

# Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

## Herramienta para comparación de instalaciones solares para producción de energía térmica

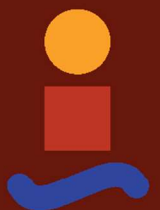
Autor: Pablo Naredo Bernardos

Tutor: Isidoro Lillo Bravo

José María Delgado Sánchez

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2025





Trabajo Fin de Grado  
en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# Herramienta para comparación de instalaciones solares para producción de energía térmica

Autor:

Pablo Naredo Bernardos

Tutor:

Isidoro Lillo Bravo

Catedrático

José María Delgado Sánchez

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Grado: Herramienta para comparación de instalaciones solares para producción de energía  
térmica

Autor: Pablo Naredo Bernardos

Tutor: Isidoro Lillo Bravo  
José María Delgado Sánchez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2025

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor por su constante orientación y apoyo durante el desarrollo de este trabajo. A la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla y a todos mis profesores, por los conocimientos y recursos brindados a lo largo de mi formación. Asimismo, agradezco a la Universidade Federal do Ceará, donde tuve la oportunidad de ampliar mi aprendizaje académico y personal durante mi estancia de intercambio.

Finalmente, mi gratitud más profunda es para mi familia y amistades, por su apoyo incondicional y acompañamiento a lo largo de todo este camino académico.

*Pablo Naredo Bernardos*

*Sevilla, 2025*



El presente Trabajo Fin de Grado se centra en el desarrollo de una herramienta software que permite al usuario comparar diferentes tecnologías para la producción de calor en la industria: sistemas fotovoltaicos con bomba de calor, fotovoltaicos con resistencia eléctrica, soluciones híbridas y distintas tecnologías termosolares tanto de concentración como sin concentración. La herramienta está diseñada para evaluar de manera integral las distintas alternativas, considerando parámetros técnicos, energéticos y económicos.

El objetivo principal es proporcionar una plataforma que facilite la toma de decisiones en entornos industriales, permitiendo identificar la tecnología más adecuada en función de la demanda térmica específica, las condiciones de operación y el rango de temperatura requerido. Para ello, el software integra modelos de simulación que permiten estimar la producción energética, el rendimiento global del sistema, la fracción de cobertura de la demanda y los costes asociados, incluyendo tanto la inversión inicial como los costes de operación y mantenimiento.

Asimismo, se analizan distintos escenarios de aplicación, abarcando temperaturas de baja, media y alta, con el fin de cubrir un espectro amplio de procesos industriales que requieren energía térmica. De este modo, la herramienta no solo se plantea como un comparador técnico, sino también como un soporte para la evaluación de la viabilidad económica y ambiental de cada tecnología, fomentando el uso de fuentes renovables en sustitución de combustibles fósiles.

Con ello, se ofrece una herramienta práctica y versátil, orientada a promover el aprovechamiento de energías renovables en el sector industrial y a apoyar la transición hacia sistemas productivos más sostenibles, eficientes y competitivos. Además, se busca contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al cumplimiento de los objetivos de descarbonización marcados a nivel nacional e internacional. La plataforma pretende, en última instancia, servir como guía para ingenieros, gestores energéticos y responsables de la toma de decisiones en la industria, ofreciendo un recurso accesible y riguroso que combine análisis técnico, económico y ambiental en un único entorno integrado.



# ABSTRACT

---

The main objective of this project is to provide a platform that facilitates decision-making in industrial environments, allowing the identification of the most suitable technology according to the specific thermal demand, operating conditions, and required temperature range. To achieve this, the software integrates simulation models that estimate energy production, overall system performance, demand coverage, and associated costs, including both initial investment and operation and maintenance expenses.

Furthermore, different application scenarios are analyzed, covering low, medium, and high temperature ranges in order to address a wide spectrum of industrial processes requiring thermal energy. In this way, the tool is not only conceived as a technical comparator, but also as support for assessing the economic and environmental feasibility of each technology, thus encouraging the use of renewable sources as substitutes for fossil fuels.

As a result, the project delivers a practical and versatile tool designed to promote the adoption of renewable energies in the industrial sector and to support the transition towards more sustainable, efficient, and competitive production systems. In addition, it aims to contribute to the reduction of greenhouse gas emissions and to the achievement of decarbonization targets established at both national and international levels. Ultimately, the platform seeks to serve as a valuable guide for engineers, energy managers, and decision-makers in the industry, offering an accessible and rigorous resource that combines technical, economic, and environmental analysis in a single integrated environment.

# ÍNDICE

---

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Figuras	xvi
Notación	xx
1 Introducción	1
2 Estado del arte	11
2.1 <i>Energías renovables</i>	11
2.2 <i>Energía solar térmica</i>	11
2.2.1 Principio de funcionamiento	11
2.2.2 Tipos de captadores solares térmicos	12
2.3 <i>Energía solar fotovoltaica</i>	15
2.3.1 Efecto fotovoltaico y principio del funcionamiento de una célula solar	15
2.3.2 Componentes de un sistema fotovoltaico	16
2.3.3 Tipos de instalaciones solares fotovoltaicas	18
2.2.5 Energía Fotovoltaica para la producción de calor	19
2.4 <i>Bomba de calor</i>	20
2.4.1 Principio de funcionamiento	20
2.4.2 Componentes en bombas de calor	21
2.4.3 Tipos de bombas de calor	22
2.5 <i>Resistencias eléctricas, efecto Joule</i>	24
2.5.1 Principio de funcionamiento	24
2.5.2 Tipos de Resistencias	25
2.6 <i>Almacenamiento energético</i>	27
2.6.1 Tipos de almacenamiento térmico	28
2.6.2 Tipos de almacenamiento eléctrico	30
3 Casos de Estudio	31
3.1 <i>Tecnologías consideradas</i>	31
3.2 <i>Generación de calor a 45 °C</i>	32
3.3 <i>Generación de calor a 120 °C</i>	33
3.4 <i>Generación de calor a 180 °C</i>	33
3.5 <i>Generación de calor a 250 °C</i>	33
3.6 <i>Almacenamiento</i>	34
3.6.1 Tipos de almacenamiento térmico	34
4 Metodología de Cálculo	36
4.1 <i>Cálculos técnicos</i>	36
4.1.1 Cálculos energía generada por superficie de captación (Fichero Excel)	36
4.1.2 Balance Energético (Modelo C#)	37
4.2 <i>Análisis económico</i>	43
5 Interfaz gráfica de la aplicación	48
5.1 <i>Tecnologías utilizadas: WPF, .NET y C#</i>	48
5.2 <i>Pestaña 1 – General</i>	48
5.2.1 Datos relativos a la generación horaria de energía (Fichero Excel)	49
5.3 <i>Pestaña 2 – Parámetros Económicos.</i>	52

5.4	<i>Pestaña 3 – Resultados</i>	54
6	Aplicación práctica	55
6.1	<i>Producción de calor a 50 °C para ACS en un Hospital</i>	55
6.1.1	Datos relativos al perfil horario de generación y demanda térmica (Fichero Excel)	55
6.1.2	Datos introducidos directamente en la interfaz de la aplicación	56
6.1.3	Resultados Iniciales	59
6.1.4	Análisis de sensibilidad	59
6.2	<i>Producción de calor a 250 °C para esterilización en planta de conservas</i>	63
6.2.1	Datos relativos al perfil horario de generación y demanda térmica (Fichero Excel)	63
6.2.2	Datos introducidos directamente en la interfaz de la aplicación	65
6.2.3	Resultados Iniciales	66
6.2.4	Análisis de sensibilidad	66
7	Conclusión	71
	Referencias	72
	Glosario	74

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1: Flujos de suministro y consumo energético	1
Figura 1-2: Tecnologías de generación térmica por rango de temperatura	2
Figura 2-1: Rangos de temperaturas de operación de las diferentes tecnologías de colectores solares	12
Figura 2-2: Captador plano de alto vacío	13
Figura 2-3: Captador con tubo de vacío	14
Figura 2-4: Colector cilindro parabólico	15
Figura 2-5: Colector Fresnel, Ello Solar Power Plant, Llo France	15
Figura 2-6: Tecnología del módulo – El panel solar	17
Figura 2-7: Instalación Fotovoltaica Conectada a la Red	18
Figura 2-8: Sistema fototérmico híbrido: apoyo fotovoltaico a bomba de calor para ACS	19
Figura 2-9: Principio de una bomba de calor	20
Figura 2-10: Ciclo de compresión de vapor en una bomba de calor	21
Figura 2-11: Tipos de bomba de calor según distribución del calor	22
Figura 2-12: Rangos de temperatura de operación de bomba de calor	23
Figura 2-13: Calefactor eléctrico por efecto Joule	25
Figura 2-14: Resistencias eléctricas de inmersión	26
Figura 2-15: Calentador eléctrico de circulación con resistencias	26
Figura 2-16: Módulo de calentamiento	27
Figura 2-17: Manta calefactora eléctrica para bidones	27
Figura 2-18: Estratificación térmica vs. mezcla en depósitos de agua caliente	29
Figura 2-19: Proceso de carga de carga y descarga en una batería de ion-litio	30
Figura 3-1: FV y resistencia eléctrica	31
Figura 3-2: FV y bomba de calor	31
Figura 3-3: FV, resistencia eléctrica y bomba de calor	32
Figura 3-4: Tecnologías termosolares	32

Figura 3-5: Tabla resumen casos de estudio	34
Figura 3-6: Almacenamiento térmico con resistencia eléctrica	34
Figura 3-7: Almacenamiento térmico. Aceites térmicos	35
Figura 4-1: Cálculo energía generada por superficie de captación	37
Figura 4-2: Superficie captadora. Tecnologías termosolares	37
Figura 4-3: Cálculo energía generada	38
Figura 4-4: Distribución de la energía generada	40
Figura 4-5: Balance energético en el deposito	41
Figura 4-6: Distribución de la demanda	41
Figura 5-1: Pestaña General. Datos generales	47
Figura 5-2: Pestaña General. Tecnologías para Comparar.	48
Figura 5-3: Pestaña General. Bomba de Calor y Resistencia	48
Figura 5-4: Fichero Excel. Demanda horaria media por mes (kWh)	48
Figura 5-5: Fichero Excel. Perfil horario Energía Eléctrica FV (kWh)	49
Figura 5-6: Fichero Excel. Superficie captadora tecnologías solares (m <sup>2</sup> )	49
Figura 5-7: Fichero Excel. Perfil horario energía FV por superficie de captación (kWh/m <sup>2</sup> )	49
Figura 5-8: Perfil horario de la energía térmica generada (kWh)	50
Figura 5-9: Perfil horario de la energía térmica generada por superficie de captación (kWh/m <sup>2</sup> )	50
Figura 5-10: Fichero Excel. Precio kWh (€/kWh)	50
Figura 5-11: Fichero Excel. Perfil horario radiación	51
Figura 5-12: Parámetros Económicos. General	51
Figura 5-13: Parámetros Económicos. Datos tecnologías	52
Figura 5-14: Parámetros Económicos. Bomba de Calor	52
Figura 5-15: Parámetros Económicos. Almacenamiento Térmico	52
Figura 5-16: Resultados	53
Figura 6-1: Superficies captadoras (m <sup>2</sup> )	55
Figura 6-2: Caso 1.Instalaciones seleccionados herramienta SAM	55

Figura 6-3: Caso 1. Superficie Captadora Instalaciones (m <sup>2</sup> )	56
Figura 6-4: Caso 1. Perfil horario demanda térmica (kWh)	56
Figura 6-5: Caso 1. Tecnologías que comparar	56
Figura 6-6: Caso 1. Superficie captadora común para todas las instalaciones (m <sup>2</sup> )	57
Figura 6-7: Parámetros Económicos. Tecnologías Solares [17][18]	57
Figura 6-8 Parámetros Económicos. Bomba de calor y Resistencia [19]	57
Figura 6-9: Parámetros Económicos. Almacenamiento Térmico [20]	57
Figura 6-10: Caso 1. Parámetros Económicos 1	58
Figura 6-11: Caso 1. Parámetros Económicos 2	58
Figura 6-12: Caso 1. Parámetros Económicos 3	58
Figura 6-13: Caso 1. Parámetros Económicos 4	59
Figura 6-14: Caso 1. Resultados Iniciales	59
Figura 6-15: Caso 1. Relación entre superficie de captación y rendimiento	58
Figura 6-16: Caso 1. Relación entre superficie de captación y demanda cubierta	58
Figura 6-17: Caso 1. Relación entre superficie de captación y VAN	59
Figura 6-18: Caso 1. Relación entre capacidad de almacenamiento y rendimiento	59
Figura 6-19: Caso 1. Relación entre capacidad de almacenamiento y demanda cubierta	60
Figura 6-20: Caso 1. Relación entre capacidad de almacenamiento y VAN	60
Figura 6-21: Caso 2. Instalaciones seleccionadas herramienta SAM	63
Figura 6-22: Caso 1. Superficie Captadora Instalaciones (m <sup>2</sup> )	64
Figura 6-23: Perfil horario demanda térmica (kWh)	65
Figura 6-24: Caso 2. Tecnologías que comparar	64
Figura 6-25: Caso 25. Superficie captadora común para todas las instalaciones (m <sup>2</sup> )	64
Figura 6-26: Caso 2. Parámetros Económicos	65
Figura 6-27: Caso 2. Parámetros Económicos	65
Figura 6-28: Caso 2. Parámetros Económicos	65
Figura 6-29: Caso 2. Parámetros Económicos	65

Figura 6-30: Caso 2. Resultados iniciales	65
Figura 6-31: Caso 2. Relación entre superficie de captación y rendimiento	66
Figura 6-32: Caso 2. Relación entre superficie de captación y porcentaje de demanda cubierta	67
Figura 6-33: Caso 2. Relación entre superficie de captación y VAN	67
Figura 6-34: Caso2. Relación entre capacidad de almacenamiento y rendimiento	68
Figura 6-35: Caso 2. Relación entre capacidad de almacenamiento y demanda cubierta	69
Figura 6-36: Caso 2. Relación entre capacidad de almacenamiento y VAN	69

# Notación

---

°C	Grados Celsius
W	Vatios
A	Amperios
V	Voltios
$\Omega$	Ohmios
J	Julios
s	Segundos
m	Metros
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
kWp	Kilovatio pico
€	Euro
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
kg	kilogramo
$\Delta T$	Gradiente de temperatura
min	Mínimo
máx.	Máximo
$\Sigma$	Sumatorio
d	Tasa de descuento
%	Porcentaje

# 1 INTRODUCCIÓN

El SET PLAN por sus siglas en inglés (“Strategic Energy Technology Plan”) establece el plan estratégico energético de la Unión Europea, con objetivo final de apoyar la innovación y desarrollo tecnológico en la transición energética, desde un sistema basado en combustibles fósiles, a un sistema energético renovable. Este Plan, lanzado originalmente en el año 2007, ha sido revisado en diferentes ocasiones, a lo largo de los últimos años, para adaptarse tanto a las condiciones del cambio climático, así como los diferentes cambios geopolíticos. La última revisión del SET-PLAN fue realizada en octubre de 2023, con el objeto de alinear sus objetivos con los planes European Green Deal y REPower EU Plan. Tras la invasión de Ucrania, la inestabilidad geopolítica y la dependencia energética de Europa se han puesto de manifiesto. Como se puede ver en la figura 1, la UE importa prácticamente el 86% del gas natural que consume, siendo los principales proveedores Noruega (29%), Estados Unidos (19%), Rusia (16%) y Argelia (16%). La iniciativa comunitaria REPowerEU tiene como objetivos una transición energética rápida, limpia y que permita reducir la dependencia energética de mercados externos, mediante la diversificación del suministro de gas, acelerar la transición ecológica, sustituyendo los combustibles fósiles, no solo en el sector doméstico, sino también en el sector industrial.

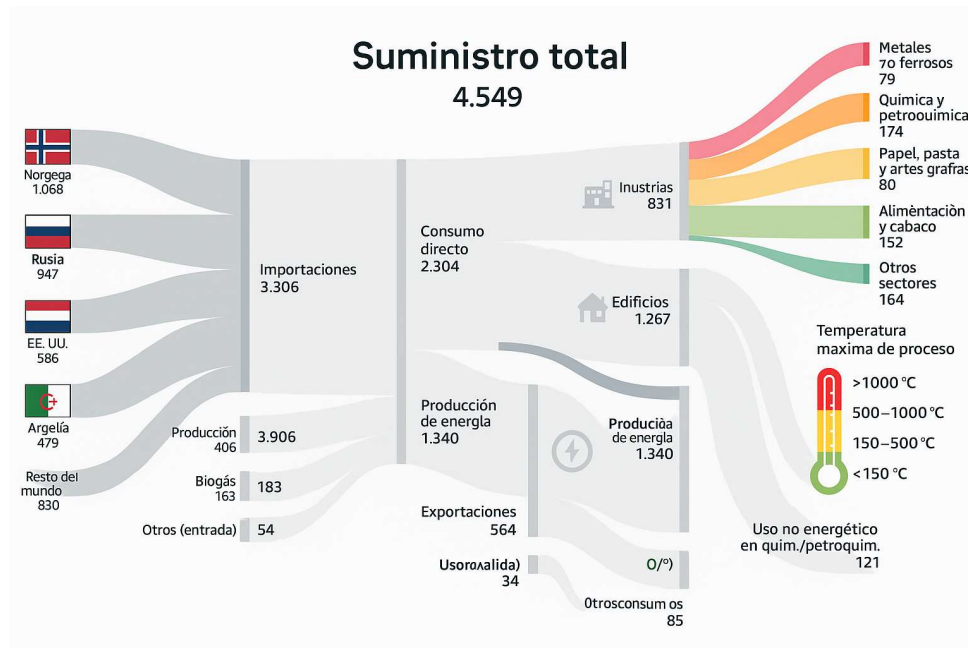


Figura 1-1: Flujos de suministro y consumo energético

Como se puede ver en el mismo gráfico el consumo directo del gas natural para producción de calor representa así mismo el 50%, por lo que abordar la producción de este calor con fuentes renovables, ayudaría a la reducción de la dependencia energética, así como a la descarbonización de una manera significativa.

Con el objeto de analizar las diferentes posibilidades para alcanzar dichos objetivos, en el presente proyecto se desarrolla una herramienta software que facilita el análisis técnico-económico de la descarbonización en la producción de calor mediante el uso de la energía solar utilizando diferentes tecnologías, solar térmica y fotovoltaica, así como para diferentes escenarios de la temperatura requerida para el suministro de la fuente de calor. En el caso de la energía fotovoltaica, la producción de calor pasa por la electrificación, mediante el uso de bombas de calor o resistencia efecto Joule, mediante que en caso de la energía solar térmica el calor se produce directamente mediante el calentamiento del fluido térmico. En la

figura 1-1, se representa esquemáticamente las diferentes soluciones renovables, en función de la temperatura, así como sector y tipo de industria. [1]

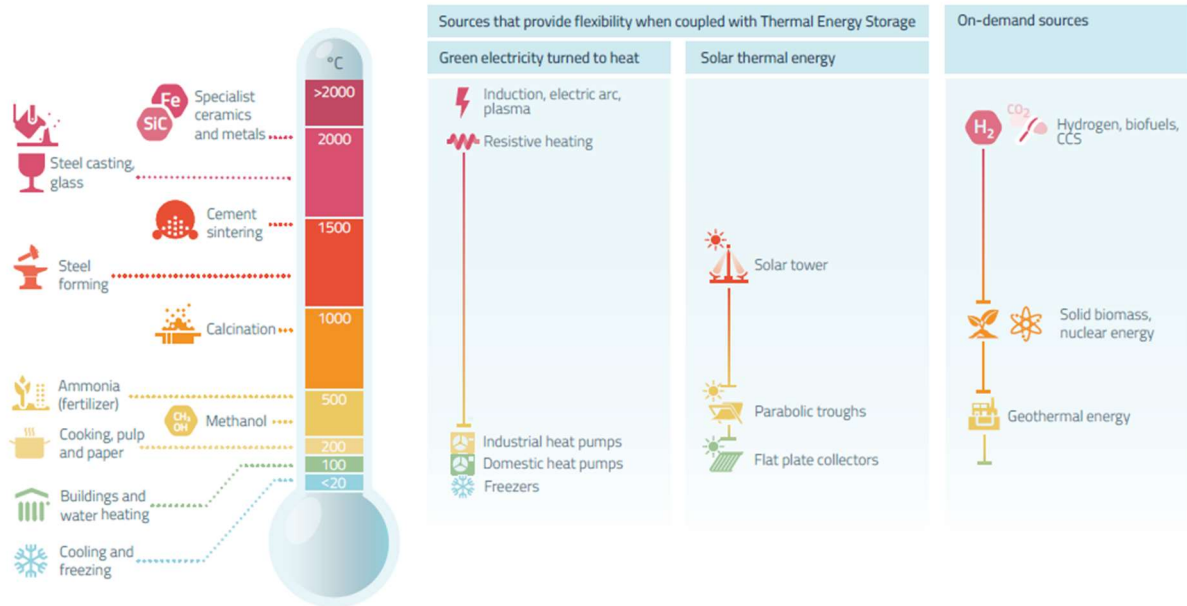


Figura 1-2: Tecnologías de generación térmica por rango de temperatura

## 2 ESTADO DEL ARTE

---

Para la elaboración de este apartado se ha realizado una revisión de fuentes técnicas y bibliográficas con el fin de contextualizar este Trabajo Fin de Grado en el ámbito de las tecnologías de generación de calor mediante energías renovables solares.

