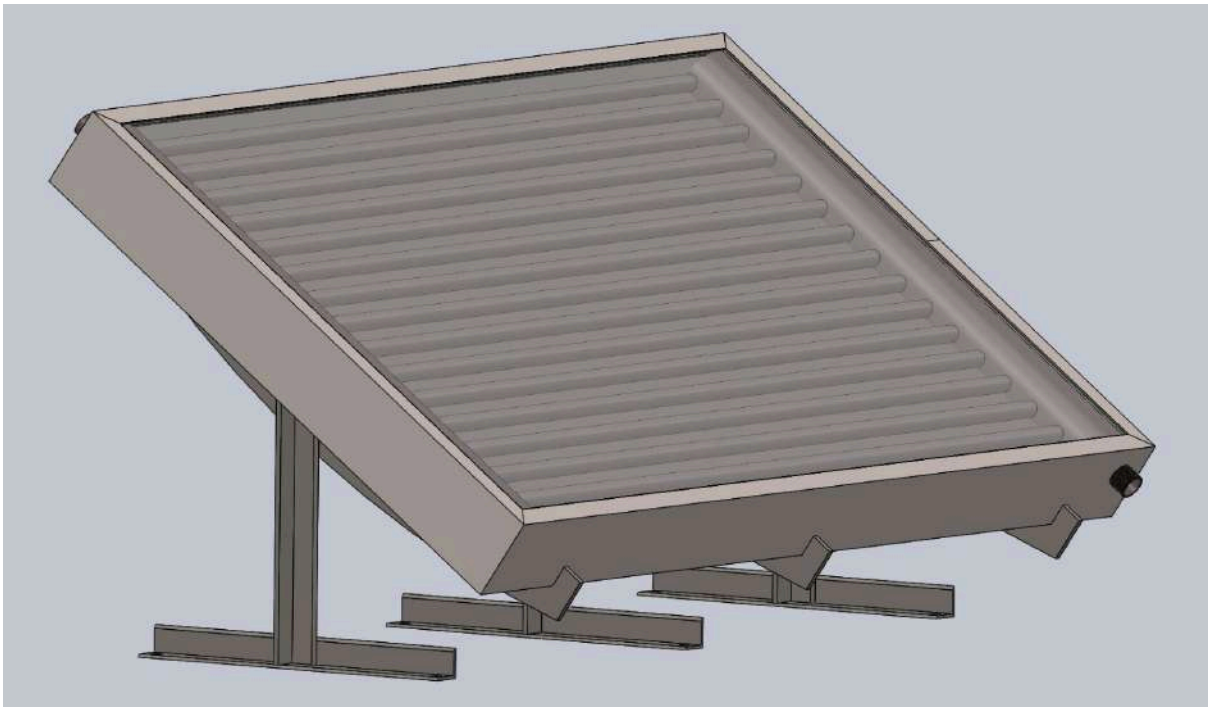


Figura 23: colector solar con solar tracker y pintura selectiva en placa absorbente.

5.3 Integración Celdas TEG con Materiales de Cambio de Fase

El sistema constructivo analizado está compuesto por una secuencia de capas funcionales diseñadas para captar, transformar, almacenar y aislar la energía térmica proveniente de la radiación solar. En primer lugar, la placa exterior captadora, expuesta directamente al Sol, está fabricada en aluminio con recubrimiento selectivo, lo que le permite alcanzar altas temperaturas al maximizar la absorción de radiación solar y minimizar las pérdidas por reflexión. Esta elevación de temperatura constituye la fuente térmica primaria del sistema.

Inmediatamente detrás se ubican las celdas Peltier (TEG, generadores termoeléctricos), que requieren un gradiente de temperatura para funcionar. Estas celdas aprovechan el calor transmitido desde la placa exterior para generar energía eléctrica mediante el efecto Seebeck, siempre que exista una diferencia térmica entre su cara caliente y su cara fría.

A continuación, se dispone un bloque de material de cambio de fase (PCM), cuya función es absorber el calor que atraviesa las celdas termoeléctricas. El PCM almacena energía térmica durante su proceso de fusión, manteniéndose aproximadamente a temperatura constante mientras cambia de fase. Esto permite estabilizar la temperatura en la cara fría de las celdas, favoreciendo un gradiente térmico sostenido y mejorando la eficiencia del sistema.

Posteriormente, se incorpora una capa de aislamiento térmico, generalmente compuesta por poliuretano o lana mineral, cuya función es impedir que el calor acumulado en el PCM se transfiera hacia el interior de la vivienda. De esta manera, se minimizan las pérdidas térmicas no deseadas y se protege el confort térmico del ambiente interior.

Finalmente, la pared interior o panel de acabado delimita el espacio habitable. Esta capa actúa como terminación constructiva y como última barrera entre el sistema energético integrado en el muro y la habitación, asegurando condiciones adecuadas de habitabilidad y seguridad térmica.

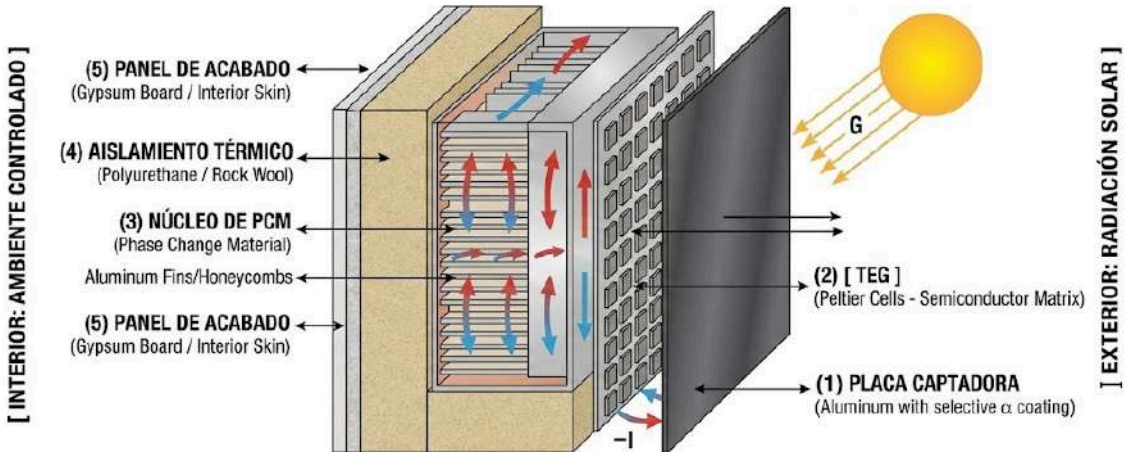


Figura 24: imagen esquemática hecha por inteligencia artificial.

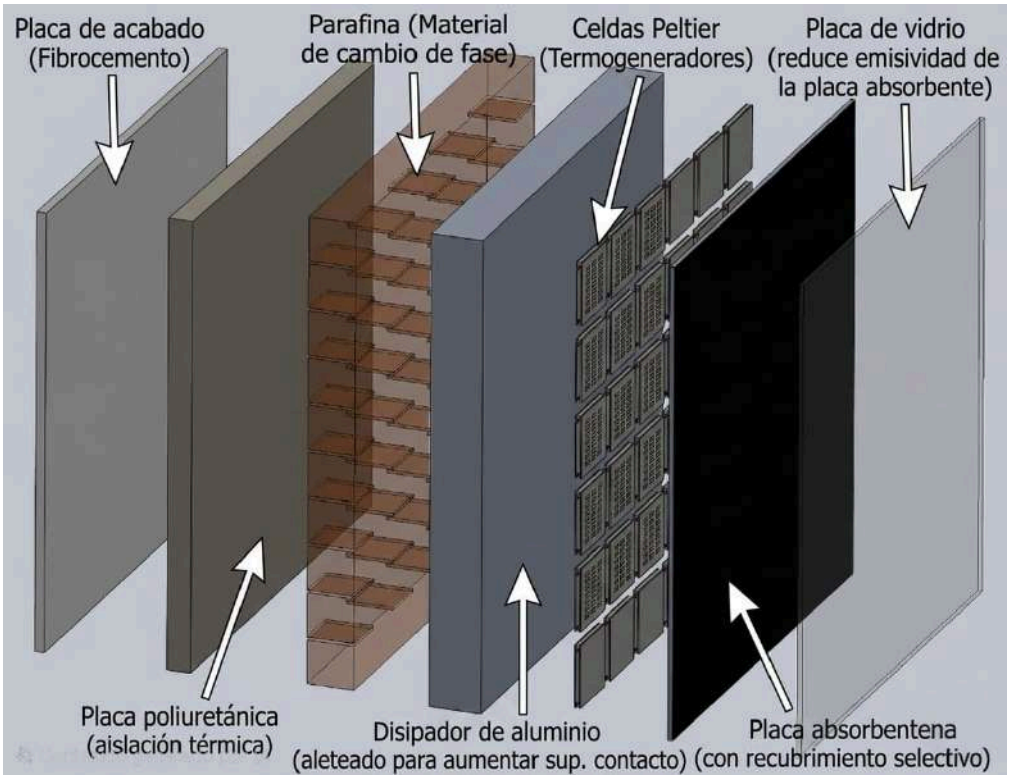


Figura 25: vista explosionada del ladrillo colector con PCM en SolidWorks.

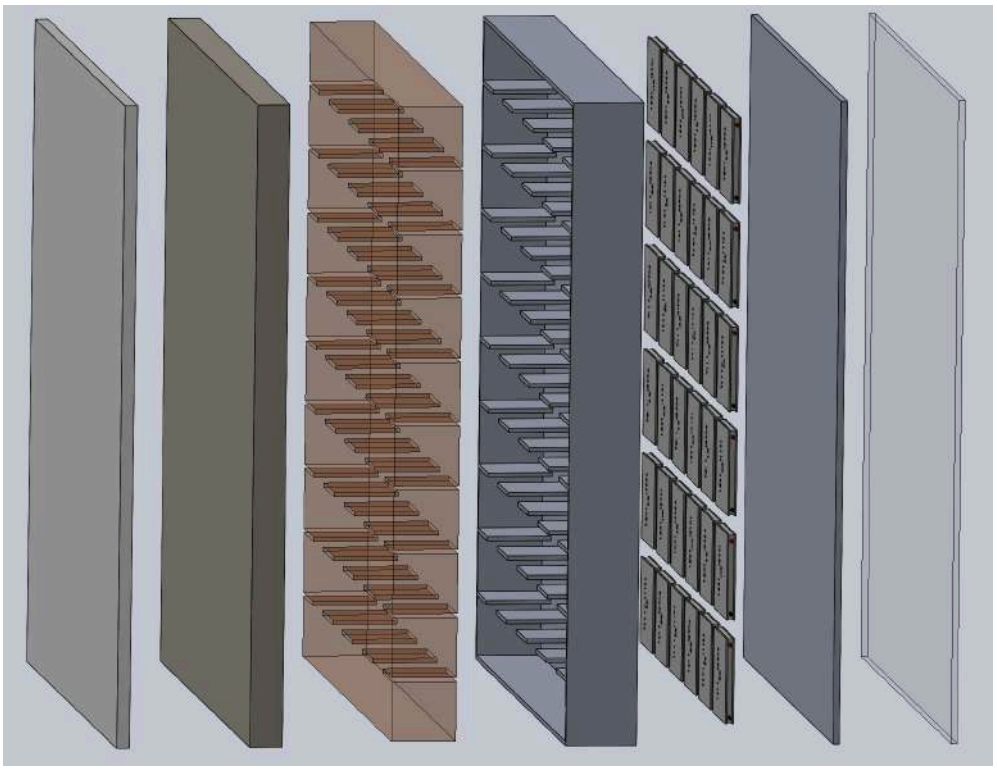


Figura 26: vista explosionada del ladrillo colector con PCM en SolidWorks.

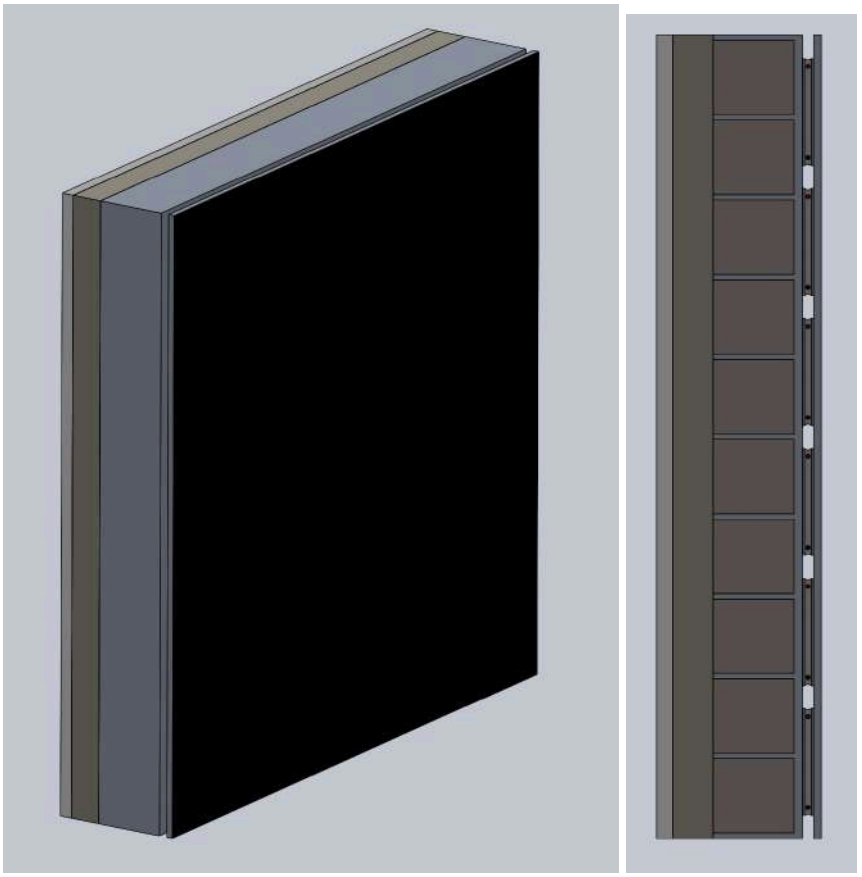


Figura 27: vista isométrica a la izquierda y en corte a la derecha del ladrillo donde se puede observar donde estaría almacenada la parafina.

5.4 Justificación Cálculos

5.4.1 Colector Solar

Las tablas presentadas muestran los parámetros de funcionamiento del colector solar térmico con material de cambio de fase (PCM) a lo largo de un día completo de operación. En la segunda columna se observa la irradiancia solar incidente expresada en W/m^2, cuyo valor aumenta progresivamente desde las primeras horas de la mañana hasta alcanzar su máximo alrededor del mediodía, para luego disminuir hacia la tarde.

Área del colector (m2)	1,6	**Masa de PCM (kg)**	80	**PCM (Parafina)**	**Volumen Colector m3**	0,1
Espesor del PCM (m)	0,15	**Capacidad total (kJ)**	16000			
Densidad de la sal (kg/m3)	800	**Autonomía nocturna (h)**	19,13875598			
Calor latente (kJ/kg)	200					
Temp. de fusión (°C)	60					
Caudal de agua (m3/min)	0,005	(teniendo en cuenta una casa pormedio donde el flujo volumétrico son 5L/min)				
Temp. entrada/ambiente (°C)	20	**Temp. salida agua (°C)**	40	Calor especifio del agua (kJ/kg.°C)	4,187	
Pérdidas por hora (kJ)	0					
Demanda Termica (Kj/h)	25080	(con una energia acumulada 10.000kJ en el PCM, se podria tener una canilla con agua caliete a 40°C durante 24 minutos)				

Tabla 3: tabla de variables con valores iniciales y condiciones de borde para la realización de hoja de cálculo.

El colector considerado posee un área de captación de 1,6 m^2 y utiliza parafina como material de cambio de fase, con una masa total aproximada de 80 kg. Este material presenta un calor latente de fusión del orden de 200kJ/kg y una temperatura de cambio de fase cercana a 60°C. Gracias a estas propiedades termodinámicas, el PCM puede almacenar una cantidad significativa de energía térmica durante el período de mayor irradiación solar y liberarla posteriormente cuando la demanda de agua caliente lo requiera.

La energía solar captada por el colector se calcula a partir de la irradiancia solar incidente y del área efectiva de captación del sistema. Durante las horas de mayor radiación solar, el flujo energético disponible permite elevar la temperatura del sistema y transferir calor hacia el PCM. Inicialmente, el material aumenta su temperatura en estado sólido; sin embargo, una vez alcanzada la temperatura de fusión, comienza el proceso de cambio de fase, durante el cual el material absorbe grandes cantidades de energía en forma de calor latente sin experimentar variaciones significativas de temperatura. Este mecanismo resulta particularmente eficiente para el almacenamiento térmico, ya que permite acumular energía de forma estable y liberarla de manera gradual.

Hora	Irradiación Solar (W/m2)	Energía captada (kJ/h)	Energía acumulada (kJ)	SOC (estado de carga PCM)	Temp. salida (°C)	Energia Demandada kJj)	Factor de uso
1	0	0	6080	38,00%	40	0	0
2	0	0	6080	38,00%	40	0	0
3	0	0	6080	38,00%	40	0	0
4	0	0	6080	38,00%	40	0	0
5	0	0	6080	38,00%	40	0	0
6	0	0	6080	38,00%	40	0	0
7	120	414,72	224,72	1,40%	40	6270	0,25
8	350	1209,6	1434,32	8,96%	40	0	0
9	580	2004,48	3438,8	21,49%	40	0	0
10	780	2695,68	6134,48	38,34%	40	0	0
11	920	3179,52	9314	58,21%	40	0	0
12	1020	3525,12	6569,12	41,06%	40	6270	0,25
13	1100	3801,6	10370,72	64,82%	40	0	0
14	1050	3628,8	13999,52	87,50%	40	0	0
15	950	3283,2	14774,72	92,34%	40	2508	0,1
16	800	2764,8	15031,52	93,95%	40	2508	0,1
17	600	2073,6	14597,12	91,23%	40	2508	0,1
18	380	1313,28	13402,4	83,77%	40	2508	0,1
19	150	518,4	11412,8	71,33%	40	2508	0,1
20	0	0	11412,8	71,33%	40	0	0
21	0	0	6396,8	39,98%	40	5016	0,2
22	0	0	6396,8	39,98%	40	0	0
23	0	0	6396,8	39,98%	40	0	0
24	0	0	6396,8	39,98%	40	0	0

Tabla 4: hoja de cálculo obtenida para la época de verano.

La energía acumulada en el PCM se representa en la tabla mediante el parámetro de energía almacenada y el estado de carga del sistema (SOC, State of Charge). Este indicador permite evaluar qué fracción de la capacidad total de almacenamiento térmico se encuentra disponible en cada instante del día. Durante las horas de mayor irradiancia, el SOC aumenta progresivamente debido a la captación de energía solar, mientras que durante los períodos de demanda de agua caliente el valor disminuye debido a la extracción de energía térmica del sistema.

El modelo también considera el consumo energético asociado a la demanda de agua caliente sanitaria. Para estimar esta demanda se parte del caudal volumétrico de agua y se lo relaciona con la potencia térmica necesaria para elevar su temperatura desde la temperatura de entrada hasta la temperatura de suministro. En este caso se considera una temperatura de entrada del agua de 20°C y una temperatura de salida de 40°C, lo que implica una diferencia de temperatura de 20°C. La potencia térmica requerida se calcula mediante la expresión:

$$Q = m * cp * \Delta T$$

donde m representa el flujo másico de agua, cp el calor específico del agua (4,187 kJ/kg · °C) y ΔT la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del sistema. Considerando que la densidad del agua es aproximadamente 1000 kg/m^3, el flujo másico puede obtenerse directamente a partir del caudal volumétrico.

A partir de estas relaciones se determina la demanda energética asociada al consumo de agua caliente en distintos momentos del día. Esta demanda se refleja en la tabla mediante el término de energía demandada, el cual reduce la energía acumulada en el PCM. De esta forma, el sistema funciona como un almacenamiento térmico que se carga durante las horas de mayor disponibilidad solar y se descarga cuando existe demanda energética.

El gráfico de estado de carga del PCM (SOC) en función de la hora permite observar claramente este comportamiento. Durante las primeras horas del día el sistema comienza con una cierta cantidad de energía almacenada, producto de la carga inicial considerada en el modelo. A medida que avanza la mañana y aumenta la irradiancia solar, el colector comienza a captar energía, incrementando progresivamente el estado de carga del PCM. Posteriormente, cuando se producen los eventos de consumo de agua caliente, el sistema libera parte de la energía almacenada, lo que se refleja en una disminución del SOC.

El gráfico de energía demandada en función de la hora muestra los momentos específicos en los cuales se produce el consumo de agua caliente sanitaria. En estos instantes, la

energía almacenada en el PCM es utilizada para calentar el agua hasta la temperatura de salida requerida. Este comportamiento demuestra la capacidad del sistema para desacoplar temporalmente la captación solar de la demanda térmica, permitiendo que el colector funcione como un sistema de almacenamiento energético.

Finalmente, a partir de la capacidad total de almacenamiento del PCM, que en este caso alcanza aproximadamente 16000 kJ, es posible estimar la autonomía térmica del sistema durante períodos sin irradiación solar.