El capítulo recoge una visión general de las soluciones actuales, su grado de madurez y sus principales aplicaciones, considerando tanto aspectos técnicos como limitaciones de uso.

### 2.1 Energías renovables

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) señala que el uso de la energía solar no se limita únicamente a la generación de electricidad, sino que también desempeña un papel creciente en la producción de calor, que representa una parte fundamental de la demanda energética mundial, especialmente en los sectores residencial, industrial y de servicios.

La energía solar térmica, también conocida como termosolar de baja y media temperatura, utiliza colectores solares para calentar agua o fluidos de proceso de forma directa. Esta tecnología es especialmente efectiva en aplicaciones como agua caliente sanitaria en viviendas y edificios, calefacción de espacios y procesos industriales que requieren calor de hasta 150–200 °C, como lavado, secado o pasteurización. Según la IEA, la solar térmica es una solución madura y económicamente competitiva, aunque su despliegue todavía es desigual entre regiones y depende de políticas de apoyo y medidas de eficiencia energética complementarias.

Por otro lado, la energía solar fotovoltaica, tradicionalmente orientada a producir electricidad, también contribuye indirectamente a la producción de calor mediante sistemas eléctricos que alimentan resistencias, bombas de calor o calefactores. La combinación de fotovoltaica con bombas de calor eléctricas de alta eficiencia está emergiendo como una de las vías más prometedoras para descarbonizar la calefacción de edificios y la producción de agua caliente, gracias a la reducción de costes de los paneles fotovoltaicos, la mejora del rendimiento estacional de las bombas de calor y la posibilidad de autoconsumo que reduce la dependencia de combustibles fósiles.

En el ámbito industrial, se están desarrollando sistemas termosolares de concentración (CST, Concentrated Solar Power) que permiten generar calor a temperaturas más altas, incluso superiores a 400 °C, con aplicaciones en procesos industriales más intensivos en energía y en la generación de vapor mediante turbinas.

La IEA remarca que la aceleración del uso de energía solar, tanto térmica como fotovoltaica, para la producción de calor es clave para cumplir los objetivos de reducción de emisiones, ya que el consumo térmico supone aproximadamente la mitad de la demanda energética mundial y sigue dependiendo en gran medida de combustibles fósiles. Por este motivo, el informe insta a ampliar políticas de apoyo, incentivos fiscales, estándares de construcción y financiamiento de proyectos solares integrados, con el fin de desbloquear el enorme potencial de estas tecnologías. [2]

### 2.2 Energía solar térmica

#### 2.2.1 Principio de funcionamiento

La tecnología termosolar es aquella tecnología que utiliza la energía que llega a la superficie terrestre proveniente del astro solar y la transforma en energía térmica, mediante el calentamiento de un fluido calor-aportador, llamado también por sus siglas en inglés HTF, “Heat Transfer Fluid”.

La primera clasificación que se puede hacer dentro de esta tecnología es tecnología de concentración (CST) o no concentración (ST). Cuando hablamos de energía solar de concentración CST, nos estamos refiriendo a

sistemas que son capaces de concentrar la energía incidente, redirigiendo la radiación solar incidente, mediante superficie reflectoras (espejos) en un receptor de menor área, donde se calienta el fluido HTF. Este tipo de sistemas únicamente pueden aprovechar la radiación cuya dirección es conocida, es decir, la radiación directa normal, denominada DNI (Direct Normal Irradiance). Además, dentro de la tecnología CST, los colectores pueden incorporar mecanismos de seguimiento solar, de uno o dos ejes, para maximizar la captación de energía.

Para hacer este análisis del estado del arte y próximo capítulo sobre mercado, se parte del reporte de la tarea 68, del programa Solar Heating and Cooling SHC, perteneciente a la Agencia Internacional de la Energía. Aunque dicha tarea específicamente aborda es estado del arte de los colectores aplicados a District Heating, como se puede ver en la siguiente gráfica, aborda temperaturas mayores, ya que es posible siempre posible, reducir la misma mediante intercambiadores de calor. Se ha tomado un único report con el objeto de utilizar la misma metodología para comparativa de eficiencias, en este caso concreto se utiliza la certificación conforme a Solarkeymark. [2]

En la siguiente figura se clasifican los diferentes tipos de colectores y la temperatura máxima alcanzable.

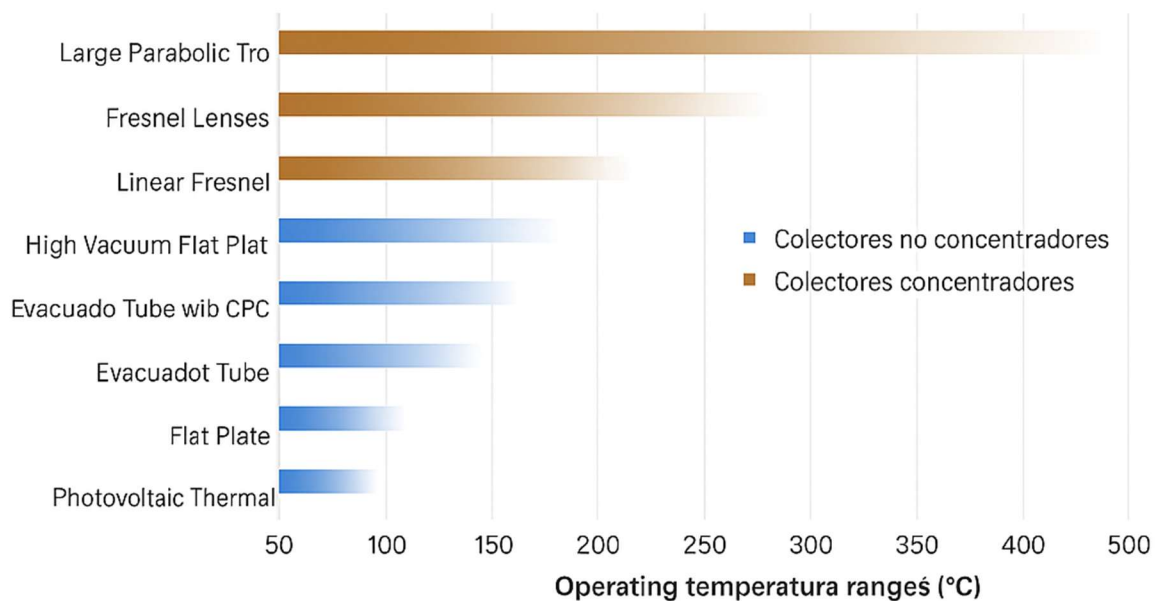


Figura 2-1: Rangos de temperaturas de operación de las diferentes tecnologías de colectores solares

## 2.2.2 Tipos de captadores solares térmicos

A continuación, se hace una breve descripción de cada uno de los colectores, para un rango de temperatura de 50 a 250 °C.

### 2.2.2.1 Captadores planos (ST).

Este tipo de colectores, utilizados para aplicaciones de baja temperatura, está formado por una cubierta de vidrio para protección, una placa metálica con recubrimiento selectivo absorbedor (pintura o tratamiento especial), a la cual van soldados o unidos los tubos de cobre por donde circula el fluido de trabajo (HTF, generalmente agua y glicol), aislamiento térmico y una carcasa de aluminio para protección y aislamiento del conjunto. La cubierta de vidrio puede ser simple o doble, y normalmente incluye un tratamiento antirreflectante. La ventaja del doble vidrio es que disminuye las pérdidas térmicas al ambiente, aunque a costa de un mayor peso y, por tanto, un mayor coste. [2]

Las ventajas de este tipo de colectores es su coste bajo, la disponibilidad de fabricantes a nivel europeo, su madurez tecnológica, y la posibilidad de reciclado debido a su sencillez en el diseño. [2]

### 2.2.2.2 Captadores planos de alto vacío (ST).

Un diseño especial de los captadores planos es el captador plano de alto vacío, donde la particularidad es que se crea vacío (por debajo de 0,1 Pa) en la cámara contenedora de la placa absorción, mediante métodos patentados por diferentes proveedores, como es TVP Solar, representado en la figura 2-2. Este vacío reduce considerablemente las pérdidas térmicas pudiéndose llegar hasta temperaturas de 180°C sin seguimiento solar (hoja de datos TVP solar).

Las ventajas de este tipo colector es la mayor eficiencia debido al aislamiento térmico que crea el vacío. Esta bastante extendido su uso, pero no tanto como otras tecnologías. [2]

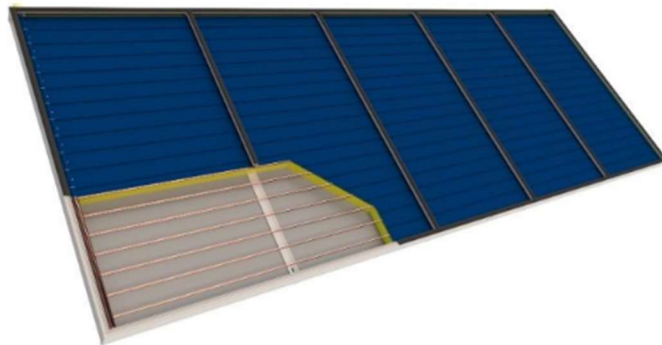


Figura 2-2: Captador plano de alto vacío

### 2.2.2.3 Captadores con tubo de vacío (ST).

Los captadores de tubo de vacío, están formados por una hilera de tubos concéntricos en los que se ha realizado el vacío entre el tubo exterior e interior para disminuir las pérdidas por convección en relación con los captadores planos.

En referencia al tipo de tubo concéntrico se dividen en dos tipos: captadores Sydney o captadores de vidrio simple. En los primeros los dos tubos concéntricos son de vidrio, mientras que los segundos el tubo interior es de acero. En ambos casos, el tubo interior lleva pintura selectiva para mejorar la absorción y el vacío se genera entre ambos tubos.

En referencia a como se realiza la transferencia de calor existen dos esquemas principales.

#### **Flujo directo.**

Funciona como los captadores planos, circulando el HTF directamente por el tubo de vacío. Es el más eficiente, pero tiene la desventaja que, al estar colocados los tubos en serie, si se rompe un tubo el módulo completo se verá afectado.

#### **Flujo indirecto o Heat Pipe.**

En este sistema se utiliza un fluido intermedio que se evapora al calentarse ascendiendo hasta el extremo superior del tubo donde se encuentra un intercambiador que transfiere el calor al HTF. Una vez transferido el calor vuelve a enfriarse, y condensarse. Este sistema tiene una ventaja ya que una vez evaporado todo el fluido del tubo, este absorbe mucho menos calor evitando sobre calentamiento en los climas más calurosos.

Y por último los tubos de vacío pueden ir equipados con un concentrador de la radiación colocado en la parte trasera de cada tubo. Por sus siglas en inglés se denominan tubos de vacío con CPC, o simplemente colectores CPC (Compound Parabolic Concentrator) y están formado por una superficie reflectora con forma geométrica cilíndrica de forma que sin disponer de seguimiento pueden aumentar el rendimiento del captador. [2]

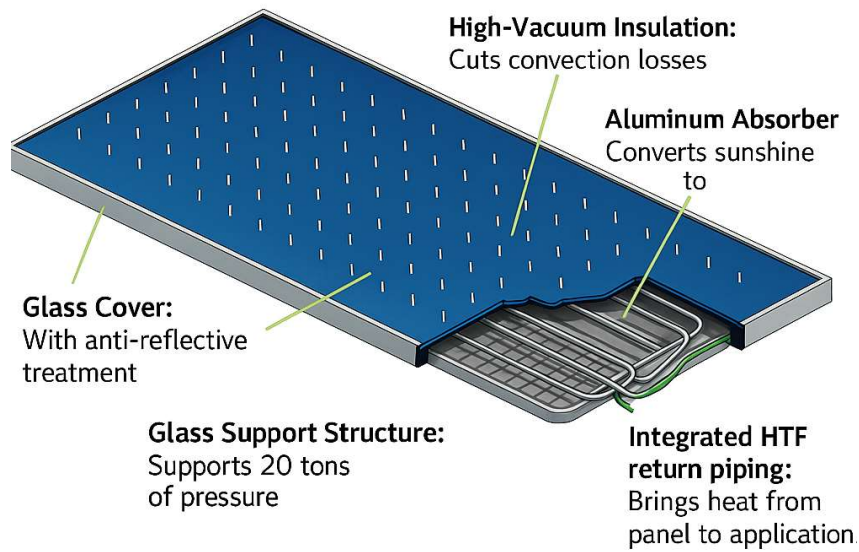


Figura 2-3: Captador con tubo de vacío

#### 2.2.2.4 Colector cilindro parabólico (CST).

Los captadores cilindro-parabólicos constan de un concentrador reflectivo de geometría cilíndrica y sección recta parabólica, en cuya línea focal se ubica un receptor tubular sobre el que, gracias a las propiedades ópticas de la parábola, se concentra linealmente la radiación solar (ver figura).

Los captadores cilindro-parabólicos se han utilizado tradicionalmente en las plantas termosolares de generación eléctrica. En ellas, muchas filas de captadores de grandes dimensiones permiten alcanzar la temperatura y la potencia térmica necesaria para operar un ciclo de vapor y generar electricidad. Estos colectores (“large”) tienen una apertura típica de 6-7.5, longitudes de 100 y 150 m, teniendo unas temperaturas máximas de operación de 300-400° C.

Este mismo concepto, pero usando unidades de captación más compactas, más fáciles de implementar en espacios industriales reducidos, es una alternativa para las aplicaciones de media temperatura 130°-250°C, y por tanto generar calor de proceso para la industria. La apertura típica de estos colectores es de entre 3m-1m, de longitud entre 2 y 10 m.

Dentro de esta tecnología existen muchas variantes relacionadas con el diseño del tubo absorbedor, con o sin vacío, combinado con la existencia de cubierta de vidrio, que puede servir para protección de la superficie reflectora. [2]

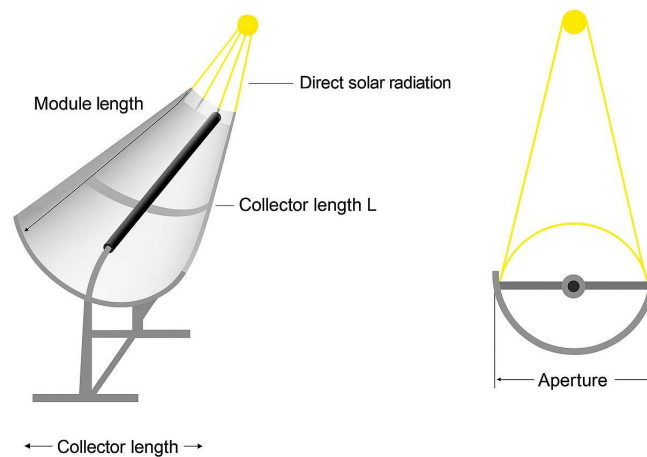


Figura 2-4: Colector cilindro parabólico

### 2.2.2.5 Colector Fresnel (CST)

Los colectores solares lineales Fresnel se basan en hileras de espejos planos que giran en un solo eje para seguir la trayectoria del sol y concentrar la radiación sobre un tubo absorbedor lineal, normalmente apoyado por un reflector secundario que reduce las pérdidas ópticas. Esta tecnología permite alcanzar temperaturas medias y altas, del orden de 200 a 300 °C, lo que la hace adecuada para aplicaciones de calor de proceso industrial, generación de vapor, climatización por absorción y su integración en redes de calefacción urbana. Entre sus ventajas destacan la simplicidad constructiva frente a los colectores cilindro-parabólicos, ya que el uso de espejos planos abarata la fabricación y el montaje, así como la posibilidad de limpieza automatizada con robots. El seguimiento solar asegura un suministro más constante a lo largo del día y la posibilidad de desviar los espejos en caso de riesgo de sobrecalentamiento. Su eficiencia óptica ronda el 70 %, con rendimientos útiles cercanos al 40 % para diferencias de temperatura elevadas, aunque presentan una fuerte dependencia de la radiación directa y requieren grandes superficies de terreno plano, lo que limita su implantación en entornos urbanos densos [2]



Figura 2-5: Colector Fresnel, Ello Solar Power Plant, Llo France

## 2.3 Energía solar fotovoltaica

### 2.3.1 Efecto fotovoltaico y principio del funcionamiento de una célula solar

El efecto fotovoltaico consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica mediante dispositivos denominados células solares. Este efecto puede producirse en sólidos, líquidos o gases, si bien en la actualidad los mejores rendimientos se obtienen en materiales sólidos. La base de este fenómeno radica en que determinados materiales semiconductores poseen la capacidad de absorber la energía de los fotones que

inciden sobre ellos y, como consecuencia, liberar electrones que pueden generar una corriente eléctrica. [3]

### 2.3.2 Componentes de un sistema fotovoltaico

Los principales componentes fotovoltaicos son los presentados en la figura 2-6. Cada uno de estos elementos desempeña un papel fundamental en la conversión de la radiación solar en energía eléctrica utilizable. Para lograr un funcionamiento adecuado del sistema, es necesario que todos los componentes se integren de forma correcta y que el material empleado cumpla con los requisitos de calidad establecidos. A continuación, se describen de manera resumida los principales elementos que componen un sistema fotovoltaico

#### 2.3.2.1 Células Solares

Las células solares, donde tiene lugar el efecto fotovoltaico, constituyen la unidad básica de los sistemas de generación eléctrica a partir de la luz solar. Están formadas principalmente por materiales semiconductores, entre los que destacan el silicio, el arseniuro de galio, el telurio de cadmio y el diseleniuro de indio y cobre. Estos materiales se emplean porque sus átomos muestran una elevada sensibilidad a la energía de los fotones procedentes de la radiación solar, en un rango de longitudes de onda que va aproximadamente de 0,35 a 3 micrómetros. Este intervalo coincide con la mayor parte del espectro de radiación solar que llega a la superficie terrestre, lo que permite aprovechar eficazmente la luz del sol para generar electricidad. [3]

#### 2.3.2.2 Módulos Fotovoltaicos

Los paneles solares fotovoltaicos, también llamados placas, módulos o colectores, están formados por la unión de varias células fotovoltaicas. Una sola célula genera una tensión muy baja, por lo que es necesario conectar varias en serie para alcanzar un voltaje útil.

Las células se agrupan formando **módulos**, que son la unidad básica de los sistemas de generación de electricidad solar. A su vez, varios módulos ensamblados en una estructura sencilla constituyen un **panel**. Cuando varios paneles se conectan en serie, forman un **string**, y varios strings conectados en paralelo componen un **array**. Finalmente, al conectar varios arrays en paralelo se obtiene el **generador fotovoltaico**, que permite alcanzar la potencia requerida por el sistema.

Los paneles solares están formados por células fotovoltaicas conectadas en serie, encapsuladas para protegerlas frente a la humedad y los agentes externos, y montadas en un marco metálico que facilita su instalación y manejo.

Los módulos pueden conectarse entre sí de dos formas principales:

- Conexión en serie: la tensión (voltaje) de cada módulo se suma y la corriente se mantiene igual a la de un solo módulo. Por ejemplo, si se conectan en serie dos módulos de 12 V y 1,5 A, se obtiene un total de 24 V y 1,5 A.
- Conexión en paralelo: la corriente de cada módulo se suma y la tensión permanece igual a la de un solo módulo. Así, si se conectan en paralelo dos módulos de 12 V y 1,5 A, se obtiene 12 V y 3 A.

Para que un módulo sea capaz de cargar una batería de 12 V, es necesario que se asocien aproximadamente entre 33 y 36 células en serie. Por este motivo, la mayoría de los módulos comerciales están formados por uno, dos o tres ramales de 36 células conectadas en serie. Estos ramales pueden combinarse entre sí en serie o en paralelo, según las necesidades del sistema. [3]

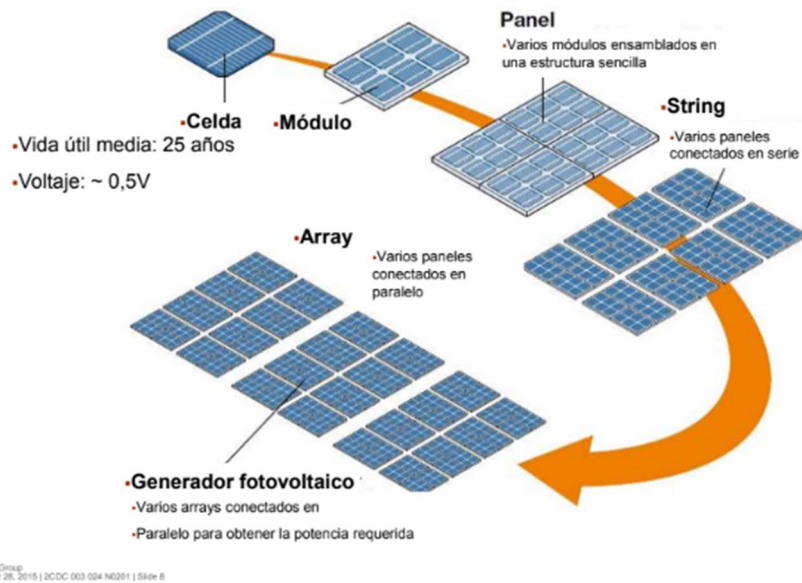


Figura 2-6: Tecnología del módulo – El panel solar

### 2.3.2.3 Inversores

El inversor es un dispositivo de electrónica de potencia cuya función básica es transformar la corriente continua (CC) en corriente alterna (CA), además de ajustar su frecuencia y tensión eficaz para el consumo. Algunas veces se le denomina convertidor CC-CA.