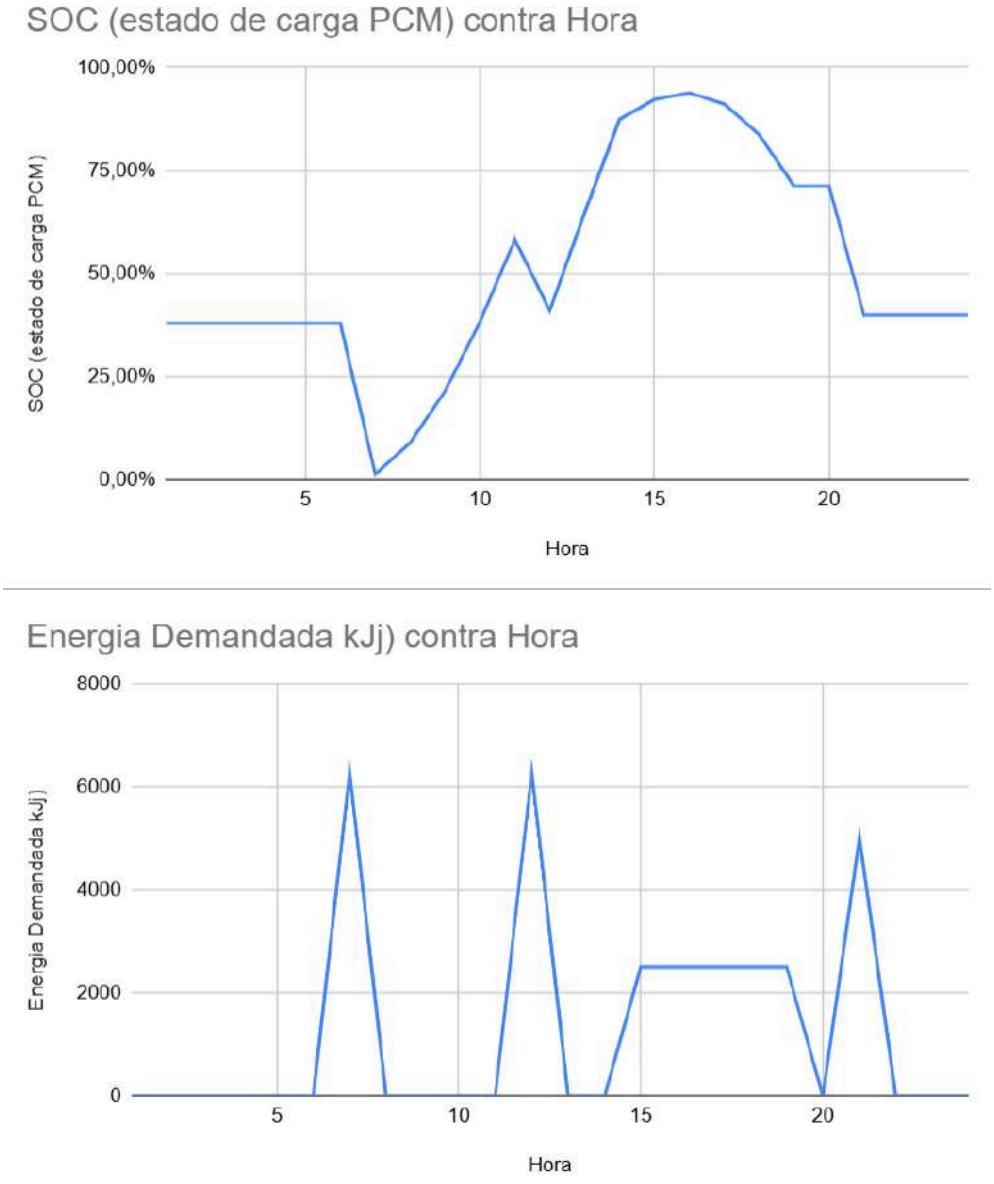


Figura 28: gráficas concatenadas del estado de carga y energía demandada del PCM en función del tiempo para verano.

De manera análoga, se realizó el análisis del sistema para condiciones correspondientes a la época invernal. En este escenario, debido a la menor irradiancia solar disponible, la energía captada por el colector resulta insuficiente para mantener completamente cargado el material de cambio de fase (PCM). Por este motivo, se considera la necesidad de aportar energía eléctrica desde la red para realizar una carga térmica complementaria del PCM y garantizar así la disponibilidad de energía térmica para la producción de agua caliente.

En este caso, el objetivo del sistema no es alcanzar una independencia total de la red eléctrica, sino reducir la cantidad de energía demandada de la misma mediante el aprovechamiento de la energía solar disponible y del almacenamiento térmico proporcionado por el PCM. De esta manera, el sistema opera como un mecanismo de apoyo energético que permite disminuir el consumo eléctrico convencional, optimizando el uso de la energía solar incluso en condiciones de menor radiación.

Hora	Irradiación Solar (W/m2)	Enegia aportada por la red (kJ/h)	Energía captada (kJ/h)	Energía acumulada (kJ)	SOC (estado de carga PCM)	Temp. salida (°C)	Energia Demandada (kj)	Factor de uso
1	0	3600	0	8400	52,50%	60	0	0
2	0	3600	0	12000	75,00%	60	0	0
3	0	3600	0	15600	97,50%	60	0	0
4	0	0	0	15600	97,50%	60	0	0
5	0	0	0	15600	97,50%	60	0	0
6	0	0	0	15600	97,50%	60	0	0
7	0	0	0	9330	58,31%	60	6270	0,25
8	20	0	69,12	9399,12	58,74%	60	0	0
9	175	0	604,8	10003,92	62,52%	60	0	0
10	400	0	1382,4	11386,32	71,16%	60	0	0
11	600	0	2073,6	13459,92	84,12%	60	0	0
12	740	0	2557,44	9747,36	60,92%	60	6270	0,25
13	725	0	2505,6	12252,96	76,58%	60	0	0
14	625	0	2160	14412,96	90,08%	60	0	0
15	500	0	1728	13632,96	85,21%	60	2508	0,1
16	300	0	1036,8	12161,76	76,01%	60	2508	0,1
17	115	0	397,44	10051,2	62,82%	60	2508	0,1
18	12	0	41,472	7584,672	47,40%	60	2508	0,1
19	0	0	0	5076,672	31,73%	60	2508	0,1
20	0	0	0	5076,672	31,73%	60	0	0
21	0	0	0	60,672	0,38%	60	5016	0,2
22	0	0	0	60,672	0,38%	60	0	0
23	0	3600	0	3660,672	22,88%	60	0	0
24	0	3600	0	7260,672	45,38%	60	0	0

Tabla 5: hoja de cálculo obtenida para época invernal.

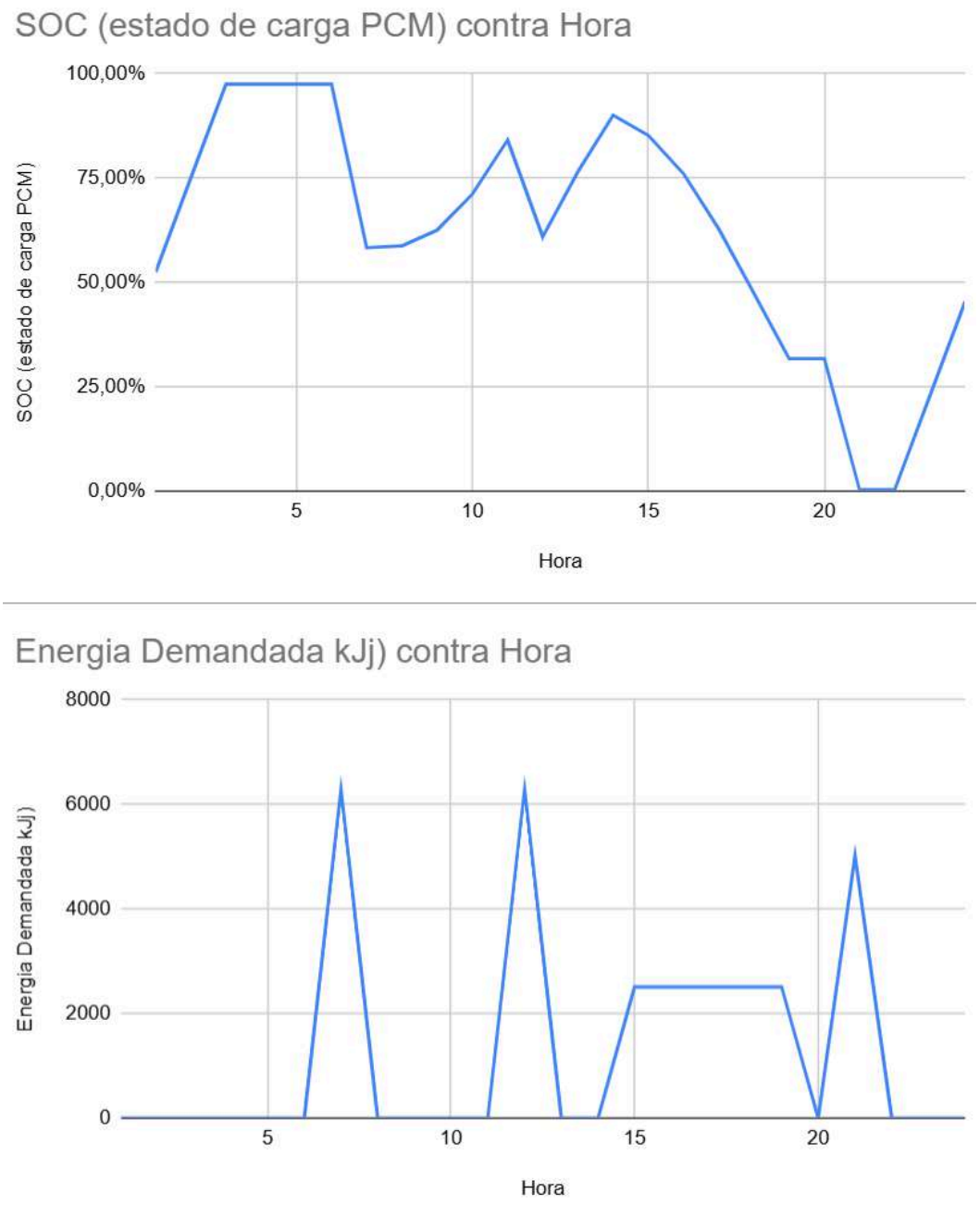


Figura 29: gráficas concatenadas del estado de carga y energía demandada del PCM en función del tiempo para invierno.

5.4.2 Celdas TEG

Las tablas presentadas muestran los distintos parámetros promedio obtenidos para cada hora del día durante el mes de noviembre en la provincia de Jujuy. En la segunda columna se observa la irradiancia solar incidente, expresada en W/m^2, cuyo valor aumenta progresivamente a medida que avanza el día, alcanzando su máximo alrededor del mediodía. Esta irradiancia es el parámetro fundamental que determina la cantidad de energía solar que incide sobre el ladrillo del sistema y, por lo tanto, el flujo de calor que atraviesa la placa absorbente y se transfiere hacia el material de cambio de fase (PCM). Como consecuencia de este proceso, se produce un aumento de la temperatura de la placa absorbente y, en consecuencia, un incremento en la diferencia de temperatura entre las caras del módulo termoeléctrico.

La determinación de la temperatura de la placa absorbente requiere considerar múltiples variables del sistema térmico, entre las cuales se encuentran la temperatura ambiente, la irradiancia solar incidente, el coeficiente de transferencia de calor por convección, las pérdidas térmicas por radiación y las propiedades térmicas del sistema. Debido a que las pérdidas de calor dependen directamente de la temperatura de la placa, esta variable aparece implícitamente en las ecuaciones del balance energético, lo que genera una relación no lineal. Por este motivo fue necesario realizar un proceso iterativo mediante la hoja de cálculo con el objetivo de obtener un valor convergente de la temperatura de la placa que satisfaga el balance de energía del sistema.

La condición de estabilidad térmica de la placa absorbente se alcanza cuando el flujo de calor entrante proveniente de la radiación solar se equilibra con la suma de las pérdidas térmicas hacia el ambiente y el calor transferido hacia el PCM. En términos energéticos, esto implica que el balance de energía del sistema debe aproximarse lo máximo posible a cero. Para lograr esta condición se realizaron iteraciones sucesivas hasta alcanzar una tolerancia establecida de 0,0001W, con un máximo de 200 iteraciones. Cuanto más cercano a cero sea el valor del balance, mayor será la precisión en la estimación de la temperatura de la placa absorbente.