Hoy en día, gracias al desarrollo de la electrónica de potencia moderna, esta transformación se consigue con muy pocas pérdidas.

En las instalaciones fotovoltaicas existen dos grandes grupos de inversores:

- Inversores para instalaciones conectadas a la red: La salida del inversor está conectada directamente a la red de distribución de la compañía eléctrica.
- Inversores para instalaciones fotovoltaicas aisladas: En este tipo de instalaciones, la energía se almacena en baterías y se pueden alimentar directamente muchos consumos en corriente continua. En el caso de conectar aparatos que funcionan en corriente alterna, es necesario instalar un inversor que convierta la corriente continua almacenada en las baterías en corriente alterna [3]

### 2.3.2.4 Baterías

Las baterías son dispositivos que acumulan energía eléctrica en forma de corriente continua para que pueda utilizarse posteriormente cuando no hay generación solar.

En las instalaciones fotovoltaicas aisladas, las baterías permiten almacenar la energía producida durante el día y disponer de ella por la noche o en periodos de baja radiación solar.

Su capacidad y características dependen de la demanda energética de la instalación y del tiempo de autonomía que se desee garantizar.

Más adelante, profundizaremos en este tema al hablar del almacenamiento de la energía eléctrica y térmica y sus diferentes tecnologías. [3]

### 2.3.2.5 Reguladores

El regulador de tensión es un equipo electrónico que sirve para proteger la batería frente a sobrecargas y

descargas profundas, permitiendo alargar su vida útil. Existen reguladores de tipo serie y de tipo paralelo (shunt). La vida de la batería depende fundamentalmente de una buena elección del regulador.

Para garantizar el correcto funcionamiento de las baterías, se debe seleccionar un regulador cuyos niveles de tensión estén bien ajustados al tipo de batería que debe proteger. Estos niveles corresponden a los límites de carga y descarga, en función del tipo de batería, el proceso de carga y descarga, la temperatura y el envejecimiento.

El regulador se instala muy próximo a la batería. Sus funciones básicas son garantizar una carga óptima de las baterías, proteger frente a sobrecargas, evitar la descarga completa, proteger frente a descargas profundas y proporcionar información sobre el estado de carga.

El regulador serie interrumpe, mediante un relé o un semiconductor, la corriente entre el módulo y la batería cuando se alcanza la tensión límite de carga, y posteriormente vuelve a conectar cuando la tensión disminuye. El regulador shunt (paralelo), en lugar de interrumpir el circuito, deriva toda o parte de la corriente, dejando pasar únicamente la cantidad necesaria para mantener la batería cargada y evitar la autodescarga, mientras que el resto de la corriente se consume como corriente de cortocircuito. [3]

### **2.3.2.6 Accesorios**

Los accesorios son los elementos que completan la instalación, como protecciones eléctricas, cableado, estructuras de soporte, conectores, sistemas de monitorización y el sistema de seguimiento solar

El sistema de seguimiento solar es un accesorio opcional que orienta los paneles fotovoltaicos para mantenerlos con el ángulo más perpendicular posible a la radiación solar y así aumentar la producción eléctrica. Puede incorporar mecanismos mecánicos o hidráulicos.

Existen dos tipos principales:

- Seguidores de un eje, que giran los paneles a lo largo de un solo eje (normalmente de este a oeste) para seguir el movimiento diario del sol.
- Seguidores de dos ejes, que ajustan tanto el movimiento diario como la inclinación estacional, logrando una alineación más precisa con la trayectoria solar y una mayor generación de energía. [3]

### **2.3.3 Tipos de instalaciones solares fotovoltaicas**

Existen diferentes tipos de instalaciones solares fotovoltaicas según su conexión y uso principal.

La clasificación según su conexión a la red distingue dos tipos de instalaciones:

#### **Instalaciones solares fotovoltaicas conectadas a la red**

Los sistemas fotovoltaicos conectados a red son instalaciones que producen electricidad y están enlazadas directamente con la red eléctrica general. Funcionan de manera que la energía generada por los paneles solares se utiliza en primer lugar para cubrir el consumo propio de la instalación o del edificio. Si en algún momento la producción solar es superior a la demanda, el exceso de electricidad se inyecta automáticamente en la red.

La electricidad producida, además de destinarse al consumo propio, se puede vender a la compañía eléctrica. Por ejemplo, una nave que tiene una instalación fotovoltaica puede, en las horas más soleadas, generar un exceso de producción que se envía a la red durante las horas punta y así obtener un beneficio económico gracias a la compensación por los excedentes [5].

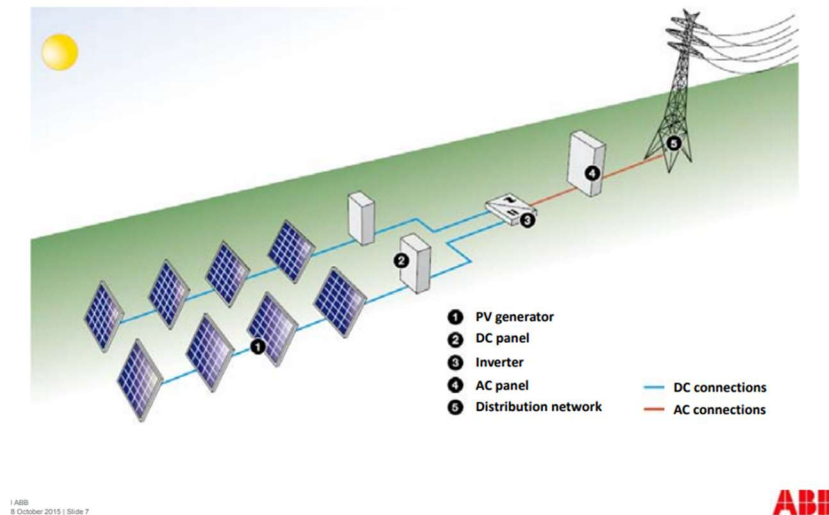


Figura 2-7: Instalación Fotovoltaica Conectada a la Red

### Instalaciones solares aisladas

Los sistemas fotovoltaicos aislados son instalaciones que no están conectadas a la red eléctrica. Toda la electricidad que producen se utiliza directamente para abastecer los consumos de la vivienda o instalación. Para disponer de energía cuando no hay sol, estos sistemas cuentan con baterías de acumulación que almacenan la electricidad generada durante el día.

Por ejemplo, una casa rural ubicada en un lugar sin acceso a la red eléctrica puede instalar un sistema fotovoltaico aislado. Durante las horas de sol, los paneles alimentan los consumos y cargan las baterías. Por la noche o en días nublados, la energía almacenada se utiliza para cubrir la demanda eléctrica.

En nuestro caso, donde las instalaciones fotovoltaicas se emplean para la producción de calor, parte de la energía generada podría almacenarse de forma térmica, por ejemplo acumulando agua caliente o utilizando sistemas de almacenamiento térmico para disponer de calor cuando sea necesario. [4]

Según su uso principal, las instalaciones solares fotovoltaicas se pueden clasificar en dos grandes categorías:

#### Instalaciones para autoconsumo

Son aquellas diseñadas para generar electricidad destinada al abastecimiento de las necesidades energéticas propias de un consumidor (vivienda, edificio, industria, etc.). Su objetivo prioritario es reducir la dependencia de la red eléctrica y disminuir los costes energéticos. En función de su conexión, pueden ser:

Autoconsumo conectado a red: permiten inyectar a la red los excedentes de energía no consumida, obteniendo compensación económica o liquidación de excedentes.

Autoconsumo aislado: sin conexión a la red eléctrica, por lo que requieren sistemas de almacenamiento (baterías) que garanticen el suministro cuando no hay producción solar. [4]

#### Instalaciones de generación a gran escala (huertos solares)

También denominadas huertos solares o plantas fotovoltaicas de producción, están orientadas principalmente a la generación de electricidad con fines comerciales. Toda o la mayor parte de la energía producida se inyecta directamente a la red eléctrica para su venta a la compañía distribuidora o comercializadora, obteniendo [4]

### 2.2.5 Energía Fotovoltaica para la producción de calor

La energía fotovoltaica puede emplearse no solo para cubrir consumos eléctricos convencionales, sino también para producir calor, que posteriormente se utiliza en procesos industriales o en aplicaciones de calefacción y generación de agua caliente sanitaria.

En este tipo de instalaciones, la electricidad generada por los módulos fotovoltaicos alimenta equipos que transforman la energía eléctrica en energía térmica, como resistencias eléctricas, bombas de calor o sistemas

híbridos que combinan varias tecnologías.

El funcionamiento es sencillo: durante las horas de radiación solar, los paneles convierten la energía solar en electricidad. Esta electricidad se utiliza de forma inmediata para calentar agua o generar vapor, o bien se almacena en baterías eléctricas o en sistemas de almacenamiento térmico, como acumuladores de agua caliente, para poder disponer del calor en otros momentos del día.

El consumo eléctrico necesario para producir el calor depende de la demanda térmica, que a su vez está determinada por varios factores, entre ellos:

- La temperatura y la presión a las que se debe calentar el fluido
- El caudal del fluido térmico requerido
- El COP de la bomba de calor, si se utiliza este tipo de tecnología, o la eficiencia de las resistencias eléctricas

Este enfoque resulta especialmente interesante en industrias o instalaciones que cuentan con demanda térmica constante y donde la utilización de energía solar permite reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

La ventaja principal de este sistema es que se aprovecha la versatilidad de la electricidad generada por los paneles fotovoltaicos, que puede destinarse tanto al consumo eléctrico como a la producción de calor según las necesidades de cada momento.

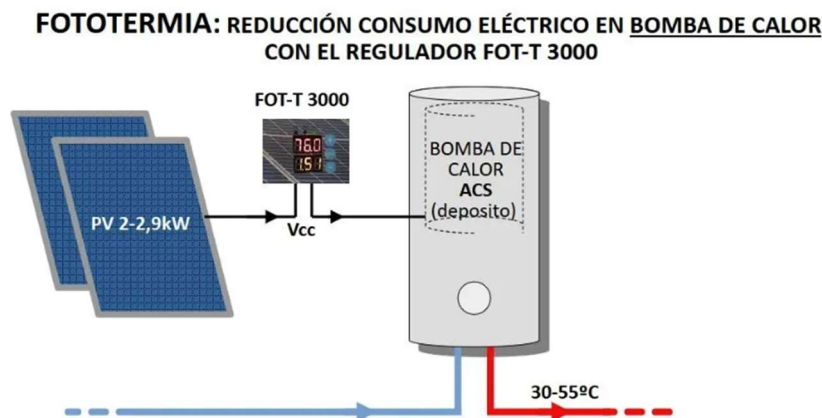


Figura 2-8: Sistema fototérmico híbrido: apoyo fotovoltaico a bomba de calor para ACS

## 2.4 Bomba de calor

### 2.4.1 Principio de funcionamiento

Una bomba de calor es un dispositivo que utiliza electricidad o calor para transferir calor desde una temperatura más baja a una temperatura más alta. Al hacerlo, recupera calor que de otro modo se perdería y lo pone a disposición para fines prácticos, producción de agua caliente sanitaria u otras aplicaciones. En nuestro caso, nos centramos en las bombas de calor que utilizan electricidad proveniente de fuentes renovables, especialmente de energía fotovoltaica (FV), para impulsar el ciclo y así lograr una solución eficiente y sostenible. Este principio se presenta en la siguiente figura [5]

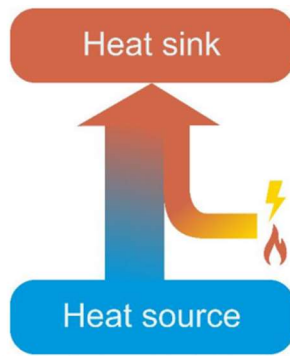


Figura 2-9: Principio de una bomba de calor

## 2.4.2 Componentes en bombas de calor

En esta sección se describe la configuración básica de las bombas de calor accionadas eléctricamente. A partir de este esquema fundamental, se desarrollan múltiples variantes en función del tipo de aplicación, el refrigerante utilizado, el rango de temperaturas requeridas y otros factores técnicos.

El ciclo simple de compresión mecánica es el más empleado en las bombas de calor accionadas eléctricamente, consideradas como las bombas de calor convencionales. En la figura se muestran los elementos principales que forman el ciclo frigorífico simple de compresión mecánica: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador. Además, se representan los flujos de energía principales: el calor absorbido en el evaporador, el consumo de energía mecánica en el compresor y el calor cedido en el condensador (suma de los anteriores si se desprecia la pérdida de calor).

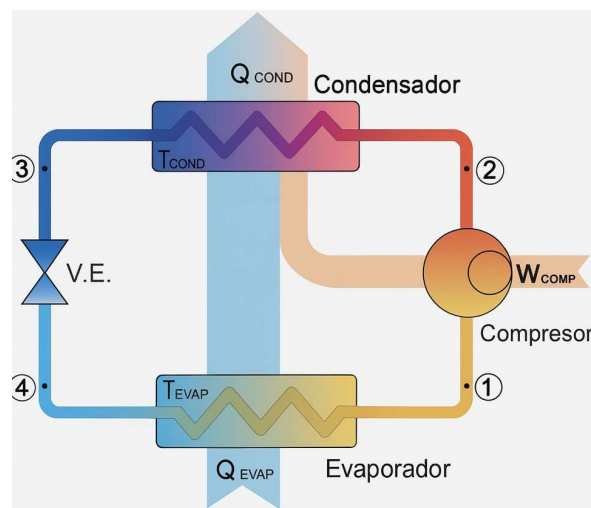


Figura 2-10: Ciclo de compresión de vapor en una bomba de calor

### 1-2 Compresión:

El gas refrigerante entra al compresor, donde es comprimido mecánicamente. Este proceso eleva tanto su presión como su temperatura. La energía necesaria para esta compresión proviene de un motor eléctrico, normalmente alimentado por electricidad procedente de fuentes renovables en aplicaciones sostenibles.

### 2-3 Condensación:

El refrigerante, ahora en estado de vapor sobrecalentado y a alta presión, se dirige al condensador. Allí cede el calor acumulado al fluido del sistema de distribución térmica (aire o agua), enfriándose en el proceso y condensándose de nuevo a estado líquido.

### 3-4 Expansión:

El refrigerante líquido pasa por una válvula de expansión, donde disminuye bruscamente su presión y temperatura. Este descenso lo prepara para volver al evaporador e iniciar un nuevo ciclo de captación y transferencia de calor.

### 4-1 Evaporación:

El refrigerante, en estado líquido y a baja presión, entra al evaporador. Allí absorbe calor del entorno (por ejemplo, del aire ambiente, del agua o del suelo), lo que provoca su evaporación. Al cambiar de fase, pasa a estado gaseoso y de baja temperatura, captando así energía térmica de la fuente.

El fluido de trabajo es el refrigerante que circula por el ciclo cerrado de la bomba y determina en gran parte su rendimiento. Este fluido se encarga de absorber el calor en el evaporador y liberarlo en el condensador, realizando cambios de fase que permiten transferir energía de forma eficiente. Existen muchos tipos de refrigerantes, cada uno con propiedades físicas y químicas específicas que los hacen más adecuados según el rango de temperaturas de operación, la presión de trabajo, la eficiencia energética y el impacto ambiental. [6]

## 2.4.3 Tipos de bombas de calor

Las bombas de calor se pueden clasificar de diferentes formas según diversos criterios. Por ejemplo, según el tipo de accionamiento, pueden ser impulsadas por un motor eléctrico que mueve un compresor, o bien por motores de combustión interna. En nuestro caso, dado que las bombas de calor se utilizarán junto con energía fotovoltaica, es evidente que emplearemos únicamente las accionadas por compresor eléctrico.

Otra forma común de clasificación de las bombas de calor se basa en los medios de intercambio térmico que utilizan y en el rango o alcance de temperatura que pueden manejar; ambos aspectos los profundizaremos en secciones específicas.

### 2.4.3.1 Tipos de bombas de calor según la distribución de calor

Las bombas de calor se pueden clasificar también en función de los medios empleados para el intercambio de calor en el evaporador y en el condensador, es decir, según la naturaleza de los focos frío y caliente, de los que se absorbe calor y a los que se cede calor, respectivamente.

En concreto, los medios exteriores empleados son: aire, utilizando aire exterior o aire interior de un recinto; agua, que puede ser agua de río, pozo o mar; agua en circuito cerrado con torre de refrigeración; y terreno, donde el intercambio de calor se realiza con el suelo.

CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE CALOR	
MEDIO DESDE DONDE SE TOMA EL CALOR (FOCO FRÍO)	MEDIO DONDE SE TRANSMITE EL CALOR (FOCO CALIENTE)
AIRE	AIRE
AIRE	AGUA
AGUA	AIRE
TIERRA	AGUA
TIERRA	AGUA

Figura 2-11: Tipos de bomba de calor según distribución del calor

### Bomba de calor aire–aire:

En este tipo de configuración, el calor absorbido del ambiente (normalmente del aire exterior) es entregado directamente al aire interior del edificio mediante unidades de ventilación o climatización (como unidades split o multisplit).

Aplicaciones típicas: climatización de espacios residenciales, oficinas y pequeños comercios.

### Bomba de calor aire-agua:

El calor captado del aire se transfiere a un fluido caloportador (normalmente agua), que circula por un sistema hidráulico. Estas bombas de calor son muy utilizadas en sistemas de ACS y también en instalaciones de climatización con distribución interior por agua, como radiadores o fan-coils.

Este tipo de bomba de calor será una de las seleccionadas en nuestro estudio para el suministro de agua caliente a 45 °C, como es el caso de la producción de ACS.

### Bomba de calor agua-agua

Son muy utilizados, sobre todo en instalaciones de refrigeración, necesitando habitualmente torres de refrigeración para evacuar el calor de condensación cuando funcionan en régimen de producción de frío. De forma alternativa, podría emplearse agua de pozo, río o mar para este fin.

Además, los equipos que extraen calor del terreno son mayoritariamente sistemas agua/agua, que utilizan tuberías enterradas para el intercambio de calor entre el agua y el terreno.

Teniendo en cuenta la mayor capacidad de transmisión de calor del agua frente al aire, los equipos que utilizan agua aproximan más las temperaturas del medio y del refrigerante, proporcionando mejores resultados además de tener un tamaño menor.

Adicionalmente, existen bombas de calor que aprovechan la energía térmica de fuentes de calor residuales, lo que permite un uso eficiente de energías que de otro modo se desperdiciarían. [7]

#### 2.4.3.2 Tipos de bombas de calor según la temperatura de operación

Como se muestra en el gráfico, las bombas de calor pueden clasificarse según el rango de temperatura que son capaces de alcanzar. Esta clasificación es especialmente relevante en el ámbito industrial, donde cada proceso requiere una temperatura específica para funcionar correctamente.

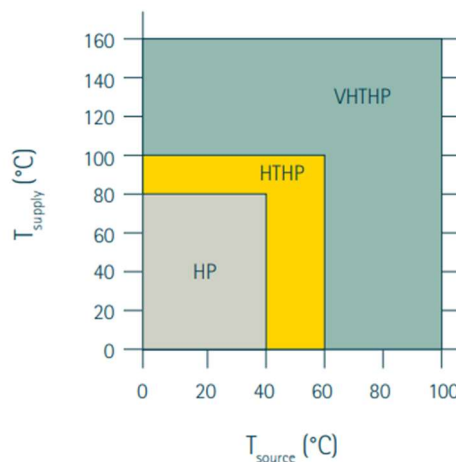


Figura 2-12: Rangos de temperatura de operación de bomba de calor

En nuestro caso, centrado en la generación de calor para procesos industriales relacionados con agua, adoptamos una división en cuatro rangos de temperatura: 45 °C, 120 °C, 180 °C y 250 °C.

- Hasta 100 °C: se consideran bombas de calor convencionales, muy comunes en aplicaciones residenciales o de baja exigencia térmica, producción de agua caliente sanitaria (ACS).
- Entre 100 °C y 140 °C: hablamos de bombas de calor de alta temperatura (HTHP). Estas ya permiten abordar ciertos procesos industriales, aunque todavía presentan limitaciones tecnológicas y de mercado.
- Por encima de 140 °C: entramos en el ámbito de las bombas de calor de muy alta temperatura (VHTHP),

capaces de alcanzar hasta 180 °C o incluso 250 °C. Estas soluciones son necesarias para procesos térmicos industriales exigentes como la pasteurización, el secado industrial o procesos químicos de alta temperatura.