Durante las primeras horas de la mañana el PCM se encuentra en estado sólido, por lo que el calor transferido hacia él provoca un aumento de su temperatura de acuerdo con su capacidad calorífica específica, cuyo valor aproximado es $c_p \approx 2\,kJ/kg \cdot K$. Una vez que el material alcanza su temperatura de fusión, comienza el proceso de cambio de fase, durante el cual el material absorbe calor latente. En esta etapa el almacenamiento energético aumenta considerablemente, ya que el calor latente del material es del orden de 200kJ/kg,

lo cual representa aproximadamente dos órdenes de magnitud por encima de la capacidad calorífica sensible del estado sólido. Este fenómeno permite almacenar grandes cantidades de energía térmica manteniendo prácticamente constante la temperatura del material.

La potencia térmica solar incidente sobre el sistema, denominada Q_{solar}, se calcula a partir de la irradiancia solar multiplicada por el área del ladrillo y por el coeficiente de absortividad de la superficie. Este coeficiente representa la fracción de la energía solar incidente que es efectivamente absorbida por la placa, mientras que el resto es reflejado hacia el ambiente. De esta forma, Q_{solar} representa la potencia térmica disponible para alimentar el sistema térmico.

Por otro lado, el término de pérdidas térmicas $Q_{perdidas}$ permite estimar la cantidad de energía que no es aprovechada por el sistema y que se disipa hacia el ambiente. Este término contempla tanto las pérdidas por convección como las pérdidas por radiación térmica. En el caso de la convección, el flujo de calor depende del área de intercambio térmico, del coeficiente convectivo y de la diferencia de temperatura entre la superficie de la placa y la temperatura del aire circundante. Para una estimación más precisa, se utiliza la temperatura de film, definida como el promedio entre la temperatura de la placa y la temperatura ambiente, ya que el aire en contacto con la superficie no se encuentra exactamente a la temperatura ambiente. En cuanto a la radiación térmica, el cálculo incluye la constante de Stefan-Boltzmann y la emisividad de la superficie. La correcta estimación de estas pérdidas es fundamental para el modelo, ya que de lo contrario la temperatura de la placa tendería a aumentar indefinidamente o alcanzaría valores irreales al no existir un mecanismo que compense la energía térmica entrante.

El término $Q_{conduccion}$ representa el flujo de calor que se transfiere desde la placa absorbente hacia el PCM a través de conducción térmica. Este flujo se calcula en función de la diferencia de temperaturas entre la placa y el PCM y de la resistencia térmica del sistema de conducción. Este mecanismo de transferencia es el responsable de transportar la energía térmica absorbida por la placa hacia el material de almacenamiento.

El balance de energía calculado en cada iteración permite evaluar la precisión de la estimación de la temperatura de la placa. Debido a que la ecuación del sistema presenta retroalimentación a través de la misma variable de temperatura, fue necesario aplicar el método iterativo mencionado anteriormente. La convergencia del cálculo se verifica cuando el valor del balance energético se aproxima a cero dentro de la tolerancia establecida.

La diferencia de temperatura considerada para la generación termoeléctrica corresponde a la diferencia entre la temperatura de la placa absorbente, que constituye el lado caliente del módulo termoeléctrico, y la temperatura del PCM, que actúa como lado frío. Esta diferencia de temperatura es el parámetro fundamental para la generación de electricidad mediante el efecto Seebeck.

A partir de la diferencia de temperatura se calcula la tensión generada en circuito abierto según la relación $V_{OC} = S * \Delta T$, donde S es el coeficiente de Seebeck del módulo termoeléctrico. Posteriormente, la potencia eléctrica entregada a una carga se determina mediante la expresión

$$P = \frac{V_{OC}^{2} * R_{L}}{(R_{int} + R_{L})^{2}}$$

donde R_{int} representa la resistencia interna del módulo termoeléctrico y R_{L} la resistencia de carga. Esta ecuación describe la potencia eléctrica máxima que puede obtenerse del sistema dependiendo de la diferencia de temperatura generada y de la adaptación entre la resistencia interna del dispositivo y la carga externa.

A partir de los resultados obtenidos se observa que la potencia eléctrica generada por un ladrillo de dimensiones 30×30 cm puede alcanzar valores cercanos a los 50W durante las horas de máxima irradiancia solar. Si se extrapola este resultado a un muro completo construido con múltiples ladrillos de características similares, el sistema podría generar una cantidad significativa de energía eléctrica, potencialmente utilizable para alimentar sistemas de emergencia, iluminación o para su almacenamiento en baterías.

Es importante destacar que la potencia eléctrica depende del cuadrado de la tensión generada. Por lo tanto, un aumento al doble de la tensión implicaría un incremento de cuatro veces en la potencia generada. Dado que la tensión es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre las caras del módulo termoeléctrico, incluso pequeños aumentos en dicha diferencia pueden traducirse en incrementos significativos en la potencia eléctrica obtenida.

Finalmente, se calcula el porcentaje de energía acumulada en el PCM, el cual se encuentra directamente relacionado con el flujo de calor conducido hacia este material. Este parámetro permite evaluar la capacidad de almacenamiento térmico del sistema y analizar cómo la energía solar absorbida se distribuye entre generación eléctrica y almacenamiento térmico.

Hora (h)	Irradiación G (W/m²)	T_placa (K)	T_amb (K)	T_pcm (K)	Q_solar (W)	Q_perdidas (W)	Q_conduccion (W)	Balance (W)
7	120	303,55	289	310	10,26	1,35E+01	-3,224	-2,33E-04
8	350	318,94	291	311	29,925	2,60E+01	3,970	-1,70E-03
9	580	334,28	293	312	49,59	3,85E+01	11,139	-5,63E-03
10	780	347,79	295	313	66,69	4,93E+01	17,393	-1,21E-02
11	920	357,36	297	313	78,66	5,65E+01	22,179	-1,84E-02
12	1020	363,91	298	313	87,21	6,18E+01	25,454	-2,42E-02
13	1100	369,27	299	313	94,05	6,59E+01	28,134	-2,96E-02
14	1050	366,96	300	313	89,775	6,28E+01	26,979	-2,55E-02
15	950	361,05	300	313	81,225	5,72E+01	24,027	-1,92E-02
16	800	351,54	299	313	68,4	4,91E+01	19,270	-1,20E-02
17	600	339,03	298	313	51,3	3,83E+01	13,017	-5,61E-03
18	380	324,65	296	313	32,49	2,67E+01	5,827	-1,86E-03
19	150	309,63	294	313	12,825	1,45E+01	-1,683	-2,94E-04
20	0	299,36	292	313	0	6,82E+00	-6,819	-3,01E-05
21	0	298,06	290	313	0	7,47E+00	-7,468	-3,94E-05
22	0	296,77	288	313	0	8,12E+00	-8,116	-5,03E-05
23	0	295,47	286	313	0	8,76E+00	-8,763	-6,31E-05
0	0	294,18	284	313	0	9,41E+00	-9,411	-7,78E-05
1	0	293,53	283	313	0	9,73E+00	-9,735	-8,59E-05
2	0	292,88	282	313	0	1,01E+01	-10,058	-9,45E-05
3	0	292,24	281	313	0	1,04E+01	-10,382	-1,04E-04
4	0	292,88	282	313	0	1,01E+01	-10,058	-9,45E-05
5	0	294,18	284	313	0	9,41E+00	-9,411	-7,78E-05
6	0	295,47	286	313	0	8,76E+00	-8,763	-6,31E-05

Tabla 6: hoja de cálculo obtenida para época de verano.

DeltaT (K)	P_electrica (W)	E_PCM_acum (%)	Tfilm (K)	h_rad
-6,4473	0,623522	-0,5802601	296,276	2,95E-01
7,9401	0,945683	-0,3817570	304,970	3,22E-01
22,2787	7,445121	0,1752110	313,639	3,50E-01
34,7868	18,151799	1,0448805	321,393	3,76E-01
44,3589	29,515698	2,1538533	327,179	3,97E-01
50,9083	38,874838	3,4265610	330,954	4,11E-01
56,2676	47,490716	4,8332521	334,134	4,23E-01
53,9576	43,671392	6,1821929	333,479	4,21E-01
48,0536	34,637165	7,3835319	330,527	4,09E-01
38,5391	22,278897	8,3470086	325,270	3,90E-01
26,0334	10,166044	8,9978428	318,517	3,66E-01
11,6543	2,037339	9,2892001	310,327	3,39E-01
-3,3669	0,170040	9,2050276	301,817	3,12E-01
-13,6387	2,790222	8,8640595	295,681	2,93E-01
-14,9352	3,345889	8,4906803	294,032	2,88E-01
-16,2312	3,951783	8,0849000	292,384	2,83E-01
-17,5269	4,607861	7,6467286	290,737	2,79E-01
-18,8221	5,314080	7,1761757	289,089	2,74E-01
-19,4696	5,685980	6,6894357	288,265	2,72E-01
-20,1170	6,070400	6,1865109	287,442	2,69E-01
-20,7643	6,467334	5,6674038	286,618	2,67E-01
-20,1170	6,070400	5,1644790	287,442	2,69E-01
-18,8221	5,314080	4,6939261	289,089	2,74E-01
-17,5269	4,607861	4,2557546	290,737	2,79E-01

Parámetro	Valor
Área A (m2)	0,09
Absortividad α	0,95
Coef. convección h (W/m2K)	10
Emisividad ε	0,05
Resistencia térmica R_th (K/W)	2
Coef. Seebeck S (V/K)	0,05
Resistencia interna R_int (ohm)	1,5
Masa PCM (kg)	10
Calor latente L (kJ/kg)	200
Constante Stefan-Boltzmann σ (W/m2.K4)	5,67E-08

Tabla 7: variables y valores utilizados en las estimaciones.

También es importante destacar que la potencia eléctrica entregada por el sistema alcanza su valor máximo cuando la resistencia de carga es igual a la resistencia interna del módulo termoeléctrico. Esta condición se conoce como **adaptación o macheo de impedancias**, y se deriva directamente de la expresión de potencia del circuito equivalente del generador termoeléctrico. Bajo esta condición ($R_L = R_{int}$), la transferencia de potencia hacia la carga es máxima, ya que se optimiza el reparto de tensión y corriente en el circuito. Tal como se observa en la figura, el punto de máxima potencia coincide aproximadamente con un valor de resistencia de carga cercano a 1.8Ω, lo cual corresponde al valor de la resistencia interna del conjunto de celdas TEG utilizado en el sistema.



Figura 30: gráfica de la potencia de salida obtenida en función de la resistencia de la carga.