Sin embargo, tanto las HTHP como las VHTHP son tecnologías menos maduras en comparación con las bombas convencionales. Requieren investigación adicional, mejoras en eficiencia y reducción de costes antes de lograr una implementación generalizada en la industria. [8]

## 2.5 Resistencias eléctricas, efecto Joule

### 2.5.1 Principio de funcionamiento

Las resistencias eléctricas tipo Joule son una tecnología ampliamente utilizada en la industria para la generación de calor, caracterizada por su simplicidad, fiabilidad y rápida respuesta térmica. Su funcionamiento se basa en el principio físico conocido como efecto Joule, formulado por James Prescott Joule en 1841, y que se desarrolla a continuación.

Cuando una corriente eléctrica fluye por un conductor con resistencia R, se genera una potencia eléctrica dada por:

$$Pe = I \cdot \Delta V = I^2 \cdot R = (\Delta V)^2 / R$$

Donde:

- Pe: Potencia eléctrica disipada (W)
- I: Intensidad de corriente (A)
- $\Delta V$ : Diferencia de potencial (V)
- R Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )

Este fenómeno representa la conversión de energía eléctrica en calor. Según el primer principio de la termodinámica, la potencia eléctrica suministrada se reparte entre el aumento de energía interna del sistema (lo que se traduce en calentamiento) y la energía que se disipa hacia el entorno en forma de calor:

$$W = \frac{dE}{dt} + Q$$

Donde:

- W : Potencia de trabajo de entrada (W)
- dE : Tasa de variación de la energía almacenada en el sistema (W)
- Q: Potencia térmica que sale del sistema (W)

Esto implica que un conductor por el que circula corriente se calienta y puede irradiar calor. Este fenómeno puede ser deseado —como en el caso de estufas eléctricas— o indeseado, al producir pérdidas térmicas. Además, este proceso está asociado a una producción de entropía, lo que puede afectar negativamente a la eficiencia global del sistema.

La energía total disipada a lo largo del tiempo se expresa mediante la siguiente integral:

$$W = \int_0^t I^2 * R dt$$

Donde:

- $W$ : Trabajo eléctrico total aportado en el intervalo de tiempo 0 a  $t$  (J)
- $I$ : Corriente eléctrica (A)
- $R$ : Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )
- $t$ : Tiempo (s)

En el caso de corriente continua (donde  $I$  es constante), el resultado es simplemente una multiplicación. Para corriente alterna, sin embargo, se requiere el cálculo integral correspondiente. [9]

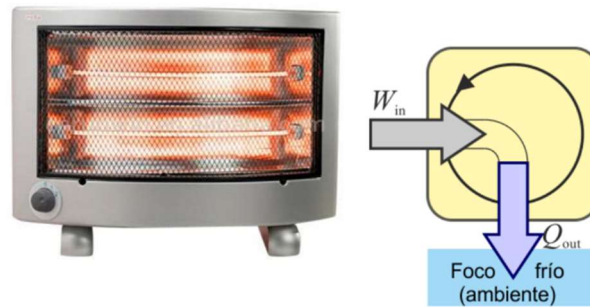


Figura 2-13: Calefactor eléctrico por efecto Joule

## 2.5.2 Tipos de Resistencias

Si bien en este trabajo nos centraremos en el uso de las resistencias eléctricas por efecto Joule para el calentamiento de agua, es importante señalar que esta tecnología también se emplea ampliamente en el calentamiento de gases y sólidos. De hecho, es habitual encontrarla en aplicaciones cotidianas como los secadores de manos eléctricos, que calientan aire mediante resistencias, o en hornos eléctricos domésticos, donde se calientan superficies metálicas por conducción o radiación.

A continuación, se presenta una breve clasificación de las aplicaciones según el tipo de material a calentar. Donde, profundizaremos específicamente en el calentamiento de líquidos y especialmente de agua.

### 2.5.2.1 Resistencias eléctricas para calentamiento de aire

Estas resistencias calientan el aire en sistemas de ventilación, climatización, secado o calefacción industrial. Funcionan por convección forzada, conducción o radiación infrarroja. Se fabrican con materiales como níquel-cromo, aleaciones Kanthal y soportes cerámicos o metálicos, adaptándose a distintas temperaturas y entornos. Son eficientes y permiten un control preciso del calor. [10]

### 2.5.2.2 Resistencias eléctricas para calentamiento de sólidos

Diseñadas para calentar por contacto directo, elevan la temperatura de moldes, piezas o bloques metálicos. También pueden usarse en hornos o sistemas de radiación. Son comunes en la industria del plástico, automoción, vidrio y climatización exterior. Su diseño depende de la temperatura y forma del objeto a calentar. [10]

### 2.5.2.3 Resistencias eléctricas para el calentamiento de líquidos.

Estas resistencias se utilizan ampliamente en la industria para el calentamiento de diferentes tipos de líquidos, como fueles, aceites y líquidos corrosivos, así como en procesos de la industria alimentaria. También se aplican en la producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS) y en la generación de vapor. Además, pueden emplearse para el calentamiento de tuberías, especialmente cuando es necesario mantener la temperatura del fluido a lo largo de su recorrido y evitar pérdidas térmicas. Asimismo, se instalan en depósitos cuando se requiere controlar la temperatura de almacenamiento del líquido o, por ejemplo, para elevar la temperatura del agua destinada a distintos usos industriales.

A continuación, voy a explicar brevemente los principales tipos de resistencias eléctricas que se utilizan para el

calentamiento de agua en la industria. [11]

### Resistencias de Inmersión sobre brida o racor

Las resistencias de inmersión, tanto sobre brida como con racor, son componentes ampliamente utilizados en la industria para calentar líquidos mediante inmersión directa en tanques, depósitos o bidones. Se instalan en la parte inferior o lateral del recipiente mediante bridas (placas atornilladas) o racores roscados, según el tipo de conexión.

Se fabrican en distintas potencias y longitudes, siendo habituales los diseños superiores a 20 kW para aplicaciones industriales exigentes, como procesos químicos, refinerías, calentamiento de fuel oil, aceites, grasas, soluciones de cualquier pH o agua. Están construidas con tubos de cobre niquelado o acero inoxidable y racores o bridas de latón o acero.

Pueden incorporar cajas de protección adecuadas, sistemas antichoque y control de temperatura. La densidad de carga recomendada para agua es de aproximadamente  $6,5 \text{ W/cm}^2$ . [11]



Figura 2-14: Resistencias eléctricas de inmersión

### Calentador de Paso

Los calentadores de paso son equipos formados por un calderín o cuerpo depósito, soportes de sujeción y resistencias eléctricas con control de temperatura regulable. El fluido circula por el interior, guiado por baffles que aumentan su recorrido y mejoran el aprovechamiento del calor. Se fabrican en cobre niquelado o acero inoxidable (304 y 316), en cualquier potencia, tensión y tamaño según la aplicación. Se utilizan para calentar agua, aceites, fuel-oil, soluciones CIP, sales fundidas o vaporización de hidrocarburos, y son aptos para procesos que requieren un calentamiento rápido y controlado en continuo. [11]



Figura 2-15: Calentador eléctrico de circulación con resistencias

### Módulos de Calentamiento

Los módulos de calentamiento o skid heaters son sistemas completos que integran un calentador eléctrico de circulación, estructura metálica de soporte y cuadros de control. Se fabrican a medida según los requisitos de

cada aplicación e incluyen medición de flujo, válvulas de control, instrumentación de temperatura y presión, y sistemas de control mediante thyristor o contactores. Pueden construirse en acero al carbono o acero inoxidable, con resistencias de cobre niquelado o inoxidables, en potencias muy elevadas que alcanzan decenas o cientos de MW. Se suministran precableados para facilitar su instalación y son aptos para uso en exteriores. Se emplean en calentamiento de agua, aceites, fuel-oil, gas natural, sales fundidas y otros procesos industriales que requieren control preciso y alta capacidad de calentamiento. [11]



Figura 2-16: Módulo de calentamiento

### **Mantas Calefactoras**

Las mantas calefactoras son sistemas flexibles que rodean depósitos, bidones o tanques para calentar su superficie de forma uniforme. Se usan para mantener la temperatura, reducir la viscosidad o evitar la congelación de líquidos. Están fabricadas con tejido de fibra de vidrio recubierto de silicona y aislamiento térmico, y pueden incluir termostatos para regular la temperatura. Disponibles en distintos tamaños y potencias, también existen versiones certificadas para zonas ATEX con riesgo de explosión. Su facilidad de instalación las hace muy prácticas en la industria alimentaria, química y petroquímica [11]



Figura 2-17: Manta calefactora eléctrica para bidones

## **2.6 Almacenamiento energético**

En este apartado se examinarán las diferentes opciones de almacenamiento energético consideradas para los casos de estudio. En los sistemas de generación de calor a partir de energía fotovoltaica, el almacenamiento puede implementarse de forma eléctrica, mediante baterías, o en forma de energía térmica a través de acumuladores. En cambio, en las instalaciones termosolares, el almacenamiento se realizará exclusivamente

mediante sistemas térmicos.

## **2.6.1 Tipos de almacenamiento térmico**

El almacenamiento térmico permite conservar y gestionar la energía captada para su uso posterior. Su clasificación y modo de operación dependen de la configuración del sistema, el fluido utilizado y el proceso de carga y descarga. A continuación, se describen los principales tipos y su funcionamiento.

### **2.6.1.1 Clasificación y operación de los sistemas de almacenamiento**

Los sistemas de almacenamiento térmico aplicables tanto a instalaciones termosolares como a sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse según su configuración en:

- Sistemas directos: el mismo fluido caloportador circula por los captadores y por el almacenamiento.
- Sistemas indirectos: el fluido de captación es distinto al medio de almacenamiento, por lo que se emplea un intercambiador de calor.

Según la circulación del medio de almacenamiento, se distinguen:

- Sistemas activos: el medio de almacenamiento circula por el sistema.
- Sistemas pasivos: el medio permanece estático y la transferencia de calor se produce mediante superficies de intercambio.

La transferencia de energía térmica comprende dos etapas:

- Carga: el fluido caloportador aporta calor al almacenamiento.
- Descarga: el sistema devuelve el calor acumulado al circuito de consumo cuando se requiere cubrir la demanda térmica.

Según el modo de transferencia de calor, los sistemas de almacenamiento térmico analizados en este proyecto se clasifican en tres tipos: calor sensible, calor latente y calor termoquímico. A continuación, se describe el principio de cada tecnología, que servirá de base para el análisis del estado del arte. [12]

### **2.6.1.2 Almacenamiento Térmico Sensible**

El almacenamiento térmico sensible consiste en acumular energía mediante el aumento o la disminución de la temperatura de un material, sin que este cambie de fase. Durante el proceso, el calor se guarda simplemente elevando la temperatura del medio de almacenamiento, y se recupera enfriándolo.

Los materiales más utilizados incluyen agua, aire, rocas, hormigón, aceites y suelos, seleccionados en función de su capacidad calorífica, coste y disponibilidad. Este método es especialmente adecuado para aplicaciones de calefacción y refrigeración, tanto en edificios como en procesos industriales, y su sencillez constructiva facilita su implementación.

La cantidad de energía almacenada depende de la masa del material, su capacidad calorífica específica, y la diferencia de temperatura alcanzada entre el inicio y el final del proceso de carga o descarga. [12]

#### **Deposito Acumulador**

Un depósito acumulador es un recipiente diseñado para almacenar energía térmica en forma de agua caliente que se produce mediante distintas fuentes, como colectores solares, bombas de calor o calderas convencionales. Su función principal es conservar el calor durante un periodo de tiempo para permitir su utilización cuando se requiera, compensando así la variabilidad de la producción térmica y adaptándola a la demanda. Dependiendo de su diseño, los acumuladores pueden ser de tipo simple, donde el agua tiende a mezclarse, o estratificados, en los que se mantienen capas de distinta temperatura que mejoran la eficiencia energética del sistema. [12]

#### **Deposito Acumulador Estratificado**

Los tanques de almacenamiento térmico estratificado permiten conservar capas de agua a diferentes temperaturas con mínima mezcla, aprovechando la menor densidad del agua caliente que se sitúa en la parte

superior. Este tipo de diseño mejora la eficiencia del almacenamiento al mantener la estratificación durante la carga y descarga. Para lograrlo, se recomienda emplear depósitos altos con entradas y salidas bien posicionadas, controlar el caudal de agua y asegurar un buen aislamiento. La diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior suele mantenerse entre 5 y 10 °C para garantizar un rendimiento adecuado. [12]

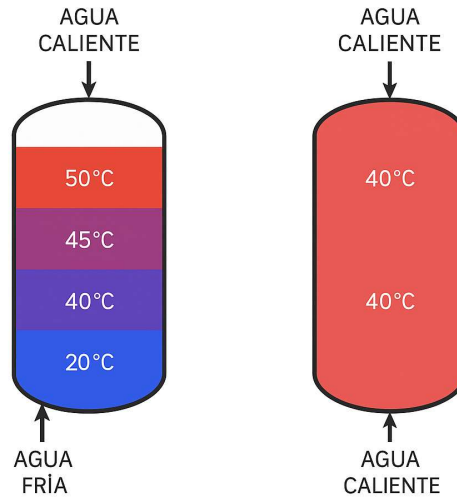


Figura 2-18: Estratificación térmica vs. mezcla en depósitos de agua caliente

### Almacenamiento Térmico en Hormigón

El hormigón se utiliza como material de almacenamiento térmico por su bajo coste, buena capacidad calorífica y resistencia mecánica. Consiste en un depósito o bloque macizo que acumula calor en su volumen, normalmente mediante tuberías internas por las que circula un fluido caliente que transfiere la energía al hormigón. Al calentarse, pierde parte del agua interna y puede reducir su resistencia, pero se puede reforzar con aditivos o acero. Puede instalarse en placas prefabricadas o verterse directamente en obra según las necesidades del proyecto. [12]

### Almacenamiento Térmico en Lechos de Roca y Sistemas Combinados Agua-Roca

Las rocas se utilizan como material de almacenamiento térmico por su bajo coste, aunque su capacidad calorífica por volumen es menor que la del agua. Los depósitos pueden construirse con lechos de rocas atravesados por aire caliente o combinando agua y rocas, donde el agua almacena la mayor parte del calor y las rocas ayudan a transferirlo. Este tipo de sistemas se emplea en calefacción solar doméstica, a menudo junto a bombas de calor. Para dimensionarlos, se recomienda aproximadamente 1,6 m<sup>3</sup> de roca por cada m<sup>2</sup> de colector solar. [12]

### Estanques Solares

Un estanque solar de gradiente salino es un depósito grande de agua con capas de distinta concentración de sal. La salinidad más alta en el fondo impide que el agua caliente ascienda, creando una zona de almacenamiento donde se acumula el calor solar. Este sistema funciona como colector y depósito a la vez, permitiendo disponer de agua caliente durante todo el año. Se utiliza principalmente en climas soleados y terrenos económicos, y destaca por su sencillez, bajo coste operativo y gran capacidad de almacenamiento térmico. [12]

#### 2.6.1.3 Almacenamiento Térmico por Calor Latente

El almacenamiento térmico por calor latente consiste en acumular energía mediante el cambio de fase de un material, generalmente de sólido a líquido. Durante este proceso, la temperatura se mantiene constante mientras se absorbe o libera calor.

Los materiales de cambio de fase (PCM) más empleados son sales hidratadas, parafinas, ácidos grasos y zeolitas. Entre ellos, destaca el Glauber's salt por su alto calor de fusión y las parafinas por su estabilidad.

Su principal ventaja es la alta densidad energética, que permite almacenar más energía en menos volumen que el calor sensible. Sin embargo, presenta retos técnicos como el superenfriamiento, la baja conductividad térmica

y la necesidad de compatibilidad con los materiales que encapsulan el PCM.

Para solucionarlo, se emplean sistemas encapsulados o depósitos modulares como los STL. Estos consisten en un tanque, que puede ser de acero y estar enterrado o instalado en superficie, y en su interior contienen esferas o cápsulas de plástico llamadas nódulos, que alojan el material de cambio de fase.

Este tipo de almacenamiento se aplica en calefacción, refrigeración, producción de agua caliente y sistemas solares, ofreciendo un suministro térmico constante y eficiente en espacios reducidos. [12]

## 2.6.2 Tipos de almacenamiento eléctrico

El almacenamiento de energía eléctrica constituye un desafío técnico y económico debido a la ausencia de métodos masivos que permitan una acumulación eficiente y rentable. Este aspecto resulta especialmente crítico en el contexto de las energías renovables, cuya producción depende de la disponibilidad variable de los recursos naturales.

### Baterías de ácido-plomo

Tradicionalmente utilizadas por su bajo costo y madurez tecnológica, estas baterías presentan limitaciones relevantes, incluyendo baja densidad energética, ciclos de vida cortos, requerimientos de mantenimiento y el manejo delicado del plomo debido a su toxicidad. [13]

### Baterías de ion-litio

Actualmente, estas baterías son la tecnología predominante para almacenamiento eléctrico debido a su elevada densidad energética, eficiencia y vida útil prolongada. Dentro de esta familia, existen diversas químicas, tales como el litio-ferro fosfato (LFP), caracterizado por su estabilidad térmica y menor impacto ambiental; titanato de litio (LTO), que destaca por su seguridad y durabilidad aunque con costos elevados; y óxidos de litio como manganeso (LMO) y cobalto-aluminio (NCA), que buscan equilibrar coste, rendimiento y estabilidad. [13]

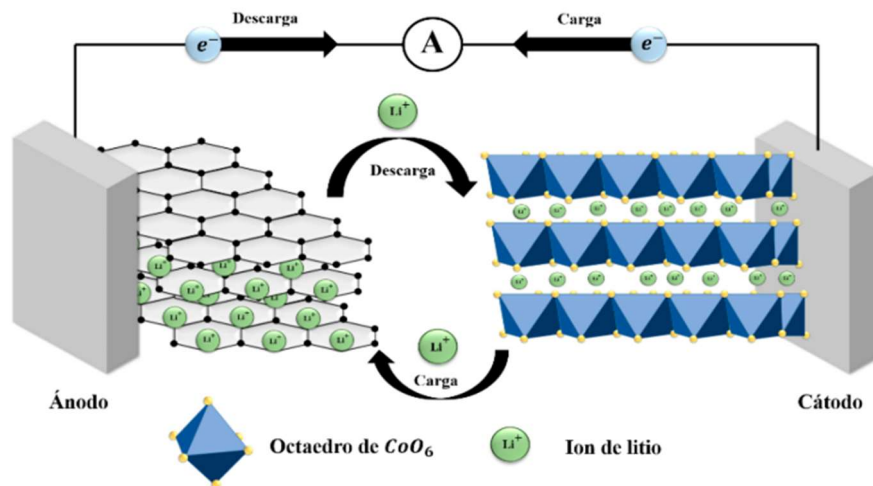


Figura 2-19: Proceso de carga y descarga en una batería de ion-litio

## 3 CASOS DE ESTUDIO

Esta sección se presentan las diferentes situaciones de generación de calor mediante energía solar, abarcando temperaturas entre 45 °C y 250 °C. Para cada caso se estudian diversas tecnologías, tanto térmicas como eléctricas, evaluando su eficiencia, viabilidad técnica y necesidades de almacenamiento. Los escenarios planteados representan aplicaciones reales para la producción de calor en la industria.

Con el fin de acotar el estudio a soluciones implantables solo se contemplan tecnologías maduras. En particular, solo se tendrá en cuenta el uso de bombas de calor convencionales con una temperatura máxima de trabajo limitada a 100 °C.

### 3.1 Tecnologías consideradas

#### Tecnología fotovoltaica con resistencia eléctrica

En este sistema, los módulos fotovoltaicos generan energía eléctrica en corriente continua, la cual es transformada en corriente alterna mediante un inversor. Posteriormente, la energía se utiliza para alimentar una resistencia eléctrica integrada en un depósito de almacenamiento térmico, donde se produce el calentamiento y almacenamiento del fluido caloportador, por lo tanto, se utiliza únicamente una resistencia tanto para calentar el fluido como para el almacenamiento térmico. Los costes de esta instalación serán los del módulo fotovoltaico, el inversor y el depósito de almacenamiento que ya incluye la resistencia que calienta el fluido.

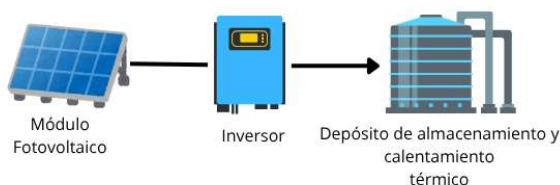


Figura 3-1: FV y resistencia eléctrica

#### Tecnología fotovoltaica con bomba de calor

En este sistema, los módulos fotovoltaicos generan energía eléctrica en corriente continua, la cual es transformada en corriente alterna mediante un inversor. Posteriormente, la energía se utiliza para alimentar una bomba de calor, que eleva la temperatura del fluido caloportador hasta la temperatura deseada (inferior a 100 °C, de acuerdo con la limitación establecida en este trabajo). Finalmente, el fluido se almacena en un depósito de almacenamiento térmico con una resistencia eléctrica. Los costes de esta instalación serán los del módulo fotovoltaico, el inversor, la bomba de calor y el depósito de almacenamiento.