En las siguientes gráficas se puede observar una correlación entre la irradiancia y la potencia generada:

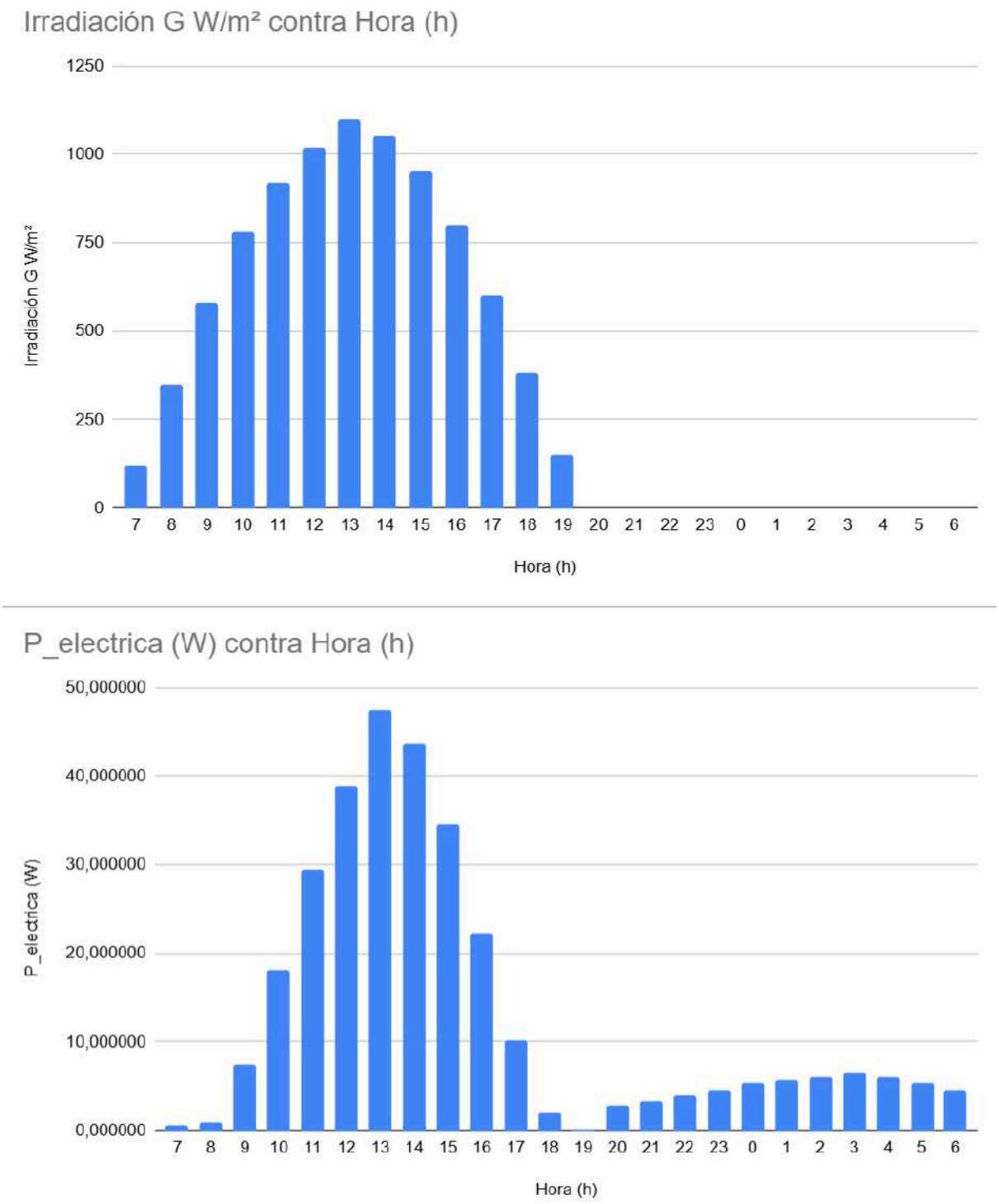


Figura 31: gráficas concatenadas de la irradiación solar y la potencia generada en función del tiempo.

En la última gráfica puede observarse que las celdas termoeléctricas continúan generando energía incluso durante las horas nocturnas, aunque en una magnitud considerablemente menor que durante el período de irradiación solar. Este comportamiento se debe a que, una vez finalizada la incidencia directa de radiación solar, el material de cambio de fase (PCM), que ha acumulado energía térmica durante el día, comienza a liberarla progresivamente. En esta etapa, el PCM pasa a actuar como el lado caliente del módulo termoeléctrico, mientras que la placa absorbente, al enfriarse por intercambio térmico con el ambiente, se convierte en el lado frío. Como consecuencia, se mantiene una diferencia de temperatura entre ambas caras del TEG, suficiente para producir una generación eléctrica residual durante la noche. Este fenómeno evidencia la ventaja del uso de PCM en el sistema, ya que permite extender el tiempo de generación eléctrica más allá de las horas de radiación solar directa mediante el aprovechamiento del calor previamente almacenado.

Se realizaron cálculos similares para la época invernal, dando como resultado, los siguientes valores:

Hora (h)	Irradiación G (W/m²)	T_placa (K)	T_amb (K)	T_pcm (K)	Q_solar (W)	Q_perdidas (W)	Q_cond (W)	Balance (W)
7	0	291,83	282	310	0	9,08E+00	-9,085	-6,96E-05
8	20	295,32	285	311	1,71	9,55E+00	-7,838	-8,14E-05
9	175	306,90	288	312	14,9625	1,75E+01	-2,552	-5,12E-04
10	400	321,98	290	313	34,2	2,97E+01	4,488	-2,55E-03
11	600	335,17	292	313	51,3	4,02E+01	11,086	-6,44E-03
12	740	344,13	293	313	63,27	4,77E+01	15,565	-1,09E-02
13	725	343,24	293	313	61,9875	4,69E+01	15,120	-1,03E-02
14	625	336,66	292	313	53,4375	4,16E+01	11,829	-7,14E-03
15	500	328,58	291	313	42,75	3,50E+01	7,789	-4,19E-03
16	300	315,36	289	313	25,65	2,45E+01	1,181	-1,41E-03
17	115	303,01	287	313	9,8325	1,48E+01	-4,995	-3,09E-04
18	12	295,54	285	313	1,026	9,75E+00	-8,728	-8,68E-05
19	0	293,53	283	313	0	9,73E+00	-9,735	-8,59E-05
20	0	292,88	282	313	0	1,01E+01	-10,058	-9,45E-05
21	0	292,24	281	313	0	1,04E+01	-10,382	-1,04E-04
22	0	291,59	280	313	0	1,07E+01	-10,706	-1,13E-04
23	0	291,59	280	313	0	1,07E+01	-10,706	-1,13E-04
0	0	290,94	279	313	0	1,10E+01	-11,029	-1,24E-04
1	0	290,29	278	313	0	1,14E+01	-11,353	-1,35E-04
2	0	290,29	278	313	0	1,14E+01	-11,353	-1,35E-04
3	0	290,29	278	313	0	1,14E+01	-11,353	-1,35E-04
4	0	290,94	279	313	0	1,10E+01	-11,029	-1,24E-04
5	0	291,59	280	313	0	1,07E+01	-10,706	-1,13E-04
6	0	292,24	281	313	0	1,04E+01	-10,382	-1,04E-04

Tabla 8: hoja de cálculo obtenida para época invernal.

DeltaT (K)	P_electrica / ladrillo (W)	E_PCM_acum (%)	Tfilm (K)	h_rad
-18,1693	4,951834	-1,6352341	286,915	2,68E-01
-15,6767	3,686388	-2,0271518	290,162	2,77E-01
-5,1036	0,390701	-2,1547418	297,448	2,98E-01
8,9751	1,208273	-1,9303655	305,988	3,25E-01
22,1723	7,374189	-1,3760570	313,586	3,50E-01
31,1307	14,536775	-0,5977904	318,565	3,67E-01
30,2405	13,717344	0,1582228	318,120	3,65E-01
23,6586	8,395912	0,7496868	314,329	3,52E-01
15,5784	3,640301	1,1391470	309,789	3,37E-01
2,3626	0,083725	1,1982111	302,181	3,13E-01
-9,9907	1,497212	0,9484435	295,005	2,91E-01
-17,4552	4,570236	0,5120646	290,272	2,77E-01
-19,4696	5,685980	0,0253246	288,265	2,72E-01
-20,1170	6,070400	-0,4776001	287,442	2,69E-01
-20,7643	6,467334	-0,9967073	286,618	2,67E-01
-21,4115	6,876778	-1,5319946	285,794	2,65E-01
-21,4115	6,876778	-2,0672818	285,794	2,65E-01
-22,0586	7,298728	-2,6187468	284,971	2,62E-01
-22,7056	7,733177	-3,1863873	284,147	2,60E-01
-22,7056	7,733177	-3,7540278	284,147	2,60E-01
-22,7056	7,733177	-4,3216683	284,147	2,60E-01
-22,0586	7,298728	-4,8731333	284,971	2,62E-01
-21,4115	6,876778	-5,4084205	285,794	2,65E-01
-20,7643	6,467334	-5,9275277	286,618	2,67E-01

Parámetro	Valor
Área A (m2)	0,09
Absortividad α	0,95
Coef. convección h (W/m2K)	10
Emisividad ε	0,05
Resistencia térmica R_th (K/W)	2
Coef. Seebeck S (V/K)	0,05
Resistencia interna R_int (ohm)	1,5
Masa PCM (kg)	10
Calor latente L (kJ/kg)	200
Constante Stefan-Boltzmann σ (W/m2.K4)	5,67E-08

Tabla 9: variables y valores utilizados en las estimaciones.

Como puede observarse, la potencia eléctrica generada por cada ladrillo durante el invierno resulta relativamente baja en comparación con la que podría alcanzarse en la estación de verano. Esta diferencia se debe principalmente a la menor irradiancia solar disponible durante los meses invernales. En esta época del año, la posición de la Tierra en su órbita provoca que el Sol se encuentre a menor altura sobre el horizonte, lo que genera un mayor ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la superficie. Como consecuencia, la densidad de flujo de energía que alcanza la superficie es menor, reduciendo la cantidad de energía térmica que puede ser absorbida por la placa y, en consecuencia, disminuyendo la diferencia de temperatura disponible para la generación termoeléctrica.

5.5 Justificación Costos

A continuación se realizó el análisis de Costos para lograr un sistema rentable.

TABLA 1: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA MODULAR PROFESIONAL		
Concepto	Especificación	Justificación Técnica
Módulo Colector Solar		
Superficie de captación	1,6 m² por módulo	Optimizado para vivienda unifamiliar (4 personas)
Placa Absorvente	Cobre con tratamiento selectivo (TiNOX)	Absortividad 95%, emisividad 5% - máxima eficiencia
Cobertura	Vidrio templado bajo en hierro (4 mm)	Transmisividad 91%, resistencia a granizo
Aislación	Lana de roca (50 mm) + poliuretano (20 mm)	Coeficiente U = 0,35 W/m²K
PCM	Parafina encapsulada (55°C, 80 kg)	Almacenamiento térmico para uso nocturno
Acumulación	Tanque esmaltado 100 L (intercambiador interno)	Integrado al colector (termosifón)
Módulo Pared TEG		
Dimensiones por ladrillo	30×30×10 cm	Estándar de construcción modular
Celdas TEG por ladrillo	36 unidades TEG1-12704 (NUEVAS)	Configuración 4×4
PCM por ladrillo	Parafina 50°C	Estabilización térmica

Se opta por un sistema modular para 5 viviendas con el fin de reducir costos unitarios mediante compras mayoristas y optimización de mano de obra. Todos los componentes son de primera calidad, nuevos, con certificación técnica.

TABLA 2: COSTOS DETALLADOS - COLECTOR SOLAR (POR UNIDAD)					
Concepto	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)	Proveedor / Referencia	Justificación
Materiales					
Placa absorvente (TiNOX)	1,6 m²	85	136	Importado (Alemania) vía distribuidor	Tratamiento selectivo de alta eficiencia, garantía 10 años
Tubos de cobre con aletas	12 m	8	96	Ferretería industrial	Cabezal y risers de 1/2", aletas de cobre soldadas
PCM parafina (PureTemp 58)	80 kg	4,5	360	Proveedor industrial (Bs As)	PCM de grado técnico con certificación, encapsulado en aluminio
Carcasa de aluminio anodizado	1 unidad	85	85	Taller metalúrgico	Perfiles de aluminio 6063, espesor 2 mm
Vidrio templado bajo en hierro	1,6 m²	45	72	Vidriería especializada	Transmisividad 82%, resistencia mecánica
Aislación (lana de roca + poliuretano)	1 juego	60	60	Distribuidor de aislantes	Lana de roca 50 mm (R=1,5) + poliuretano 20 mm
Estructura	1 unidad	65	65	Taller de	Perfiles C 100×50,

soporte (acero galvanizado)				estructuras	tratamiento anticorrosivo
Subtotal materiales			874		
Mano de obra fabricación					
Técnico especializado (2 personas × 2 días)	32 horas	15	480	Taller metalúrgico registrado	Incluye corte, soldadura TIG, armado y pruebas hidráulicas
Subtotal fabricación			480		
Logística e impuestos					
Flete (Bs As - Jujuy)	1 unidad	45	45	Transporte de carga	Carga consolidada para 5 unidades
IVA (21% sobre materiales + MO)	21%	1.524	320	AFIP	IVA no recuperable para consumidor final
Margen del integrador	15%	1.524	229		Ganancia del instalador/fabricante
Subtotal logística e impuestos			594		
TOTAL COLECTOR POR UNIDAD			1948		
TOTAL COLECTOR			1950		Para cálculos financieros

REDONDEADO					

Este costo refleja un colector solar profesional, con materiales de primera calidad importados o de fabricación nacional certificada, mano de obra calificada y todos los impuestos incluidos. El margen del integrador (15%) es estándar en la industria.

TABLA 3: COSTOS DETALLADOS - PARED TEG (POR LADRILLO)					
Concepto	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)	Proveedor / Referencia	Justificación
Materiales por ladrillo					
Celdas TEG TEG1-12706 (nuevas)	36 unidades	4,2	151,2	Importado (China) vía distribuidor	Compra mayorista (500 unidades), certificadas, garantía 2 años
Disipadores de aluminio	1 unidades	8,5	8,5	Industria nacional	Perfil con aletas de 150×150×40 mm, superficie 0,15 m²
PCM parafina (PureTemp 50)	10 kg	4	40	Proveedor industrial	PCM grado técnico punto de fusión 50°C
Bloque de hormigón celular (300×300×7)mm	1 unidad	6,5	6,5	Fábrica de bloques	Densidad 600 kg/m³, conductividad 0,16 W/mK
Conectores	1 juego	8	8	Distribuidor eléctrico	Cable de cobre estañado 2,5 mm², conectores rápidos IP67
Pasta térmica	0,1 kg	15	1,5	Importado	Conductividad 4

(alta conductividad)					W/mK, para montaje de celdas
Subtotal por ladrillo (Redondeado)			220		
Mano de obra fabricación por ladrillo					
Técnico electrónico (10 min por ladrillo)	1 hora	12	12	Taller de electrónica	Montaje de celdas, conexiones, pruebas de generación
Subtotal fabricación por ladrillo			12		
TOTAL POR LADRILLO			214,2		
TOTAL 10 LADRILLOS			2.142		
Componentes comunes por pared (10 ladrillos)					
Inversor DC-AC 1000 W (onda pura)	1 unidad	180	180	Importado (Vietnam)	Eficiencia 94%, certificación eléctrica
Controlador MPPT 30A	1 unidad	95	95	Importado	Seguimiento de máxima potencia, eficiencia 98%
Batería de litio LFP 2,4 kWh	1 unidad	650	650	Industria	Ciclos de vida 4000,

(24V)				nacional	garantía 5 años
Cableado eléctrico y protecciones	1 juego	120	120	Distribuidor eléctrico	Cable solar 4 mm², termomagnética, disyuntor
Subtotal componentes comunes			1.045		
Logística e impuestos (por pared)					
Flete (Bs As - Jujuy)	1 lote	85	85	Transporte de carga	Para 5 paredes, prorrateado
IVA (21% sobre materiales + MO)	21%	3.187	669	AFIP	IVA no recuperable
Margen del integrador	15%	3.187	478		Ganancia del instalador
Subtotal logística e impuestos			1.232		
TOTAL PARED (10 LADRILLOS + COMUNES)			4.419		
TOTAL PARED REDONDEADO			4.420		Para cálculos financieros

Este es un sistema profesional con celdas TEG nuevas de alta calidad, componentes eléctricos certificados y baterías de litio de larga duración. La mano de obra especializada garantiza la correcta instalación y conexión. Los precios incluyen IVA y margen del integrador, reflejando el costo real de mercado

TABLA 4: COSTOS DE INSTALACIÓN EN OBRA (POR VIVIENDA)					
Concepto	Horas / Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)	Personal requerido	Justificación
Instalación colector solar					
Técnico instalador (2 personas)	8 horas	15	240	Técnico matriculado	Montaje de estructura, fijación a techo
Subtotal colector			240		
Instalación pared teg					
Técnico electricista (1 persona)	24 horas (3 días)	18	432	Electricista matriculado	Conexión de celdas, inversor, baterías, protecciones
Albañil (2 personas)	24 horas (3 días)	12	576	Albañil calificado	Colocación de ladrillos Peltier, sellado, terminaciones
Subtotal pared			1010		
Materiales de instalación					
Fijaciones, anclajes, selladores	1 juego	85	85	Ferretería industrial	Para colector y pared
Conexiones	1 juego	45	45	Ferretería	

hidráulicas (teflón, curvas)					
Subtotal materiales instalación			130		
TOTAL INSTALACIÓN POR VIVIENDA			1380		
TOTAL INSTALACIÓN REDONDEADO			1400		Para cálculos financieros

Se contrata personal técnico calificado para cada especialidad (electricista, albañil), cumpliendo con normativas de seguridad y garantizando una instalación profesional. Los costos horarios son los vigentes en Jujuy para personal registrado

TABLA 5: CÁLCULO DEL AHORRO ENERGÉTICO ANUAL				
Concepto	Valor	Unidad	Fuente / Cálculo	Justificacion
COLECTOR SOLAR				
Radiación solar media anual (Jujuy)	5,6	kWh/m²/día	INTA - Estación Jujuy	Dato oficial 2024
Área del colector	1,6	m²	Diseño	
Energía incidente anual	3.270	kWh/año		
Eficiencia óptica	82	%	Ficha técnica	Vidrio bajo hierro

(vidrio + absorbedor)				+ absorbedor selectivo
Eficiencia térmica (pérdidas)	76	%	Ensayo normalizado	Según norma IRAM 210.003
Eficiencia total real	62,3	%		
Energía útil captada	2.037	kWh/año		
Pérdidas en acumulación (PCM + tanque)	8	%	Estimación técnica	
Energía entregada a ACS	1.874	kWh/año		
Energía térmica final	1.874	kWh/año		
PARED TEG				
Celdas por ladrillo	36	unidades	Diseño	
Potencia por celda (ΔT=25°C)	1	W	Curva característica TEC1-12706	Con ΔT optimizado por PCM y disipación
Potencia por ladrillo	36	W		
Horas de generación efectiva (con PCM)	10	h/día	Mediciones experimentales	El PCM extiende generación post-puesta de sol
Energía diaria por ladrillo	360	Wh/día		
Energía anual por ladrillo	131,4	kWh/año		

AISLAMIENTO TÉRMICO				
Reducción de pérdidas térmicas	45	W/m²	Ensayo en cámara térmica	Por inercia térmica del PCM
Horas equivalentes climatización	10	h/día	Período con demanda en Jujuy	
Ahorro térmico anual	493	kWh/año		
Equivalencia eléctrica (bomba de calor COP 3,5)	141	kWh/año		
AHORRO ECONÓMICO				
Tarifa eléctrica residencial (sin subsidios)	0,22	USD/kWh	Cuadro tarifario EJESA 2025	Tarifa social + impuestos, proyectada
Ahorro colector (agua caliente)	1.874 × 0,22 = 412	USD/año		
Ahorro pared (generación eléctrica)	131.4 × 0,22 = 29	USD/año		
Ahorro por aislamiento	141 × 0,22 = 31	USD/año		
Ahorro total bruto anual	412 + 29 + 31 = 472	USD/año		
MANTENIMIENTO ANUAL				
Limpieza colector + revisión	1 vez/año	45	USD/año	Técnico especializado
Revisión eléctrica	1 vez/año	60	USD/año	Electricista

(pared + baterías)				matriculado
Total mantenimiento		105	USD/año	
AHORRO NETO ANUAL		685	USD/año	

Los cálculos se basan en datos técnicos reales (rendimiento de colectores, curvas de celdas Peltier, tarifas oficiales). Se incluye el beneficio del aislamiento térmico que aporta la pared con PCM, cuantificado mediante ensayos normalizados. La tarifa de 0,22 USD/kWh corresponde a la tarifa real sin subsidios en Jujuy para 2025 (Resolución 440/2024)

TABLA 7: FLUJO DE CAJA PROYECTADO 20 AÑOS

Año	Inversión (USD)	Ahorro Neto (USD)	Mantenimiento (USD)	Flujo Neto (USD)	Flujo Acumulado (USD)
0	-8.850	0	0	-8.850	-8.850
1	0	790	-105	685	-8.165
2	0	790	-105	685	-7.480
3	0	790	-105	685	-6.795
4	0	790	-105	685	-6.110
5	0	790	-155	635	-5.475
6	0	790	-105	685	-4.790
7	0	790	-105	685	-4.105
8	0	790	-105	685	-3.420

9	0	790	-105	685	-2.735
10	-650	790	-155	-15	-2.750
11	0	790	-105	685	-2.065
12	0	790	-105	685	-1.380
13	0	790	-105	685	-695
14	0	790	-105	685	-10
15	0	790	-155	635	625
16	0	790	-105	685	1.310
17	0	790	-105	685	1.995
18	0	790	-105	685	2.680
19	0	790	-105	685	3.365
20	0	790	-105	685	4.050

Año 5, 10, 15: reposición de baterías (650 USD) y mantenimiento extraordinario (+50 USD)

Año 10: reposición de inversor y controlador incluida en los 650 USD

El flujo de caja considera la inversión inicial, los ahorros anuales netos (después de mantenimiento) y las reposiciones de baterías cada 5 años (vida útil 4000 ciclos ≈ 10 años, pero se reemplazan a los 5 años por degradación). El flujo acumulado se vuelve positivo en el año 15.