Figura 3-2: FV y bomba de calor

### Tecnología fotovoltaica con resistencia eléctrica y bomba de calor

En este sistema, los módulos fotovoltaicos generan energía eléctrica en corriente continua, la cual es transformada en corriente alterna mediante un inversor. Posteriormente, la energía se utiliza para alimentar una bomba de calor, que eleva la temperatura del fluido caloportador hasta un máximo de 100 °C (limitación impuesta en el presente trabajo).

A continuación, la temperatura del fluido se incrementa hasta el valor de trabajo mediante un depósito de calentamiento con resistencia eléctrica que a su vez realiza la función de almacenamiento térmico. Los costes de esta instalación serán los del módulo fotovoltaico, el inversor, la bomba de calor y el depósito de almacenamiento que ya incluye la resistencia que calienta el fluido.

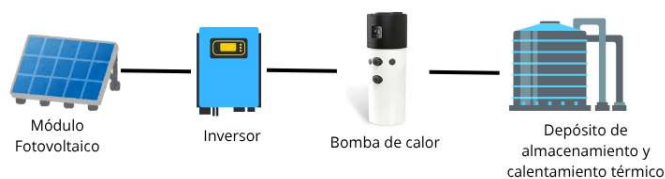


Figura 3-3: FV, resistencia eléctrica y bomba de calor

### Tecnología termosolares

En el caso de las tecnologías termosolares, estas calientan un fluido caloportador que, a través de un intercambiador de calor, transfiere su energía al fluido de trabajo, elevando su temperatura hasta el valor deseado. Posteriormente, la energía térmica se almacena en un depósito de acumulación con resistencia eléctrica integrada. En el caso de que el fluido caloportador sea el mismo que el fluido de almacenamiento no es necesario el intercambiador.

Dentro de las tecnologías termosolares se distinguen diferentes tipologías de captadores, tales como el colector plano, el colector de tubo de vacío, el colector Fresnel y el colector cilindro parabólico. Los costes de esta instalación serán los asociados a los captadores, el intercambiador y el depósito de almacenamiento térmico.

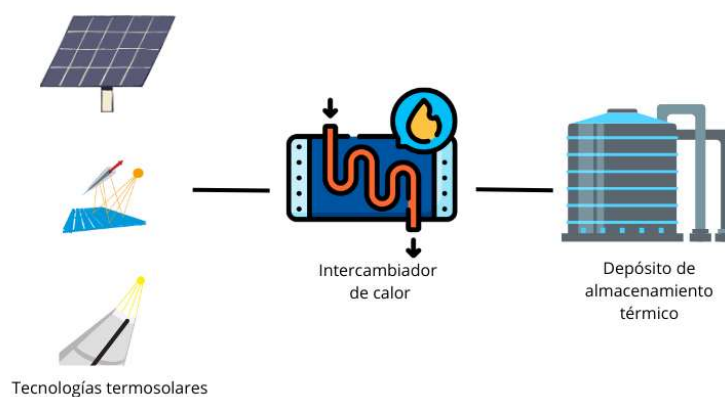


Figura 3-4: Tecnologías termosolares

## 3.2 Generación de calor a 45 °C

Este primer caso representa procesos de baja temperatura como agua caliente sanitaria (ACS), lavado industrial o precalentamiento de fluidos.

Soluciones tecnológicas consideradas:

Colector solar plano: tecnología convencional de alta eficiencia para baja temperatura

Colector de tubo de vacío: mayor aislamiento térmico y mejor rendimiento en climas fríos.

FV + Bomba de Calor: sistema eficiente gracias al alto COP de las bombas de calor a baja temperatura.

FV + Resistencia Eléctrica: solución simple pero menos eficiente con respecto a la bomba de calor.

### **3.3 Generación de calor a 120 °C**

Este caso representa procesos como esterilización, cocción industrial o limpieza CIP, que requieren temperaturas medias.

Soluciones consideradas:

Colector tubo de vacío: operando al límite de su rango, con agua presurizada o mezclas con glicol como fluido caloportador.

Colector Fresnel: tecnología de concentración lineal adecuada para este rango térmico.

FV + Resistencia Eléctrica: solución simple pero menos eficiente con respecto a la bomba de calor.

FV + Bomba de calor + Resistencia eléctrica: se usa la bomba de calor hasta su temperatura máxima convencional (100 °C) y, a partir de ahí, la resistencia eléctrica eleva la temperatura hasta la deseada.

### **3.4 Generación de calor a 180 °C**

Este caso representa procesos como secado térmico, autoclaves, reactores químicos, procesamiento de aceites, plantas de pinturas

Soluciones tecnológicas:

Colector Fresnel: tecnología termosolar de concentración apta para este rango.

Colector Cilindro Parabólico: más eficiente que Fresnel en temperaturas altas. FV + resistencia eléctrica: posible, aunque con menor eficiencia con respecto a la bomba de calor.

FV + Bomba de Calor + Resistencia Eléctrica: se usa la bomba de calor hasta su temperatura máxima convencional ( $\approx 90\text{--}100$  °C) y, a partir de ahí, la resistencia eléctrica eleva la temperatura hasta la deseada.

### **3.5 Generación de calor a 250 °C**

Este último caso se enfoca en procesos térmicos exigentes, como pirólisis o tratamiento térmico avanzado.

Soluciones tecnológicas:

Colector Fresnel: puede alcanzar hasta 250 °C en condiciones óptimas, aunque con menor eficiencia térmica que el colector cilindro parabólico. Se considera solo en contextos donde se prioriza coste y simplicidad.

Colector Cilindro Parabólico: tecnología solar térmica de alta concentración ideal para estos rangos.

FV + Resistencia Eléctrica: capaz de alcanzar temperaturas elevadas, aunque con una eficiencia global baja. FV + bomba de calor + resistencia eléctrica: se usa la bomba de calor hasta su temperatura máxima convencional ( $\approx 90\text{--}100$  °C) y, a partir de ahí, la resistencia eléctrica eleva la temperatura hasta la deseada.

Temp. de Trabajo (°C)	FV +BC	FV + R	FV +BC + R	C. Plano	Tubo de Vacío	C. Fresnel	C. C. Parabólico
50	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗
120	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗
180	✗	✓	✓	✗	✗	✓	✓
250	✗	✓	✓	✗	✗	✓	✓

Figura 3-5: Tabla resumen casos de estudio

## 3.6 Almacenamiento

En las tecnologías termosolares se empleará exclusivamente almacenamiento térmico, por ser la opción natural y la única factible sin conversiones adicionales. En fotovoltaica (FV), aunque el almacenamiento eléctrico es técnicamente posible, se opta también por almacenamiento térmico por su mayor estabilidad y mejor relación coste-energía en los escenarios analizados, dado que las baterías actuales no ofrecen una acumulación suficientemente eficiente y rentable para estos perfiles de demanda

### 3.6.1 Tipos de almacenamiento térmico

En este trabajo se ha seleccionado uno o varios métodos de almacenamiento térmico para cada rango de temperatura. A continuación, se presentan y describen de forma breve los principales métodos elegidos.

#### Almacenamiento térmico en el rango de 50 °C

El sistema de almacenamiento de calor más común y económico para el rango de 50 °C se basa en el uso de un gran depósito de agua con aislamiento de alta calidad. Esta tecnología aprovecha la excelente capacidad del agua para retener la temperatura. Una característica clave de estos sistemas es la inclusión de una resistencia eléctrica interna, que actúa como un sistema de apoyo para garantizar que el agua alcance o mantenga la temperatura deseada. El éxito del método depende fundamentalmente del aislamiento térmico del tanque para evitar que el calor se disipe al ambiente, permitiendo que el agua permanezca caliente y disponible durante horas o un día completo. [14]



Figura 3-6: Almacenamiento térmico. Depósito de agua con resistencia eléctrica

#### Almacenamiento térmico en el rango de 120 °C

El rango de 120 °C se cubre principalmente mediante la tecnología de Tanques Presurizados de Agua Caliente. Dado que a esta temperatura el agua herviría, el sistema mantiene el fluido a alta presión para forzar que permanezca en estado líquido. Esta es la extensión más rentable y robusta del almacenamiento de calor

sensible en agua, ya que aprovecha el alto calor específico del agua para guardar grandes cantidades de energía de forma eficiente. Esta solución se implementa en sistemas a gran escala, como la calefacción de distrito y el suministro de calor para algunos procesos industriales. Como alternativas más compactas, aunque más caras y complejas, existen los Materiales de Cambio de Fase (PCM), que ofrecen mayor densidad energética al usar el calor latente, y los Aceites Térmicos, que se emplean cuando se busca evitar el uso de alta presión o prevenir problemas de corrosión en el circuito. [14]

### **Almacenamiento térmico en el rango de 180 °C**

Para el rango de 180 °C, el almacenamiento de calor se enfoca en soluciones de calor sensible que operan a baja presión, ya que presurizar el agua a esta temperatura es prohibitivamente caro y complejo. La solución dominante son los Aceites Térmicos (fluidos orgánicos), que permanecen estables y líquidos hasta temperaturas mucho más altas, lo que simplifica el diseño de los tanques al eliminar la necesidad de alta presión. Estos aceites se usan ampliamente en sistemas de concentración solar y en la industria para procesos de calor constante. Como alternativa de bajo coste, se emplean medios sólidos como rocas o materiales cerámicos, que almacenan calor de forma duradera, pero requieren grandes volúmenes. Las sales fundidas se evitan en este rango porque 180 °C está demasiado cerca de su punto de fusión, lo que conlleva un alto riesgo de solidificación y daño al sistema. [15]



Figura 3-7: Almacenamiento térmico. Aceites térmicos

### **Almacenamiento térmico en el rango de 250 °C**

El sistema de almacenamiento predominante en la alta industria para 250 °C es el de Sales Fundidas (mezclas de nitratos), una tecnología de calor sensible que ofrece una alta capacidad volumétrica y estabilidad química. Las sales son el medio elegido por su gran capacidad de almacenamiento masivo y su idoneidad para procesos industriales que requieren calor constante. Por necesidad operativa, estos sistemas incorporan resistencias eléctricas de apoyo o calentadores. La función de este calentamiento auxiliar no es suministrar el calor principal, sino mantener la temperatura mínima del medio de almacenamiento en las tuberías y tanques durante periodos de inactividad o enfriamiento, asegurando así la operatividad y el estado líquido del fluido en todo momento. Como alternativa, se emplean medios sólidos como rocas, que son más baratos y duraderos, pero requieren tanques mucho más grandes por su menor densidad de almacenamiento. [15]

# 4 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Para la ejecución de los cálculos se ha seguido el siguiente razonamiento, implementado en la herramienta mediante funciones matemáticas de C#.

## 4.1 Cálculos técnicos

### 4.1.1 Cálculos energía generada por superficie de captación (Fichero Excel)

#### Energía eléctrica generada por superficie de captación – Fotovoltaica (kWh/ m<sup>2</sup>)

Para obtener el perfil horario de la energía eléctrica generada por superficie de captación de los módulos fotovoltaicos, se divide la energía eléctrica horaria generada entre la superficie del captador.

$$E_{FV,m2} = \frac{E_{FV}}{S}$$

Donde:

- $E_{FV,m2}$  : Energía eléctrica horaria generada por superficie de captación (kWh/m<sup>2</sup>)
- $E_{FV}$  : Energía eléctrica horaria generada (kWh)
- S: Superficie de los módulos fotovoltaicos (m<sup>2</sup>)

La **energía eléctrica horaria generada por los módulos fotovoltaicos** (kWh) se introduce en la plantilla Excel proporcionada junto con la aplicación, esta información puede obtenerse directamente a través de la herramienta SAM u otro software. Apartado 5.2.1

#### Energía térmica generada por superficie de captación – Tecnologías termosolares (kWh/ m<sup>2</sup>)

Para obtener el perfil horario de la energía térmica generada por superficie de captación de los captadores termosolares, se divide la energía térmica horaria generada entre la superficie de captación, la cual varía en función de la tecnología termosolar empleada

$$E_{Gen,m2} = \frac{E_{Gen}}{S}$$

Donde:

- $E_{Gen,m2}$  : Energía térmica horaria generada por superficie de captación (kWh/m<sup>2</sup>)
- $E_{Gen}$ : Energía térmica horaria generada (kWh)
- S: Superficie captadora de la tecnología termosolar correspondiente (m<sup>2</sup>)

La **energía térmica horaria generada** (kWh) se introduce en la plantilla Excel proporcionada junto con la aplicación, esta información puede obtenerse directamente a través de la herramienta SAM u otra herramienta que el usuario considere Apartado 5.2.1

La definición de la **superficie captadora** depende de la tecnología termosolar considerada. En el caso del colector plano, corresponde a la superficie del captador; en el colector de tubos de vacío, a la superficie del conjunto de tubos; en la tecnología Fresnel, a la suma de las superficies de todos los espejos que conforman la

instalación; y, en el caso del colector cilindro parabólico, a la superficie de apertura del cilindro. El software SAM asigna una superficie determinada para cada tecnología, en función del equipo captador seleccionado

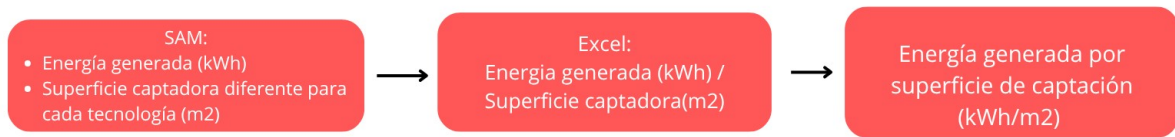


Figura 4-1: Cálculo energía generada por superficie de captación

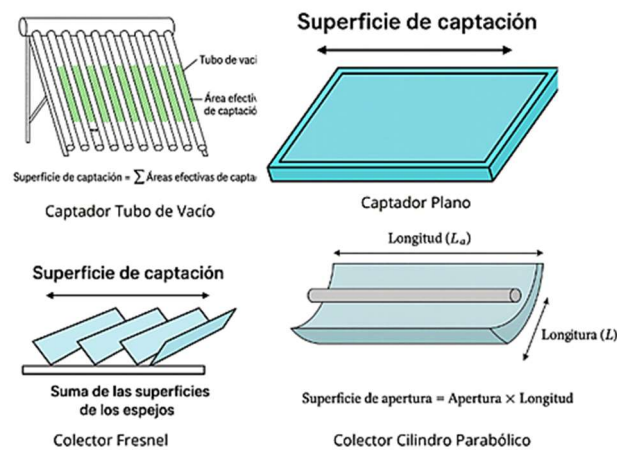


Figura 4-2: Superficie captadora. Tecnologías termosolares

#### 4.1.2 Balance Energético (Modelo C#)

En la fase inicial del cálculo se plantea un escenario con capacidad de almacenamiento térmico ilimitada. A partir de esta referencia, el usuario puede definir en la tabla de resultados la capacidad de almacenamiento que considere adecuada y analizar cómo varían las prestaciones técnico-económicas del sistema. Los cálculos se realizan sobre el perfil horario, salvo los resultados energéticos totales, que se presentan únicamente al final.

##### **Demanda térmica (kWh).**

La demanda térmica horaria se extrae directamente del archivo Excel de entrada

##### **Energía térmica generada (kWh)**

La energía térmica horaria generada se calcula a partir de la siguiente expresión: posteriormente, el valor de energía térmica horaria generada por superficie se obtiene del archivo Excel de entrada.

$$E_{Gen} = E_{Gen,m2} * Superficie$$

Donde:

- $E_{Gen}$ : Energía térmica horaria generada (kWh)
- $E_{Gen,m2}$ : Energía térmica horaria generada por superficie de captación (kWh/m²). Calculada en el apartado 4.1.1
- Superficie: Superficie de captación (m²).

En este caso, la **superficie** es introducida por el usuario en la interfaz de la aplicación y es común para todas las tecnologías. No obstante, dicha superficie corresponde a un concepto distinto en cada tecnología como se ha explicado anteriormente. Cabe señalar que no se tiene en cuenta la superficie de ocupación del terreno.

En resumen, para los cálculos se consideran dos superficies: la superficie introducida en Excel, que proviene de la herramienta de la que se extraen los datos de producción de energía y se emplea únicamente para transformar la energía generada en energía por unidad de superficie de captación, y la superficie introducida en la interfaz de la aplicación, común a todas las tecnologías, que permite recalcular la energía total generada y puede modificarse por el usuario para analizar los resultados en función de la superficie disponible, lo que hace posible obtener nuevos valores sin necesidad de recurrir nuevamente a la herramienta de la que se extraen los datos de producción.

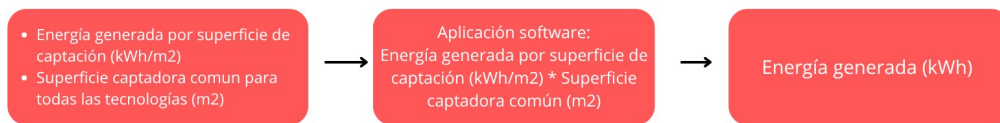


Figura 4-3: Cálculo energía generada

En el caso de las **tecnologías fotovoltaicas simples** (con bomba de calor o resistencia), el Excel nos aporta el perfil horario de la energía eléctrica generada por superficie de captación, por lo que debemos multiplicar por el rendimiento térmico (COP en el caso de las bombas de calor) para obtener la energía térmica generada por superficie de captación.

$$E_{Gen,m2} = E_{FV,m2} * \eta_{ter}$$

Donde:

- $E_{Gen,m2}$  : Energía térmica horaria generada por superficie de captación (kWh/m<sup>2</sup>).
- $E_{FV,m2}$ : Energía fotovoltaica horaria generada superficie de captación (kWh/m<sup>2</sup>). Obtenida del Excel
- $\eta_{ter}$ : Eficiencia térmica, COP en el caso de las bombas de calor.