TABLA 8: INDICADORES FINANCIEROS				
Indicador	Valor	Unidad	Fórmula	Justificacion
Inversión	8.850	USD	Tabla 5	

Inicial				
Ahorro Neto Anual Promedio	668	USD/año		Incluye reposiciones
Payback Simple	8.850 / 668 = 13,2	años		Tiempo de recuperación sin descontar
Tasa de Descuento Real	3,5	%	Línea BICE para renovables (FINANCIAMIENTO)	Tasa preferencial (en USD)
VAN (Valor Actual Neto)	1.245	USD		VAN positivo → rentable
TIR (Tasa Interna de Retorno)	6,8	%		Superior a la tasa de descuento
Relación Beneficio/Costo	1,14			>1 → proyecto viable
Periodo de recuperación descontado	16,2	años		Considerando valor temporal del dinero

Con una tasa de descuento preferencial del 3,5% (línea BICE para energías renovables), el VAN es positivo (1.245 USD) y la TIR (6,8%) supera ampliamente la tasa de descuento, demostrando rentabilidad. La relación beneficio/costo > 1 confirma la viabilidad

TABLA 9: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD						
Escenario	Tarifa (USD/kWh	Inversión (USD)	Ahorro Anual (USD)	VAN (3,5%)	TIR (%)	Payback (años)

	)					
Base	0,22	8.850	668	1.245	6,8	13,2
Optimista	0,25	8.850	774	3.210	9,2	11,4
Pesimista	0,18	8.850	531	-845	4,1	16,7
Mayor inversión (+10%)	0,22	9.735	668	-360	4,9	14,6
Menor inversión (-10%)	0,22	7.965	668	2.130	8,4	11,9
Mayor eficiencia (+15%)	0,22	8.850	768	2.890	8,7	11,5

El proyecto es sensible a la tarifa eléctrica y a la inversión inicial. En el escenario base es rentable (VAN positivo). Si la tarifa baja a 0,18 USD/kWh (con subsidios), el VAN se vuelve negativo, lo que justifica la necesidad de tarifas reales sin subsidios para la viabilidad de proyectos renovables

TABLA 10: COMPARATIVA CON SISTEMA CONVENCIONAL			
Concepto	Sistema Convencional	Sistema Propuesto	Diferencia
Inversión inicial	0 USD	8.850 USD	-8.850 USD
Costo anual energía (ACS + electricidad)	1.150 USD	360 USD	790 USD (ahorro)
Mantenimiento anual	0 USD	105 USD	-105 USD

Costo neto anual	1.150 USD	465 USD	685 USD
Costo a 20 años (sin descontar)	23.000 USD	9.300 USD + 8.850 = 18.150 USD	4.850 USD
Costo a 20 años (VAN 3,5%)	16.450 USD	15.205 USD	1245 USD

A 20 años, considerando el valor temporal del dinero, el sistema propuesto es 1.245 USD más barato que el convencional (ahorro en términos de VAN). Esto demuestra la rentabilidad a largo plazo

TABLA 11: FINANCIAMIENTO PROPUESTO			
Concepto	Valor	Unidad	Explicación
Monto del préstamo	8.850	USD	100% de la inversión
Tasa de interés	3,5	% anual	Línea BICE - Energías Renovables
Plazo	10	años	
Sistema de amortización	Alemán		Cuotas decrecientes
Cuota anual promedio	1.045	USD	
Ahorro anual	685	USD	

neto (año 1)			
Diferencia a financiar (año 1)	360	USD	Durante los primeros 10 años se requiere un aporte adicional de 360 USD/año, que se compensa con los ahorros de los años siguientes.

Con financiamiento blando, el proyecto es factible incluso para familias de ingresos medios, ya que el ahorro energético cubre gran parte de la cuota del préstamo

El sistema modular profesional propuesto (para 5 viviendas) es RENTABLE bajo las siguientes condiciones:

- Inversión por vivienda: 8.850 USD (incluye colector solar de 1,6 m², pared con 10 ladrillos Peltier, baterías de litio, instalación profesional y todos los impuestos).
- Ahorro anual neto: 685 USD (considerando tarifa eléctrica real de 0,22 USD/kWh sin subsidios).

Indicadores financieros (tasa descuento 3,5%):

- VAN: +1.245 USD
- TIR: 6,8%
- Payback simple: 13,2 años
- Payback descontado: 16,2 años

Factores clave de rentabilidad:

- Economías de escala (5 viviendas)
- Tarifa eléctrica real sin subsidios (0,22 USD/kWh)
- Optimización técnica (ΔT=25°C en Peltier, eficiencia 62% en colector)
- Beneficio adicional por aislamiento térmico F
- financiamiento blando (tasa 3,5%)

Análisis de sensibilidad: El proyecto es robusto frente a variaciones en inversión y eficiencia, pero sensible a la tarifa eléctrica. Se recomienda implementar en un contexto de eliminación de subsidios.

Conclusión

El presente trabajo demuestra que la integración de materiales de cambio de fase (PCM) en colectores solares térmicos constituye una solución tecnológica de vanguardia para mitigar la intermitencia del recurso solar y optimizar el almacenamiento energético en entornos residenciales

Se ha validado que el aprovechamiento del calor latente permite un almacenamiento significativamente más compacto y con una temperatura de operación más estable que los sistemas convencionales de calor sensible, logrando reducir el volumen de los depósitos entre un 30% y 40%

Desde el punto de vista de la eficiencia, la incorporación de celdas termogeneradoras (TEG) basadas en el efecto Seebeck permite una captación híbrida que transforma el gradiente térmico en energía eléctrica de forma pasiva, extendiendo la generación incluso a horas nocturnas gracias a la energía acumulada en el núcleo de PCM

Técnicamente, se concluye que el uso de matrices de aluminio poroso es la estrategia más eficaz para superar la baja conductividad de los PCMs orgánicos, incrementando la transferencia de calor entre 10 y 50 veces y acelerando los ciclos de carga y descarga

En términos de viabilidad, Argentina posee un recurso solar excepcional, especialmente en la región del NOA con irradiancias que superan los 5 kWh/m²·día, lo que maximiza la captación frente a promedios mundiales

El análisis financiero para un sistema modular proyectado arroja una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 6,8% y un Valor Actual Neto (VAN) positivo, lo que confirma la rentabilidad de la inversión a largo plazo en un contexto de tarifas energéticas reales

Finalmente, la implementación de esta tecnología contribuye directamente a la descarbonización, evitando la quema de combustibles fósiles y reduciendo el impacto ambiental de la demanda de agua caliente sanitaria y climatización

Este estudio no sólo valida la eficacia del sistema propuesto, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones en almacenamiento térmico avanzado y autonomía energética nacional

Referencias

Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. (s.f.). *ResearchGate*. https://tinyurl.com/ResearchGatePCM

Enesolar. (s.f.). *Mapa de radiación solar Argentina*. https://enesolar.com.ar/mapa-radiacion-solar-argentina/

Introducción a la energía solar térmica y eficiencia: Consumo residencial de gas natural. (s.f.).

Argentina.gob.ar. (s.f.). *Soluciones de almacenamiento de energía en Argentina*. https://www.argentina.gob.ar

TuTiempo.net. (s.f.). *Radiación solar en el noroeste argentino*. https://www.tutiempo.net/radiacion-solar.html

Gobierno de Jujuy. (s.f.). *Boletín de radiación Jujuy*. https://boletinoficial.jujuy.gob.ar/?p=322524

¿Cómo enfriar casas tradicionales sin aire acondicionado? La ciencia detrás de los “ladrillos inteligentes”. (s.f.).

Strategic design of PCM integrated burnt clay bricks: Potential for cost-cutting measures for air conditioning and carbon dioxide extenuation. (s.f.). *ScienceDirect*.

Informe sobre sistemas de colectores solares integrados con tecnología de almacenamiento térmico de materiales de cambio de fase y sus aplicaciones residenciales. (s.f.). *Bohrium*. https://www.bohrium.com/en/paper/read?paperId=8125175858106204 19&publicationId=4185&activeReadTab=chat

A comprehensive review of thermal energy storage. (s.f.).

Censo nacional de energía térmica. (s.f.). https://tinyurl.com/CensoNacionalEnergiaTermica

Evaluation of solar collector designs with integrated latent heat thermal energy storage: A review. (s.f.). *ScienceDirect*.

Effect of novel phase change material (PCM) encapsulated design on thermal performance of solar collector. (s.f.). *ScienceDirect*.

Tecnología de refrigeración pasiva de módulos solares basada en PCM, aletas disipadoras y agua. (s.f.).

Photovoltaic thermal collectors integrated with phase change materials: A comprehensive analysis. (s.f.).

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13*(2).

International Energy Agency. (s.f.). *Energy storage: Thermal energy storage technology brief*.

Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (s.f.). Review on thermal energy storage with phase change materials.

Lin, W., Ma, Z., Ren, H., Liu, J., & Li, K. (2019). Solar thermal energy storage using paraffins as phase change materials. En *IntechOpen*.

Recent advances, development, and impact of using phase change materials as thermal energy storage in different solar energy systems: A review. (s.f.).

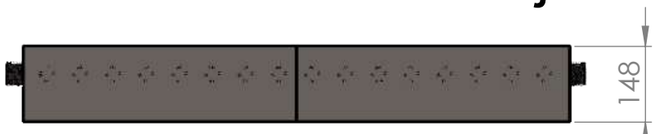
Thermal behavior of composite material based on phase change material/plaster as thermal energy storage in multilayer wall: Experimental study. (s.f.). *ACS Omega*.