En el caso de la **tecnología fotovoltaica mixta** que combina bomba de calor y resistencia eléctrica, la bomba se encarga de elevar la temperatura del fluido hasta un valor máximo de trabajo (100 °C). A partir de este punto, la resistencia eléctrica se utiliza para alcanzar la temperatura final deseada. En este esquema, la eficiencia térmica global del sistema depende tanto del COP de la bomba de calor como del rendimiento de la resistencia eléctrica, y puede expresarse mediante la siguiente relación.

$$\alpha = \frac{T_{max} - T_{retorno}}{T_{trabajo} - T_{retorno}}$$

$$r = \alpha * COP + (1 - \alpha) * \eta_{res}$$

$$E_{Gen,m2} = E_{FV,m2} * \eta_{global}$$

Donde:

- $\alpha$ : Coeficiente de carga parcial de la bomba de calor

- $T_{max}$ : Temperatura máxima de trabajo de la bomba de calor ( $^{\circ}C$ )
- $T_{retorno}$ : Temperatura de retorno ( $^{\circ}C$ )
- $\eta_{res}$ : Eficiencia de la resistencia eléctrica
- $\eta_{global}$ : Eficiencia térmica del conjunto bomba y resistencia

### **Demanda cubierta directamente (kWh)**

La demanda horaria cubierta directamente corresponde a la fracción de la energía horaria generada que se utiliza de forma inmediata para cubrir la demanda térmica horaria. En consecuencia, se calcula como el mínimo entre la demanda y la energía horaria generada. Es decir, representa la parte de la generación que satisface la demanda sin necesidad de recurrir al depósito.

$$D_{Cub,Directa} = \min (E_{Gen}, Demanda)$$

Donde:

- $D_{Cub,Directa}$ : Demanda horaria cubierta directamente (kWh)
- $E_{Gen}$ : Energía térmica horaria generada (kWh)
- Demanda: Demanda horaria de energía (kWh). Obtenida del Excel

### **Energía que llega al depósito (kWh)**

La energía horaria que llega al depósito corresponde a la fracción de la energía horaria generada que se almacena tras cubrir la demanda horaria directa. Su valor se determina como el mínimo entre la parte de la generación disponible para almacenamiento (diferencia entre la energía horaria generada y la demanda horaria cubierta directamente) y la capacidad de almacenamiento disponible (capacidad de almacenamiento menos la energía ya acumulada). En el caso de que la demanda horaria sea superior a la energía horaria generada esta magnitud es nula.

$$E_{Deposito} = \min (E_{Gen} - D_{Cub,Directa}, Capacidad - E_{Almacenada})$$

Donde:

- $E_{Deposito}$ : Energía térmica horaria que llega al depósito (kWh)
- $E_{Gen}$ : Energía térmica horaria generada (kWh)
- $D_{Cub,Directa}$ : Demanda cubierta directamente (kWh)
- Capacidad: Capacidad de almacenamiento térmico. (kWh)
- $E_{Almacenada}$ : Energía térmica horaria almacenada, cantidad de energía térmica disponible en el depósito en cada hora (kWh)

En el supuesto de que la capacidad de almacenamiento sea ilimitada se calcula directamente como:

$$E_{Deposito} = E_{Gen} - D_{Cub,Directa}$$

### **Energía Excedente (kWh)**

La energía excedente horaria corresponde a la fracción de la energía horaria generada que no puede aprovecharse ni de forma directa ni mediante el depósito, debido a la limitación de su capacidad. Se determina como la

diferencia entre la energía horaria generada y la suma de la demanda horaria cubierta directamente y la energía horaria que llega al depósito. En el caso de que la capacidad de almacenamiento sea ilimitada esta es cero.

$$E_{excedente} = E_{Gen} - (D_{Cub,Directa} + E_{Deposito})$$

Donde:

- $E_{excedente}$ : Energía excedente horaria (kWh)
- $E_{Gen}$ : Energía térmica horaria generada (kWh)
- $D_{Cub,Directa}$ : Demanda horaria cubierta directamente (kWh)
- $E_{Deposito}$ : Energía horaria que llega al depósito (kWh)

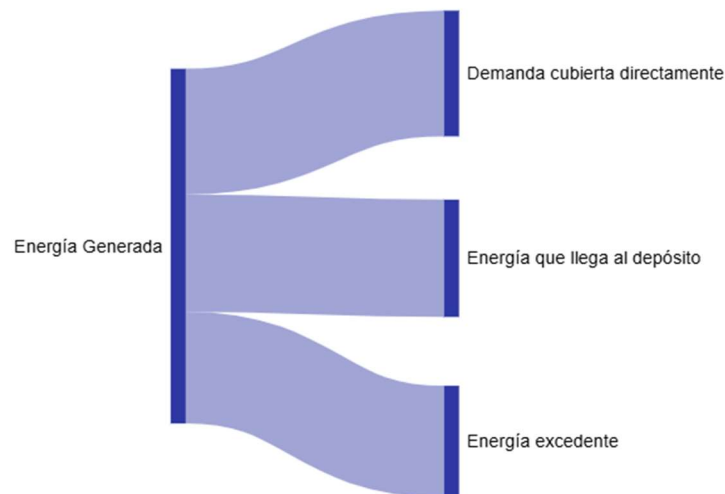


Figura 4-4: Distribución de la energía generada

### **Demanda deposito (kWh)**

La demanda horaria del depósito corresponde a la fracción de la demanda horaria que no ha sido satisfecha por la energía horaria generada. Es decir, representa la parte de la demanda horaria que potencialmente puede ser cubierta mediante la energía previamente almacenada en el depósito.

$$D_{Deposito} = Demanda - D_{Cub,Directa}$$

Donde:

- $D_{Deposito}$ : Demanda horaria depósito (kWh)
- $Demanda$ : Demanda horaria (kWh)
- $D_{Cub,Directa}$ : Demanda horaria cubierta directamente (kWh)

### **Demanda cubierta por el depósito (kWh)**

La demanda horaria cubierta por el depósito corresponde a la fracción de la demanda que no ha sido satisfecha de manera directa y que puede ser atendida mediante la energía previamente acumulada en el sistema de almacenamiento. Se determina como el mínimo entre la demanda del depósito y la energía térmica almacenada.

$$D_{Cub,Deposito} = \min (D_{Deposito}, E_{Almacenada})$$

Donde:

- $D_{Cubierta,Deposito}$ : Demanda horaria cubierta por el depósito (kWh)
- $D_{Deposito}$ : Demanda horaria depósito (kWh).
- $E_{Almacenada}$ : Energía térmica horaria almacenada, cantidad de energía térmica disponible en el depósito (kWh)

La energía almacenada en cada instante se actualiza haciendo el neto entre los flujos energéticos que entran y salen del mismo.



Figura 4-5: Balance energético en el deposito

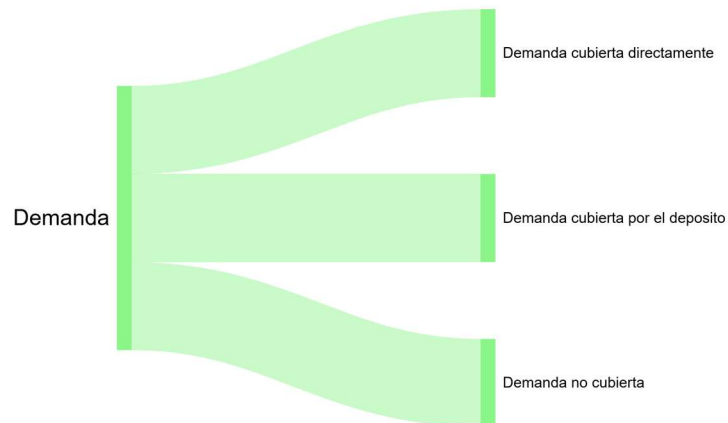


Figura 4-6: Distribución de la demanda

Se entiende por **demanda no cubierta** aquella parte de la demanda que no es satisfecha por la instalación solar, la cual deberá ser cubierta mediante otra tecnología ya sea renovable o convencional o bien permanecer sin cubrir en caso de que el proceso industrial lo permita

### Resultados energéticos globales (kWh)

Los siguientes resultados corresponden al sumatorio horario del período de simulación considerado, de forma que se obtiene el balance energético total en el intervalo de estudio.

Energía térmica generada total:

$$E_{Gen,total} = \sum_{i=1}^N E_{Gen}$$

Demanda cubierta directa total:

$$D_{Cub,Directa,total} = \sum_{i=1}^N D_{Cub,Directa}$$

Energía que llega al depósito total:

$$E_{Deposito,total} = \sum_{i=1}^N E_{Deposito}$$

Demanda cubierta desde el depósito total:

$$D_{Cub,Deposito,total} = \sum_{i=1}^N D_{Cub,Deposito}$$

Demanda total:

$$Demanda_{total} = \sum_{i=1}^N Demanda$$

Excedentes totales:

$$Excedentes_{total} = \sum_{i=1}^N Excedentes$$

Donde:

- N: número total de horas en el periodo actualizado
- i: Índice horario, que recorre cada de paso de tiempo en la simulación

**Energía generada por metro cuadrado (kWh/ m<sup>2</sup>)**

Cantidad de energía generada por superficie de captación

$$E_{Gen,Total,m2} = \frac{E_{Gen,total}}{Superficie}$$

Donde

- $E_{Gen,Totalm2}$ : Energía total generada por superficie de captación (kWh/ m<sup>2</sup>)
- $E_{Gen,total}$ : Energía total generada (kWh)
- Superficie: Superficie de captación instalada (m<sup>2</sup>)

#### Porcentaje de demanda cubierta (%)

El porcentaje de demanda cubierta indica la fracción de la demanda térmica total que ha sido satisfecha mediante la energía generada por el sistema.

$$n_{cub} = \frac{D_{Cub,Directa,total} + D_{Cub,Deposito,total}}{Demanda_{total}} * 100$$

Donde:

- $n_{cub}$ : Porcentaje de demanda cubierto (%)
- $D_{Cub,Directa,total}$ : Demanda cubierta directamente total (kWh)
- $D_{Cub,Deposito,total}$ : Demanda cubierta por el depósito total (kWh)
- $Demanda_{total}$ : Demanda total (kWh)

#### Rendimiento global del sistema (%)

Este parámetro refleja la fracción de la energía generada que ha sido realmente aprovechada, en comparación con la energía total generada, permitiendo cuantificar las pérdidas internas del sistema (excedentes)

$$n_{sys} = \frac{D_{Cub,Directa,total} + E_{Deposito,total}}{E_{Gen_{total}}} * 100$$

Donde:

- $n_{sys}$ : Rendimiento global del sistema (%)
- $D_{Cub,Directa,total}$ : Demanda cubierta directamente total (kWh)
- $E_{Deposito,total}$ : Energía que llega al depósito total (kWh)
- $E_{Gen_{total}}$ : Energía generada total (kWh)

## 4.2 Análisis económico

Con los indicadores energéticos calculados se realiza el análisis económico, evaluando la viabilidad del sistema a través del Valor Actualizado Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Coste Nivelado de la Energía (LCOE).

#### Inversión Inicial - CAPEX (€)

En el caso de las **tecnologías solares** se calcula de la siguiente forma:

$$CAPEX = CAPEX_s * Superficie$$

Donde:

- CAPEX: Inversión inicial (€)
- $CAPEX_s$ : Inversión inicial por superficie de captación ( $\frac{€}{m^2}$ )
- Superficie: Superficie de captación (m<sup>2</sup>).

En el caso del **almacenamiento térmico**:

$$CAPEX = CAPEX_T * Almacenamiento$$

Donde:

- $CAPEX_T$ : Inversión inicial por kWh térmico ( $\frac{€}{kWh}$ )
- Almacenamiento: Capacidad de almacenamiento térmico (kWh).

En el caso de la **bomba de calor y resistencia**:

$$CAPEX = CAPEX_R * Er$$

Donde:

- $CAPEX_R$ : Inversión inicial por kW eléctrico instalado ( $\frac{€}{kW}$ )
- $Er$ : Potencia eléctrica máxima de nuestra instalación (kW)

La potencia máxima de la instalación corresponde a la hora en la que el consumo de energía eléctrica alcanza su valor máximo. Dado que en nuestro estudio no se contempla el almacenamiento eléctrico, toda esta energía debe transformarse en energía térmica de manera inmediata, por lo que la instalación debe dimensionarse para cubrir la hora de mayor generación eléctrica

#### **Costes de Operación y Mantenimiento – CM (€)**

Los costes de operación y mantenimiento se calculan con la **misma estructura que el CAPEX**, sustituyendo los coeficientes de inversión ( $CAPEX_s$ ,  $CAPEX_T$ ,  $CAPEX_R$ ) por sus equivalentes de operación y mantenimiento ( $CM_s$ ,  $CM_T$ ,  $CM_R$ )

$$CM = CM_s * Er$$

$$CM = CM_T * Er$$

$$CM = CM_R * Er$$

#### **Valor Residual – VR (€)**

El valor residual se calcula con la misma estructura que el CAPEX y el CM, sustituyendo los coeficientes de inversión ( $CAPEX_S$ ,  $CAPEX_T$ ,  $CAPEX_R$ ) por sus equivalentes de valor residual ( $VR_S$ ,  $VR_T$ ,  $VR_R$ )

$$VR = VR_S * Er$$

$$VR = VR_T * Er$$

$$VR = VR_R * Er$$

### Ahorro Anual – CEA (€)

Definido como el producto de la demanda cubierta total por la instalación y el precio del kWh de energía de la tecnología a la que sustituye:

$$CEA = (D_{Cubierta,Directa,total} + D_{Cubierta,Deposito,total}) * precioKWh$$

Donde:

- $CEA$ : Ahorro anual (€)
- $D_{Cubierta,Directa,total}$ : Demanda cubierta directamente total (kWh)
- $D_{Cubierta,Deposito,total}$ : Demanda cubierta por el depósito total (kWh)
- $CEA$ : Ahorro anual (€)
- Precio kWh: Precio energía térmica de la tecnología que se sustituye (€/kWh)

En el siguiente apartado se evaluarán dos alternativas para la introducción del precio por kWh: la primera consiste en cargar los datos horarios desde un archivo Excel, mientras que la segunda permite introducir directamente un precio constante a través de la interfaz de la aplicación.

### Flujo Neto Anual – CF (€)

El flujo neto anual resulta de descontar los costes de operación y mantenimiento al ahorro anual:

$$CF = CEA - CM$$

Donde:

- $CF$ : Flujo neto anual (€)
- $CEA$ : Ahorro anual (€)
- $CM$ : Costes de mantenimiento (€)

### Valor Actualizado Neto - VAN (€)

Con estos flujos se calcula el Valor Actualizado Neto VAN, que mide la rentabilidad de la inversión teniendo en cuenta la inversión inicial, la vida útil del proyecto y la tasa de descuento:

$$VAN = -CAPEX + \sum_{t=1}^N \frac{CF}{(1+d)^t} + \frac{VR}{(1+d)^N}$$

Donde:

- VAN: Valor actualizado neto (€)
- VR: Valor residual (€)
- N: vida útil (años)
- d: tasa de descuento
- CAPEX: Inversión inicial (€)
- VR: Valor residual (€)

### Tasa Interna de Retorno (TIR)

Asimismo, se determina la Tasa Interna de Retorno (TIR), definida como el valor de la tasa de descuento que anula el VAN:

$$0 = -CAPEX + \sum_{t=1}^N \frac{CF}{(1+TIR)^t} + \frac{VR}{(1+TIR)^N}$$

Donde:

- TIR: Tasa interna de retorno
- VR: Valor residual (€)
- N: vida útil (años)
- d: tasa de descuento
- CAPEX: Inversión inicial (€)
- VR: Valor residual (€)

### Coste Total Actualizado - (€)

Para el cálculo del Coste Total Actualizado, se descuentan todos los costes de mantenimiento a lo largo de la vida útil:

$$C_{Total} = CAPEX + \sum_{t=1}^N \frac{CM}{(1+d)^t} - \frac{VR}{(1+d)^N}$$

Donde:

- $C_{Total}$ : Coste total actualizado (€)
- CAPEX: Inversión inicial (€)
- d: tasa de descuento
- N: vida útil (años)
- CM: Costes de mantenimiento (€)

- VR: Valor residual (€)

### **Energía Térmica Aprovechada Total (kWh)**

De forma análoga, la Energía Térmica Aprovechada Total Actualizada se obtiene actualizando la energía aprovechada en cada año: [16]

$$E_{Total} = \sum_{t=1}^N \frac{D_{Cub,Directa,Total} + E_{Deposito,Total}}{(1 + d)^t}$$

Donde

- $E_{Total}$ : Energía térmica aprovechada total (kWh)
- $D_{Cub,Directa,Total}$ : Demanda cubierta directamente total (kWh)
- $E_{Deposito,Total}$ : Energía que llega al depósito total (kWh)
- $d$ : tasa de descuento
- $N$ : vida útil (años)

### **Coste Nivelado de la Energía – LCOE (€/kWh)**

Finalmente, se calcula el Coste Nivelado de la Energía (LCOE) como el cociente entre el coste total actualizado y la energía útil actualizada, lo que permite comparar la competitividad de la instalación frente a otras tecnologías:

$$LCOE = \frac{C_{total}}{E_{total}}$$

Donde:

- $LCOE$ : Coste nivelado de la energía (€/kWh)
- $C_{Total}$ : Coste total actualizado (€)
- $E_{Total}$ : Energía térmica aprovechada total (kWh)

# 5 INTERFAZ GRÁFICA DE LA APLICACIÓN

## 5.1 Tecnologías utilizadas: WPF, .NET y C#

La herramienta desarrollada, denominada SolAnalytix, es una aplicación de escritorio disponible para cualquier dispositivo con sistema operativo Windows. Ha sido programada en C# utilizando WPF (Windows Presentation Foundation) sobre la plataforma .NET Framework.

C# es un lenguaje de programación moderno y orientado a objetos, ampliamente empleado en el desarrollo de aplicaciones de escritorio, web y móviles. Fue creado por Microsoft con el objetivo de ofrecer una sintaxis clara, una estructura sólida y una integración eficiente con el entorno Windows.

WPF (Windows Presentation Foundation) es una biblioteca de .NET destinada a la creación de interfaces gráficas de usuario modernas y flexibles. Se basa en el lenguaje de marcado XAML, lo que permite separar de forma clara la lógica de negocio de la presentación visual. Gracias a ello, es posible diseñar interfaces interactivas y atractivas con soporte para estilos, plantillas, animaciones y gráficos vectoriales, ofreciendo mayor versatilidad que las bibliotecas clásicas como Windows Forms.

El .NET Framework constituye el entorno de ejecución que gestiona el código, asegura la interoperabilidad entre lenguajes y proporciona acceso a una extensa colección de bibliotecas. Gracias a ello, la aplicación puede desarrollarse de forma modular, mantenible y escalable.

La interfaz gráfica de SolAnalytix se organiza en tres pestañas principales, cada una orientada a una etapa clave del análisis.

## 5.2 Pestaña 1 – General

En esta pestaña, el usuario debe introducir la temperatura de trabajo y la superficie de captación disponible, además de cargar un archivo Excel que incluye el perfil horario de la energía generada y de la demanda térmica. Asimismo, se permite seleccionar las tecnologías energéticas que se deseen comparar.

**Temperatura de trabajo:** seleccionable entre 50 °C, 120 °C, 180 °C y 250 °C.

**Superficie de captación:** área total disponible de los captadores solares, común para todas las tecnologías ( $m^2$ )

Temperatura de Trabajo (°C):

Superficie Captadora (m2):

Datos de Generación y Demanda Energetica:

Figura 5-1: Pestaña General. Datos generales

La superficie captadora es el parámetro que la herramienta emplea para convertir la energía generada por unidad de superficie de captación, obtenida en el Excel, en la energía total generada. Este valor es común para todas las tecnologías solares y puede modificarse, lo que permite analizar cómo varían los resultados de la instalación en función de la superficie considerada.

### Tecnologías para comparar

Es importante señalar que, en función de la temperatura de trabajo seleccionada, algunas tecnologías no estarán disponibles para la comparación, ya sea porque su funcionamiento resulta inviable a esa temperatura o porque

aún se encuentran en fase de desarrollo para dichas condiciones (Figura 3-5).

Tecnologías a comparar

- FV + Bomba de Calor
- FV + Resistencia eléctrica
- FV + Bomba de Calor y Resistencia
- Captadores Planos
- Captadores Tubo de Vacío
- Colector Fresnel
- Colector Cilindro Parabólico

Figura 5-2: Pestaña General. Tecnologías para Comparar.

Adicionalmente, el usuario debe introducir la eficiencia de la resistencia del depósito de almacenamiento que también calienta el fluido en el caso las tecnologías termosolares que usen resistencia eléctrica. Y el COP de la bomba de calor en el caso que se use bomba de calor.

COP:

Eficiencia Resistencia:

Figura 5-3: Pestaña General. Bomba de Calor y Resistencia

### 5.2.1 Datos relativos a la generación horaria de energía (Fichero Excel)

Como se ha dicho anteriormente, la función del Excel es proporcionar el perfil horario de la energía generada (térmica en el caso de las termosolares y eléctrica en el caso de la fotovoltaica) así como el perfil horario de la demanda.

#### Perfil horario de la demanda térmica (kWh)

Para simplificar la entrada de datos, se incluye una tabla (figura 5-4) en la que el usuario introduce la demanda media horaria de cada mes (kWh). A partir de esos valores, el libro relleno automáticamente la columna donde se ubica el perfil horario de la demanda térmica, evitando tener que introducir la demanda hora a hora (p. ej., 8760 registros al año). Opcionalmente si el usuario desea ser más preciso también puede rellenar de forma manual el perfil horario de la demanda.

Demanda media horaria (kWh)	
Enero	
Febrero	
Marzo	
Abril	
Mayo	
Junio	
Julio	
Agosto	
Septiembre	
Octubre	
Noviembre	
Diciembre	

Figura 5-4: Fichero Excel. Demanda horaria media por mes (kWh)



**Perfil horario de la energía térmica generada por superficie de captación – Tecnologías termosolares (kWh/ m<sup>2</sup>)**

La hoja completa de forma automática la columna mostrada en la figura 5-9, correspondiente al perfil horario de la energía térmica generada por superficie de captación. Para ello el usuario debe introducir el perfil horario de la energía térmica generada en la columna mostrada en la figura 5-8 y la superficie de captación de cada tecnología termosolar (figura 5-6) a partir de estos datos se calcula el perfil horario de la energía térmica generada por superficie de captación (apartado 4.1.1).

Energía térmica generada (kWh)			
CP	TV	CF	CCP
0	0	0	0
0.104622	0.104622	0	0
0.0492108	0.0492108	0	0
0.0368502	0.0368502	0	0
0.0430111	0.0430111	0	0
0.0895099	0.0895099	0	0
0.299916	0.299916	0	0
0.689729	0.687664	0	0
0.771104	0.763859	0	0
0.701354	0.690246	0	0
0.40982	0.403852	0	0

Figura 5-8: Perfil horario de la energía térmica generada (kWh)

Energía térmica generada por metro cuadrado (kWh/m <sup>2</sup> )			
CP	TV	CF	CCP
0	0	0	0
0.040708949	0.027245313	0	0
0.019148171	0.012815313	0	0
0.014338599	0.009596406	0	0
0.016735837	0.011200807	0	0
0.034828755	0.02330987	0	0
0.116698833	0.078103125	0	0
0.268377043	0.179079167	0	0
0.300040467	0.198921615	0	0
0.272900389	0.179751563	0	0
0.159463035	0.105169792	0	0

Figura 5-9: Perfil horario de la energía térmica generada por superficie de captación (kWh/m<sup>2</sup>)

**Precio horario kWh (€/kWh)**

En caso de que el usuario desee introducir precios horarios de la energía, deberá completar la columna que se muestra en la siguiente figura.

Precio kWh (€/kWh)
24.14
24.14
24.14

Figura 5-10: Fichero Excel. Precio kWh (€/kWh)

### Perfil horario de radiación (Wh/ m<sup>2</sup>) y Temperatura ambiente (°C)

En las columnas mostradas en la figura, el usuario puede introducir, si lo desea, el perfil horario de las componentes de la radiación. Aunque estos datos no se utilizan en los cálculos, se incluyen en la plantilla por si el usuario desea incorporarlos.

T2m	G(h)	Gb(n)	Gd(h)	G(i)
5.52	0.0	-0.0	0.0	0.0
4.66	0.0	-0.0	0.0	0.0
3.81	0.0	-0.0	0.0	0.0
2.95	0.0	-0.0	0.0	0.0
2.09	0.0	-0.0	0.0	0.0
1.24	0.0	-0.0	0.0	0.0
0.38	0.0	-0.0	0.0	0.0
-0.48	0.0	-0.0	0.0	0.0
0.98	0.0	0.0	0.0	0.0
1.98	130.0	455.22	54.0	55.51
5.61	260.0	658.0	74.0	56.93

Figura 5-11: Fichero Excel. Perfil horario radiación

Donde:

G(h): Radiación global en el plano horizontal (Wh/ m<sup>2</sup>)

G(i): Radiación global en el plano inclinado (Wh/ m<sup>2</sup>)

Gb(n) o DNI: Radiación directa sobre un plano siempre normal a los rayos solares (Wh/ m<sup>2</sup>)

Gd(h): Radiación difusa en el plano inclinado (Wh/ m<sup>2</sup>)

T2M: Temperatura ambiente (°C)

### 5.3 Pestaña 2 – Parámetros Económicos.

En esta pestaña el usuario debe introducir los parámetros económicos necesarios para el análisis económico.

#### Datos Generales

- Tasa de descuento
- Precio de la energía térmica de la tecnología que se sustituye (€/kWh)

Tasa de Descuento:	<input type="text" value="0.05"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Precio kWh (€/kWh):	<input type="text" value="0.13"/>

Figura 5-12: Parámetros Económicos. General

Junto al campo de **Precio kWh** se encuentra un checkbox que el usuario deberá marcar si desea introducir un precio constante. En caso contrario, si los datos horarios se han cargado mediante el archivo Excel, este checkbox deberá permanecer desmarcado y la caja de texto quedará deshabilitada.

### Datos tecnologías solares

Cada tecnología cuenta con un campo de texto donde el usuario debe introducir:

La inversión inicial por superficie de instalación (€/m<sup>2</sup>).

El valor residual por superficie de instalación (€/m<sup>2</sup>).

El coste de mantenimiento por superficie de instalación(€/m<sup>2</sup>).

La vida útil de la instalación (años).

Inversión Inicial (€/m <sup>2</sup> ):	<input type="text" value="120"/>
Coste Mantenimiento (€/m <sup>2</sup> ):	<input type="text" value="2.7"/>
Vida útil:	<input type="text" value="25"/>
Valor Residual (€/m <sup>2</sup> ):	<input type="text" value="0.5"/>

Figura 5-13: Parámetros Económicos. Datos tecnologías

Estos parámetros corresponden al módulo fotovoltaico y al inversor en el caso de la tecnología fotovoltaica y en el caso de las tecnologías termosolares corresponden al captador y el intercambiador si es necesario usarlo.

### Bomba de Calor

En el caso que se use bomba de calor el usuario debe introducir el precio por potencia eléctrica instalada, que corresponde a la potencia máxima eléctrica consumida en una hora.

Bomba de Calor

Inversión Inicial (€/kW):	<input type="text" value="90000"/>
Coste Mantenimiento (€/kW):	<input type="text" value="2700"/>
Valor Residual (€/kW):	<input type="text" value="0"/>

Figura 5-14: Parámetros Económicos. Bomba de Calor

### Almacenamiento térmico

En el caso del almacenamiento térmico el usuario debe introducir el precio por capacidad de almacenamiento térmico instalado, este valor corresponde tanto al depósito como a la resistencia eléctrica, en el caso de que se utilice tecnología fotovoltaica con resistencia eléctrica, este parámetro incluye también el coste de la resistencia que calienta el fluido ya que es la misma.

Almacenamiento Térmico

Inversión Inicial (€/kWh):

Coste Mantenimiento (€/kWh):

Valor Residual (€/kWh):

Figura 5-15: Parámetros Económicos. Almacenamiento Térmico

## 5.4 Pestaña 3 – Resultados

En esta pestaña, al pulsar el botón Aceptar, se mostrará una tabla con los resultados técnico-económicos de las tecnologías seleccionadas para la comparación. La tabla incluirá: energía generada por superficie de captación, energía generada total, demanda total, demanda cubierta de forma directa, demanda cubierta mediante el depósito, cobertura, rendimiento global del sistema, capacidad de almacenamiento, excedentes, así como los indicadores económicos VAN, TIR y LCOE.

Tecnología	Energía Generada (kWh/m2)	Demanda (kWh)	Demanda Cubierta Directa (kWh)	Demanda Cubierta Deposito (kWh)	Cobertura (%)	Rendimiento (%)	Almacenamiento (kWh)	Excedentes (kWh)	VAN (€)	TIR (%)	LCOE (€/kWh)

Figura 5-16: Resultados

Además, se dispone del botón Exportar, que permite al usuario generar un archivo Excel con el perfil horario de la energía térmica producida junto con los datos de entrada. También está disponible el botón Borrar, que limpia la tabla de resultados mostrada. Es importante destacar que cada vez que el usuario modifique algún dato de entrada, deberá pulsar nuevamente el botón Aceptar para actualizar los resultados

# 6 APLICACIÓN PRÁCTICA

## 6.1 Producción de calor a 50 °C para ACS en un Hospital

La producción de Agua Caliente Sanitaria (ACS) en hospitales constituye una de las aplicaciones con mayor demanda energética dentro del sector servicios, debido a la necesidad continua y estable de agua caliente para garantizar condiciones de higiene, confort y seguridad sanitaria. En este caso de estudio se analiza la viabilidad y el dimensionamiento de un sistema solar para la cobertura parcial de la demanda de ACS en un hospital situado en la ciudad de Sevilla, capital, donde las condiciones climáticas resultan favorables para el aprovechamiento de la energía solar.

### 6.1.1 Datos relativos al perfil horario de generación y demanda térmica (Fichero Excel)

#### Perfil horario de energía generada por superficie de captación (kWh/ m<sup>2</sup>):

Para este caso de estudio se empleó el software SAM con el objetivo de obtener tanto el perfil horario de generación de energía eléctrica fotovoltaica (FV) como la producción de energía térmica en las distintas tecnologías termosolares, considerando un año típico meteorológico (TMY). El software proporciona, por un lado, la energía generada (en kWh) y, por otro, la superficie de captación utilizada en la simulación. A partir de estos datos, se calcula la energía generada por unidad de superficie de captación dividiendo la energía obtenida entre la superficie considerada por SAM.

Posteriormente, en la interfaz de la aplicación desarrollada se introduce la superficie de captación deseada, la cual se aplica de manera común a todas las tecnologías seleccionadas por el usuario.

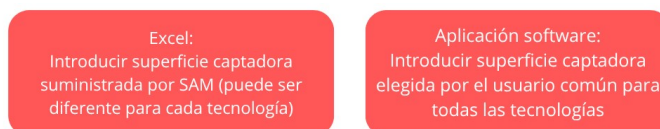


Figura 6-1: Superficies captadoras (m<sup>2</sup>)

Los equipos y las superficies captadoras de las instalaciones solares seleccionadas en la herramienta SAM se muestran en las figuras 6-1 y 6-2. En este caso de estudio se ha considerado, para todas las instalaciones, un sistema fijo sin seguimiento solar.

Instalación Fotovoltaica	Instalación Captadores Planos	Instalación Tubo de Vacío
Potencia nominal: 1000 kWdc	Emmett North America Inc. Arcobaleno STNA 2	Advanced thermal solar LLC advanced Thermal Solar LLC SP-S58-1800A-22
Tipo de modulo: Standard	Area total: 2.57 m <sup>2</sup>	Area total: 3.84 m <sup>2</sup>
Area estimada total: 5263 m <sup>2</sup>	Numero de captadores: 1	Numero de captadores: 1

Figura 6-2: Caso 1. Instalaciones seleccionadas herramienta SAM.

En la Figura 6-2 se muestran los datos introducidos en la aplicación informática correspondientes a los cálculos de generación para cada tecnología.

En el caso de la instalación fotovoltaica, se emplea un sistema genérico en el que únicamente es necesario introducir la potencia nominal instalada y el tipo de módulo. A partir de esta información, el software calcula automáticamente el área total de la instalación, es decir, la suma de las superficies de captación de todos los paneles fotovoltaicos utilizados para determinar la energía eléctrica generada. No obstante, el programa no especifica la superficie individual de cada módulo.

Por otro lado, para las instalaciones de energía termosolar, se seleccionan los fabricantes de los equipos, y cada uno de ellos cuenta con una superficie de captación específica. Además, el usuario puede definir el número de captadores a emplear. En nuestro caso, se ha seleccionado, para ambas tecnologías, un único captador.

	Superficie Captadora (m <sup>2</sup> )
Instalación Fotovoltaica	5263
Instalación Captadores Planos	2.57
Instalación Tubo de vacío	3.84

Figura 6-3: Caso 1. Superficie Captadora Instalaciones (m<sup>2</sup>).

Las siguientes superficies corresponden a las utilizadas en SAM para el cálculo de la energía generada. En el caso de la instalación fotovoltaica, dicha superficie es la obtenida según el procedimiento explicado anteriormente. En cuanto a las instalaciones termosolares, la superficie corresponde al área específica de cada colector multiplicada por el número de colectores instalados, que en nuestro caso es uno. Por tanto, el área considerada es la misma para ambos casos y el área mostrado en la figura 6-2 y 6-3 coincide

#### Perfil horario de la demanda térmica (kWh):

Con el fin de mejorar la calidad de la simulación del caso de estudio, se ha elaborado un perfil horario de la demanda térmica a partir de la siguiente tabla. Para cada mes se consideran tres valores diferenciados según la franja horaria: mañana (06:00–13:59), tarde (14:00–21:59) y noche (22:00–05:59). Los valores que aparecen en las celdas corresponden a la demanda térmica horaria representativa de cada franja.

Mes	Mañana	Noche	Tarde
1	24.70734	20.09097	24.70734
2	45.53821	19.17571	45.53821
3	43.36815	18.26323	43.36815
4	41.07467	16.84733	41.07467
5	38.62234	16.4371	38.62234
6	32.79125	2.134	32.79125
7	36.86718	15.52226	36.86718
8	34.73137	2.247742	34.73137
9	41.07467	16.84733	41.07467
10	42.25266	18.26	42.25266
11	43.05917	18.44167	43.05917
12	24.63621	19.17548	24.63621

Figura 6-4: Perfil horario demanda térmica (kWh)

#### Perfil horario de los componentes de la radiación y temperatura ambiente.

Por otro lado, en el Excel se han incorporado los perfiles horarios de los distintos componentes de la radiación y de la temperatura ambiente únicamente a modo informativo, ya que no son necesarios para los cálculos de energía generada, los cuales se realizan directamente en SAM.

### 6.1.2 Datos introducidos directamente en la interfaz de la aplicación

#### Tecnologías que comparar:

Dada la temperatura de trabajo las tecnologías a comparar son las siguientes:

Tecnología Fotovoltaica con Bomba de Calor
Tecnología Fotovoltaica con Resistencia Eléctrica
Captadores Planos
Captadores Tubo de Vacío

Figura 6-5: Caso 1. Tecnologías que comparar

### Superficie captadora común para todas las instalaciones (m<sup>2</sup>)

Superficie Captadora (m<sup>2</sup>):

Figura 6-6: Caso 1. Superficie captadora común para todas las instalaciones (m<sup>2</sup>)

Esta superficie se considera común para todas las instalaciones, tanto fotovoltaicas como termosolares.

Este valor puede modificarse con el fin de analizar cómo varía el comportamiento de la instalación en función de la superficie de captación. Por este motivo, desde Excel se exportan los datos de generación normalizados por unidad de superficie captadora.

Aunque a primera vista pueda parecer poco lógico obtener los resultados en SAM en kWh, convertirlos posteriormente a valores por unidad de superficie y finalmente volver a expresarlos en kWh, este procedimiento permite ajustar la superficie captadora de forma sencilla y rápida, sin necesidad de volver a generar todos los perfiles en SAM cada vez que se desea modificar dicho parámetro

### Parámetros económicos

La figura muestra los costes normalizados por superficie de captación (€/m<sup>2</sup>) de distintas tecnologías solares. Para la fotovoltaica se consideran el módulo y el inversor, mientras que en las termosolares los costes corresponden solo a los captadores e intercambiador en el caso de que fuese necesario. [16] [17]

Tecnología	Inversión inicial (€/m <sup>2</sup> )	Mantenimiento (% inv./año)	Valor residual (% inv.)	Vida útil (años)	Fundamentos
FV (fotovoltaica)	120-170 €/m <sup>2</sup>	1-1,5 %	5-10 %	25-30	Grandes plantas FV en España: 600-800 €/kWp → ~150 €/m <sup>2</sup> (IRENA 2023, Fraunhofer ISE)
CP (colector plano industrial)	200-300 €/m <sup>2</sup>	1-1,5 %	~5 %	20-25	IDAE, <a href="#">Protermosolar</a> , Solar Heat for Industrial Processes
TV (tubo de vacío)	300-450 €/m <sup>2</sup>	1-1,5 %	~5 %	20-25	Solar <a href="#">Heat Worldwide 2023</a> , IDAE
CF (colector Fresnel)	450-650 €/m <sup>2</sup>	~2 %	~5 %	25	IEA SHC, <a href="#">Protermosolar</a>
CCP (cilindro parabólico)	600-900 €/m <sup>2</sup>	2-3 %	~5 %	25-30	<a href="#">Protermosolar</a> , Fraunhofer ISE, proyectos CSP en España

Figura 6-7: Parámetros Económicos. Tecnologías Solares [17][18]

La figura siguiente compara los costes en €/kW eléctrico instalado de la bomba de calor. Las bombas de calor tienen un coste de mantenimiento anual del 2–4 % de la inversión inicial y un valor residual del 5–10 %. Estos

costes se aplican al caso de la tecnología fotovoltaica con bomba de calor. En el caso del módulo fotovoltaico con resistencia eléctrica, la única resistencia considerada es la del depósito de almacenamiento, que eleva y mantiene la temperatura del fluido. [19]

Tecnología	50 °C (€/kW)	100 °C (€/kW)	120 °C (€/kW)	180 °C (€/kW)	250 °C (€/kW)
Bomba de calor (BC)	400-700	450-800	—	—	—

Figura 6-8: Parámetros Económicos. Bomba de calor [19]

La siguiente tabla muestra los costes de almacenamiento térmico (€/kWh) para distintos rangos de temperatura, correspondientes al depósito de almacenamiento y a la resistencia eléctrica asociada que también sirve para calentar el fluido en el caso de tecnología fotovoltaica con resistencia eléctrica o con bomba de calor y resistencia eléctrica. [20]

Temperatura (°C)	Inversión inicial (€/kWh)	Coste de mantenimiento (%/año)	Valor residual (% inversión)
50	10 – 20	1 – 2 %	5 – 10 %
120	20 – 30	1,5 – 2,5 %	5 – 10 %
180	30 – 45	2 – 3 %	10 – 15 %
250	40 – 70	1 – 2 %	5 – 10 %

Figura 6-9: Parámetros Económicos. Almacenamiento Térmico [20]

La vida útil de cada instalación se fijará según la tecnología solar principal de generación, considerando en consecuencia a los equipos de apoyo (bombas de calor o resistencias eléctricas) y al almacenamiento con la misma referencia temporal.

Según las tablas observadas anteriormente se han seleccionado los siguientes parámetros económicos mostrados en las siguientes figuras.

tasa de descuento	0.05
precio kWh (€/kWh)	0.13

Figura 6-10: Caso 1. Parámetros Económicos 1

	Inversión Inicial (€/m <sup>2</sup> )	Coste de Mantenimiento (€/m <sup>2</sup> )	Valor residual (€/m <sup>2</sup> )	Vida util (años)
Fotovoltaica	150	1.5	7	25
Captadores Planos	250	7	20	25
Tubo de Vacío	350	9.5	35	25

Figura 6-11: Caso 1. Parámetros Económicos 2

	Inversión Inicial (€/kW)	Coste de Mantenimiento (€/kW)	Valor residual (€/kW)
Bomba de calor	900	20	90

Figura 6-12: Caso 1. Parámetros Económicos 3

	Inversión Inicial (€/m <sup>2</sup> )	Coste de Mantenimiento (€/m <sup>2</sup> )	Valor residual (€/m <sup>2</sup> )
Almacenamiento térmico	30	3	0

Figura 6-13: Caso 1. Parámetros Económicos 4

### 6.1.3 Resultados Iniciales

Tecnología	Energía Generada (kWh/m <sup>2</sup> )	Energía Total Generada (kWh)	Demanda (kWh)	Demanda Cubierta Directa (kWh)	Demanda Cubierta Deposito (kWh)
FV + BC	1103.77	1103766.45	27386032.00	1059944.20	48204.48
FV + Resistencia	324.64	324637.19	27386032.00	320401.81	4658.92
Captadores Planos	906.60	906595.05	27386032.00	893775.71	12819.34
Tubo de vacío	643.85	643851.57	27386032.00	638847.96	5003.61

Tecnología	Cobertura (%)	Rendimiento (%)	Almacenamiento (kWh)	Excedentes (kWh)	VAN (€)	TIR (%)	LCOE (€/kWh)
FV + BC	4.05	100.00	43822.25	0.00	380793.91	7.45	0.10
FV + Resistencia	1.19	100.00	4235.38	0.00	252872.77	12.88	0.06
Captadores Planos	3.31	100.00	12819.34	0.00	258042.73	8.76	0.10
Tubo de vacío	2.35	100.00	5003.61	0.00	243377.04	9.44	0.09

Figura 6-14: Caso 1. Resultados Iniciales.

En la Figura 6-5 se observa que la energía térmica generada por unidad de superficie de captación es mayor en el caso de la fotovoltaica con bomba de calor, tal como era previsible. Le siguen las tecnologías termosolares y, finalmente, la fotovoltaica con resistencia eléctrica.

Por otro lado, la cobertura resultante es mínima, lo que se explica porque la superficie inicial de 1000 m<sup>2</sup>, común para todas las tecnologías solares, resulta muy reducida frente a la elevada demanda total considerada. Cabe destacar, además, que el valor de almacenamiento mostrado corresponde a la energía acumulada al final del periodo de estudio, bajo la hipótesis de un almacenamiento ilimitado.

Asimismo, en el archivo Excel se ha generado el perfil horario de la energía producida (kWh), lo que permite realizar un análisis más detallado de la distribución temporal de la generación.

Con el fin de profundizar en los resultados, en el siguiente apartado se llevará a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar cómo varían los parámetros en función de la superficie de captación y de la capacidad de almacenamiento.

Cabe señalar que el rendimiento indicado en la tabla hace referencia al rendimiento global del sistema, tal como se explicó anteriormente.

### 6.1.4 Análisis de sensibilidad

#### 6.1.4.1 Análisis de sensibilidad respecto a la superficie de captación

En este primer análisis de sensibilidad se evaluará cómo varía el rendimiento, el porcentaje de demanda cubierta y el VAN en función de la superficie de captación, manteniendo en todos los casos una capacidad de almacenamiento térmico constante de 10000 kWh.

### Relación entre superficie de captación y rendimiento global del sistema

Como se aprecia en el siguiente gráfico, el rendimiento global del sistema disminuye a medida que aumenta la superficie de captación, debido a la limitación impuesta por la capacidad de almacenamiento. Se observa además que la curva con una caída más pronunciada corresponde a la combinación de fotovoltaica con bomba de calor, ya que, como se comentó anteriormente, es la tecnología que genera mayor energía por unidad de superficie captadora. En contraste, en el caso de la fotovoltaica con resistencia eléctrica, el rendimiento se mantiene prácticamente constante, puesto que es la opción que menos energía térmica produce.