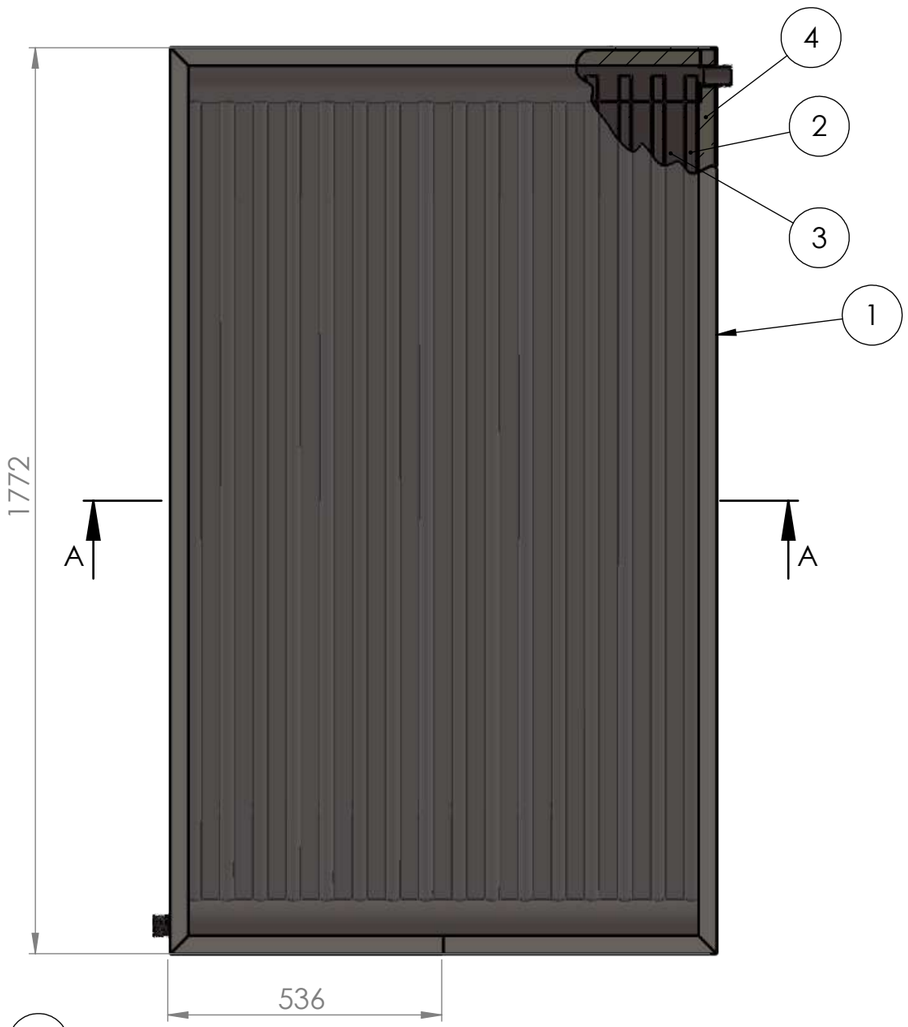
Anexo

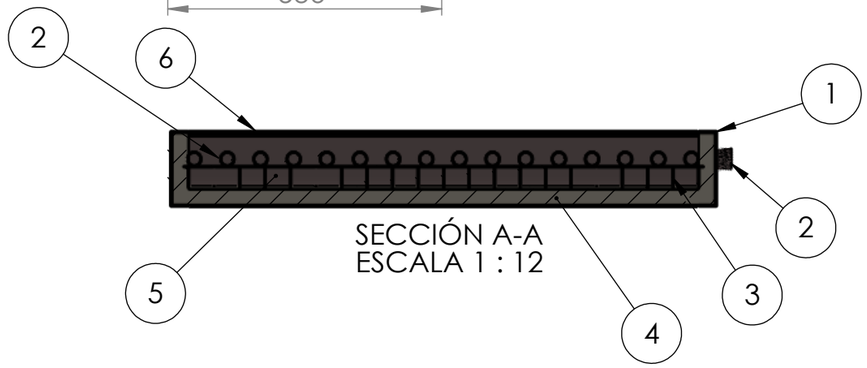
Plano Conjunto Colector Solar

Plano Conjunto Pared PCM + Celdas TEG

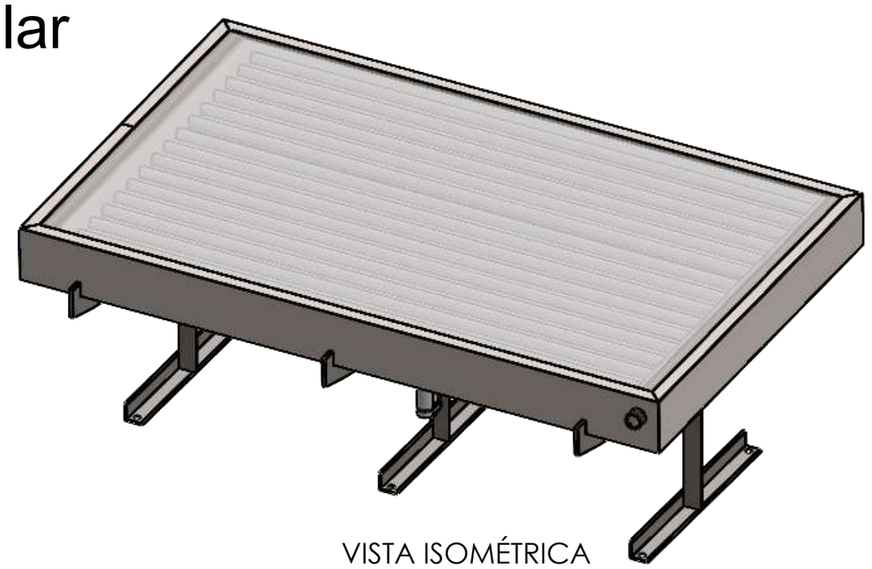
Anexo: Plano Conjunto Colector Solar



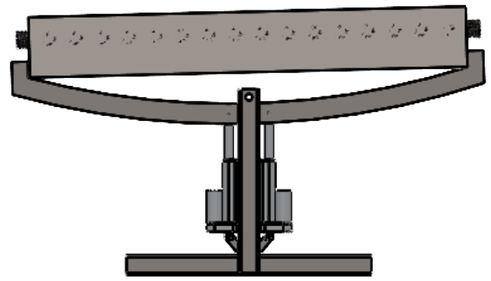




SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 12



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA LATERAL

POSICIÓN	DENOMINACION	MATERIAL	CANTIDAD
6	PLACA DE VIDRIO	VIDRIO TEMPLADO	2
5	PARAFINA	-	100 L
4	AISLACIÓN	POLIURETANO	1
3	PLACA ABSORBENTE	COBRE	1
2	TUBOS COLECTORES	COBRE	16
1	CARCASA	ALUMINIO	1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO

A3

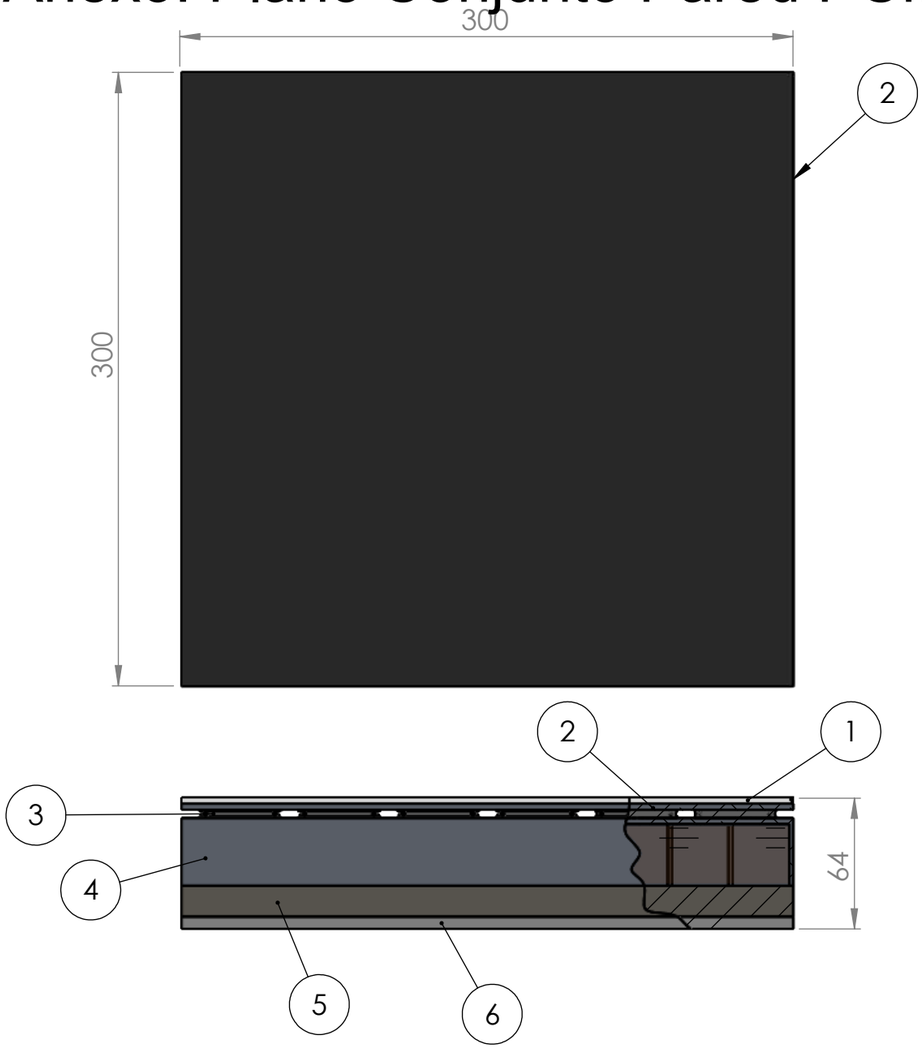
PESO:

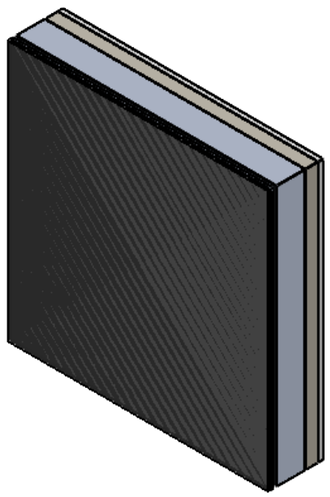
ESCALA:1:20

HOJA 1 DE 1

PLANO COLECTOR INTEGRADO

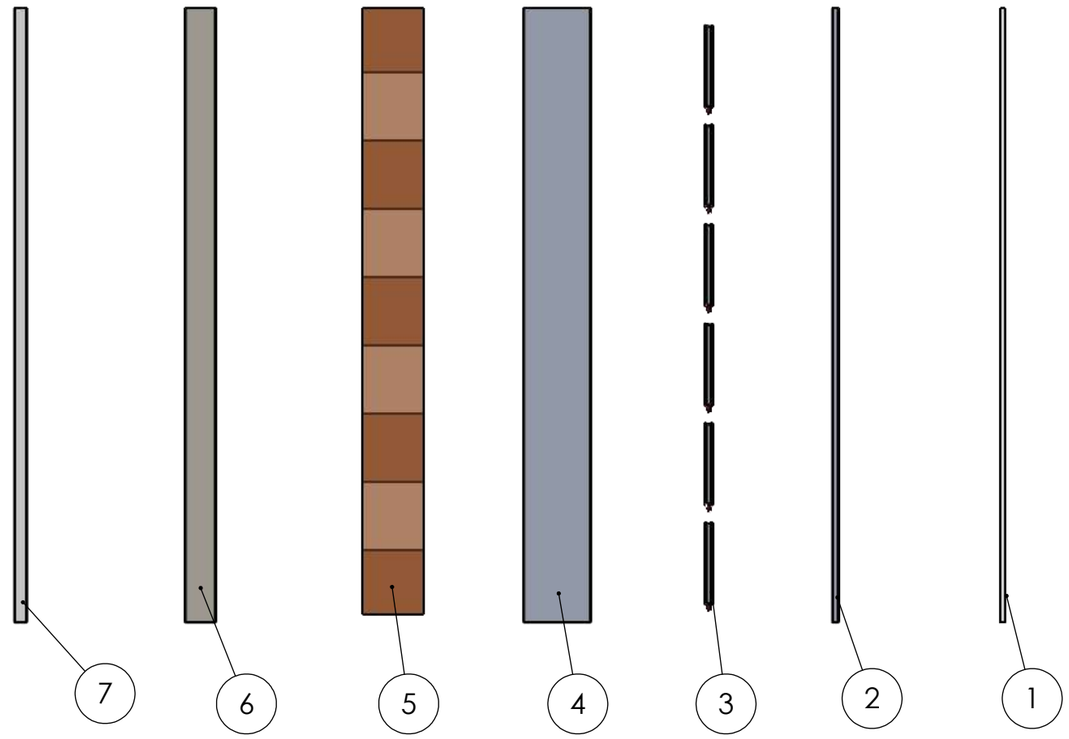
Anexo: Plano Conjunto Pared PCM + Celdas TEG





VISTA ISOMETRICA

VISTA EXPLOSIONADA



POSICIÓN	DENOMINACION	MATERIAL	CANTIDAD
7	PLACA DE ACABADO	FIBROCEMENTO	1
6	PLACA POLIURETANICA	POLURETANO	1
5	PARAFINA	-	2,54 L
4	DISIPADOR DE CALOR	ALUMINIO	1
3	CELDAS TEG	-	36
2	PLACA ABSORBENTE	COBRE	1
1	PLACA DE VIDRIO	VIDRIO TEMPLADO	1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO

A3

PLANO LADRILLO TEG

PESO:

ESCALA:1:5

HOJA 1 DE 1