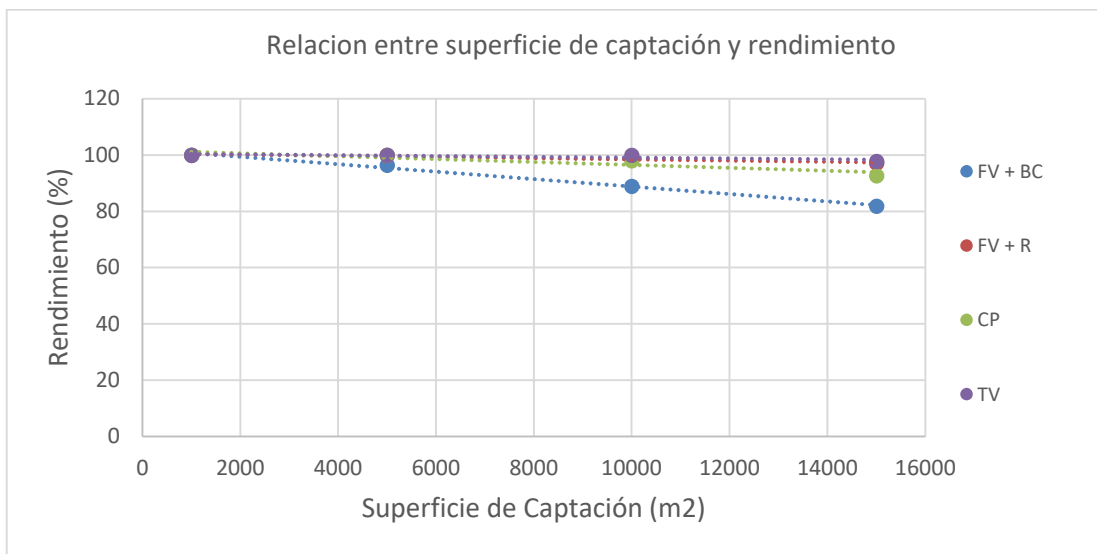


Figura 6-15: Caso 1. Relación entre superficie de captación y rendimiento

### Relación entre superficie de captación y demanda cubierta

Como se muestra en la siguiente figura, el porcentaje de demanda cubierta aumenta de manera pronunciada en todos los casos a medida que crece la superficie de captación. Asimismo, se observa que la tecnología fotovoltaica con bomba de calor alcanza los valores más altos debido a su alto rendimiento, seguida de los captadores planos, mientras que la fotovoltaica con resistencia eléctrica presenta los menores porcentajes debido a su bajo rendimiento de generación.

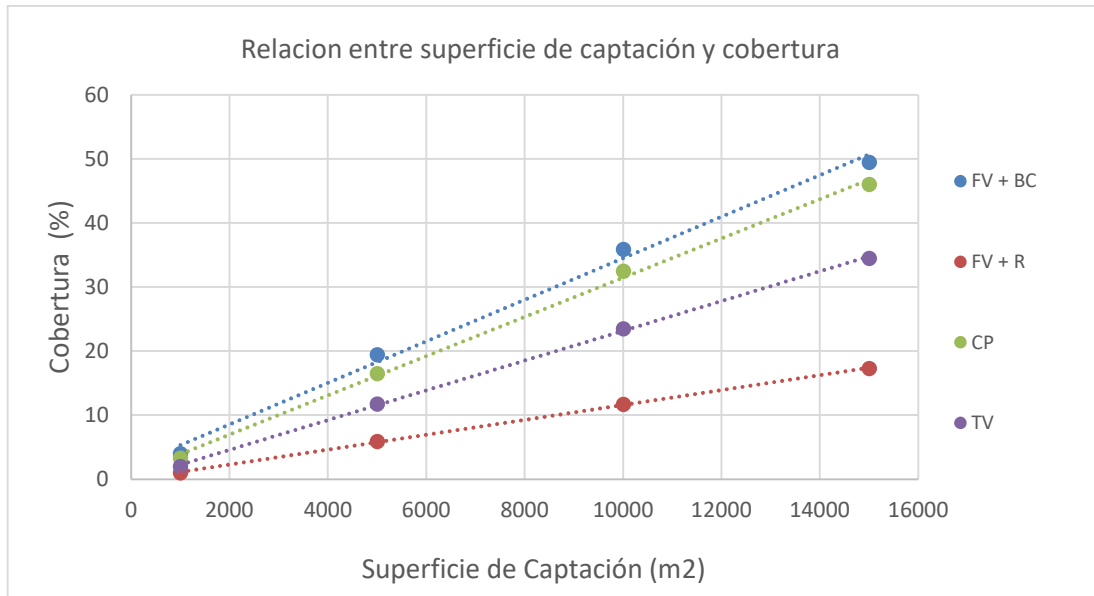


Figura 6-16: Caso 1. Relación entre superficie de captación y porcentaje de demanda cubierta

### Relación entre superficie de captación y VAN

Observando el siguiente gráfico se aprecia que el VAN aumenta de forma notable para todas las tecnologías analizadas, incluso partiendo de valores negativos en el caso de los colectores de tubo de vacío. Una vez más, las tecnologías que alcanzan los valores más elevados son la fotovoltaica con bomba de calor, seguida de los captadores planos. En conclusión, del análisis del gráfico se deduce que, a mayor superficie de captación, mayor es la rentabilidad de la instalación.

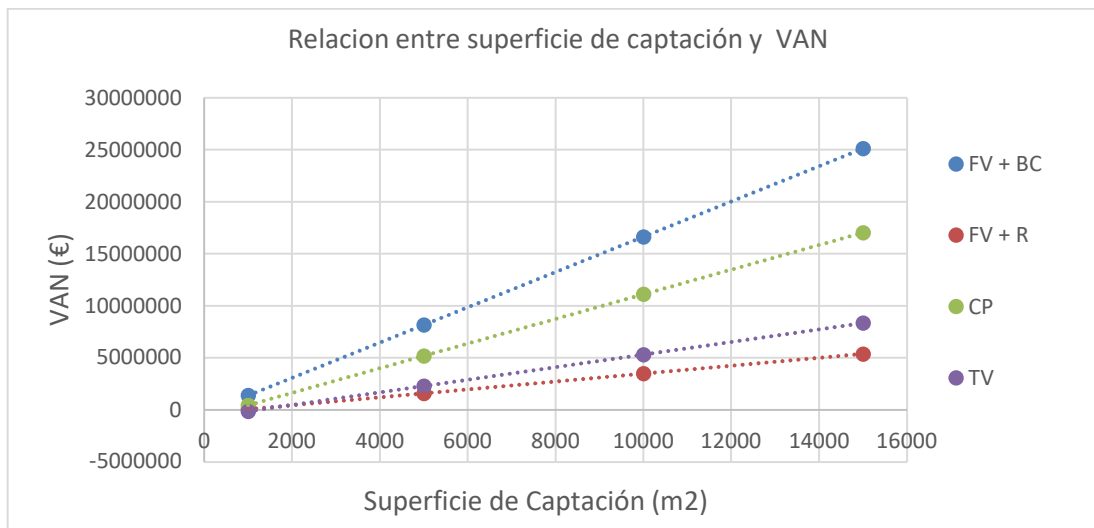


Figura 6-17: Caso 1. Relación entre superficie de captación y VAN

#### 6.1.4.2 Análisis de sensibilidad respecto a la capacidad de almacenamiento

En este apartado del análisis de sensibilidad se evaluará como varía el rendimiento, el porcentaje de demanda cubierta y el VAN en función de la capacidad de almacenamiento, manteniendo en todos los casos una superficie de captación constante de  $10000 \text{ m}^2$ .

#### Relación entre capacidad de almacenamiento y rendimiento global del sistema

Al observar el siguiente gráfico se aprecia que el rendimiento aumenta conforme se incrementa la capacidad de almacenamiento para todas las tecnologías, llegando a valores próximos al 100 % en los casos de mayor capacidad, manteniendo constante la superficie de captación. En este escenario, la tecnología fotovoltaica con bomba de calor presenta los valores más bajos, ya que la elevada energía térmica generada se ve limitada por la capacidad de almacenamiento disponible.

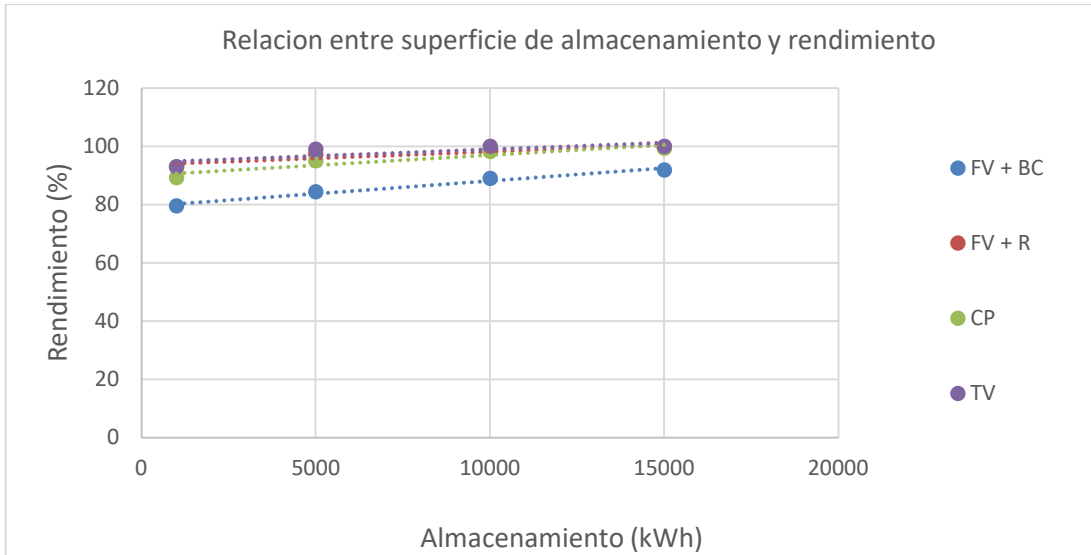


Figura 6-18: Caso 1. Relación entre capacidad de almacenamiento y rendimiento.

Quita lo de superficie de almacenamiento en el enunciado de la Fig. 6-18.

### Relación entre capacidad de almacenamiento y cobertura

En el siguiente gráfico se observa cómo el porcentaje de demanda cubierta aumenta a medida que crece la capacidad de almacenamiento. No obstante, los valores varían significativamente en función de la tecnología empleada, destacando nuevamente la fotovoltaica con bomba de calor como la opción con mayores porcentajes de cobertura.

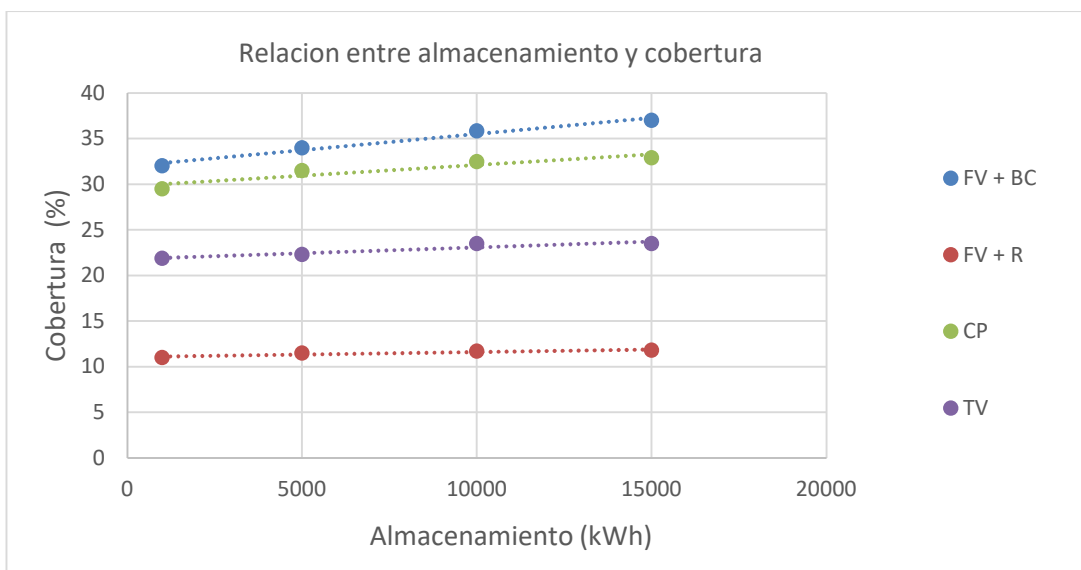


Figura 6-19: Caso 1. Relación entre capacidad de almacenamiento y porcentaje de demanda cubierta

## Relación entre capacidad de almacenamiento y VAN

En la siguiente figura se aprecia que el VAN disminuye ligeramente, manteniéndose prácticamente constante a medida que aumenta la capacidad de almacenamiento. Esto se debe a que los costes asociados al almacenamiento térmico tienen un impacto reducido sobre los costes totales, estando la capacidad de almacenamiento principalmente condicionada por la superficie disponible. Además, se observa que el VAN más favorable una vez es el de la fotovoltaica con bomba de calor

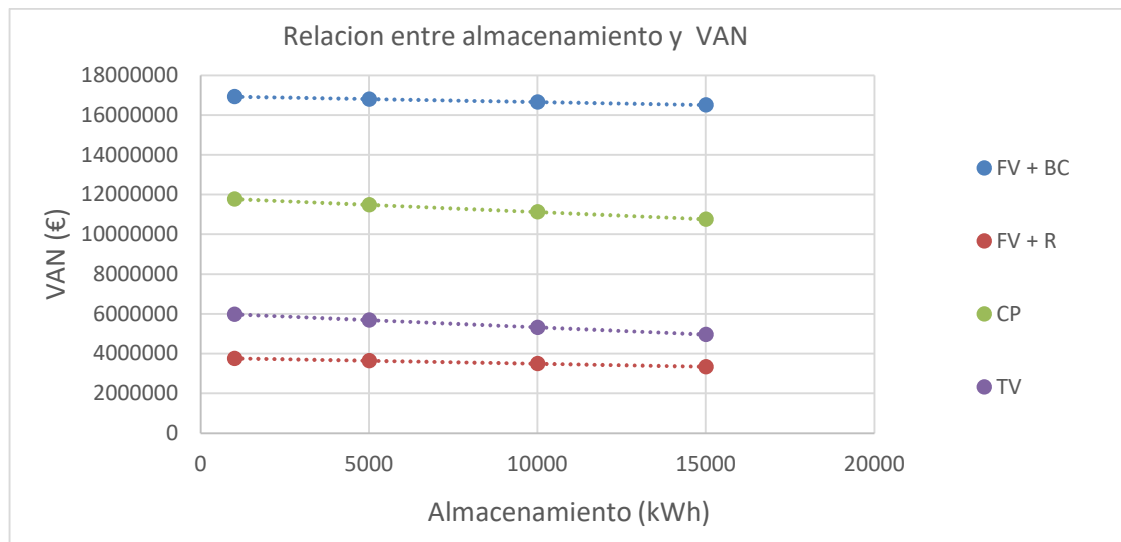


Figura 6-20: Caso 1. Relación entre capacidad de almacenamiento y VAN

En conclusión, tras analizar los principales factores, puede afirmarse, como era de esperar, que para la generación de calor destinada a ACS la tecnología más favorable es la fotovoltaica con bomba de calor, ya que presenta los valores más elevados tanto en el VAN como en el porcentaje de demanda cubierta.

Además, se demuestra que la herramienta desarrollada permite realizar una comparación real y objetiva entre las diferentes alternativas tecnológicas, mostrando de manera clara cuál resulta la más ventajosa para el escenario de estudio.

## 6.2 Producción de calor a 250 °C para esterilización en planta de conservas

La esterilización en autoclaves es una operación unitaria crítica en la industria alimentaria para garantizar la seguridad microbiológica y la vida útil del producto. Requiere un aporte térmico estable a temperaturas del orden de 230–250 °C (aceite térmico o vapor sobrecalentado). En este caso de estudio se evalúa la viabilidad y el dimensionamiento de varios sistemas solares para la cobertura parcial de la demanda térmica de un bloque de autoclaves en una planta situada en Avilés.

### 6.2.1 Datos relativos al perfil horario de generación y demanda térmica (Fichero Excel)

#### Perfil horario de energía generada por superficie de captación (kWh/ m<sup>2</sup>):

Para este caso de estudio se ha seguido la misma metodología descrita en el primer ejemplo: se utilizó el software SAM para obtener el perfil horario de generación de energía eléctrica fotovoltaica (FV) y la producción de energía térmica en las distintas tecnologías termosolares, considerando un año típico meteorológico (TMY). El programa proporciona, por un lado, la energía generada (kWh) y, por otro, la superficie de captación de la instalación empleada en la simulación. A partir de estos resultados se calcula la energía generada por unidad de superficie dividiendo la energía obtenida entre la superficie considerada por SAM. Posteriormente, en la interfaz de la aplicación desarrollada se introduce la superficie de captación deseada, común a todas las instalaciones seleccionadas por el usuario.

Los equipos y las superficies captadoras de las instalaciones solares seleccionadas en la herramienta SAM se muestran en las figuras 6-1 y 6-2. En este caso de estudio se ha considerado, para todas las tecnologías, un **sistema fijo** sin seguimiento solar.

<b>Instalación Fotovoltaica</b> Potencia nominal: 1000 kWdc Tipo de modulo: Standard Area estimada total 5263 m <sup>2</sup>	<b>Instalación Colector Fresnel</b> Colector generico SAM Area total: 513.6 Longitud modulo: 44.8 m	<b>Instalación Colector Cilindro Parabólico</b> Skyfue trough (with 800 mm od receiver) Longitud: 115m Apertura: 6m Area total: 656 m <sup>2</sup>
---	--	--

Figura 6-21: Caso 2. Instalaciones seleccionadas herramienta SAM.

	Superficie Captadora (m <sup>2</sup> )
Instalación Fotovoltaica	5263
Instalación Colector Fresnel	513
Instalación Colector cilindro parabólico	656

Figura 6-22: Caso 2. Superficie Captadora Instalaciones (m<sup>2</sup>).

Al igual que en el caso práctico 1, se ha empleado el mismo procedimiento para la instalación fotovoltaica.

En el caso del colector Fresnel, se ha seguido un enfoque similar, utilizando un colector genérico de SAM, en el cual el usuario únicamente introduce la superficie total de captación del sistema.

Por su parte, para el colector cilindro parabólico se ha utilizado el modelo detallado, y la superficie total del sistema corresponde a la indicada en la Figura 6-22.

### Perfil horario de la demanda térmica (kWh):

En este caso se ha utilizado la tabla del Excel y se han introducido valores constantes de demanda horaria para cada mes, de modo que cada franja horaria (mañana, tarde y noche) mantiene un valor fijo representativo a lo largo de todas las horas que la componen, lo que permite simplificar el perfil de demanda manteniendo una aproximación coherente con el comportamiento real del proceso.

Se supone además que cada hora dentro de un mismo mes presenta siempre el mismo valor de demanda, garantizando así la uniformidad del perfil mensual.

Demanda media horaria (kWh)	
Enero	400
Febrero	410
Marzo	430
Abril	450
Mayo	470
Junio	470
Julio	480
Agosto	490
Septiembre	485
Octubre	460

Noviembre	440
Diciembre	420

Figura 6-23: Caso 2. Perfil horario demanda térmica (kWh).

### Perfil horario de los componentes de la radiación y temperatura ambiente.

Por otro lado, en el Excel se han incorporado los perfiles horarios de los distintos componentes de la radiación y de la temperatura ambiente únicamente a modo informativo, ya que no son necesarios para los cálculos de energía generada, los cuales se realizan directamente en SAM. Pon los valores considerados en SAM.

### 6.2.2 Datos introducidos directamente en la interfaz de la aplicación

#### Tecnologías que comparar:

Dada la temperatura de trabajo las tecnologías a comparar son las siguientes:

Tecnología fotovoltaica con resistencia eléctrica
Tecnología fotovoltaica con bomba de calor y resistencia eléctrica
Colector Fresnel
Colector cilindro parabólico

Figura 6-24: Caso 2. Tecnologías que comparar

### Superficie captadora común para todas las tecnologías (m<sup>2</sup>)

Superficie Captadora (m2):

Figura 6-25: Caso 25. Superficie captadora común para todas las instalaciones (m<sup>2</sup>)

Esta superficie representa lo mismo que lo explicado en el caso práctico 1.

### Parámetros económicos

Según las tablas observadas anteriormente en el caso 1, se han seleccionado los siguientes parametros económicos mostrados en las siguientes figuras.

tasa de descuento	0.05
precio kWh (€/kWh)	0.13

Figura 6-26: Caso 2. Parámetros Económicos 1

	Inversión Inicial (€/m2)	Coste de Mantenimiento (€/m2)	Valor residual (€/m2)	Vida util (años)
Fotovoltaica	150	1.5	7	25
Colector Fresnel	600	20	25	25
Colector cilindro parabolico	800	25	90	25

Figura 6-27: Caso 2. Parámetros Económicos 2

	Inversión Inicial (€/kW)	Coste de Mantenimiento (€/kW)	Valor residual (€/kW)
Bomba de calor	900	20	90

Figura 6-28: Caso 2. Parámetros Económicos 3

	Inversión Inicial (€/m <sup>2</sup> )	Coste de Mantenimiento (€/m <sup>2</sup> )	Valor residual (€/m <sup>2</sup> )
Almacenamiento térmico	30	3	0

Figura 6-29: Caso 2. Parámetros Económicos 4

### 6.2.3 Resultados Iniciales

Tecnología	Energía Generada (kWh/m <sup>2</sup> )	Energía Total Generada (kWh)	Demanda (kWh)	Demanda Cubierta Directa (kWh)	Demanda Cubierta Deposito (kWh)
FV + Resistencia	316.04	3160409.14	3940800.00	1522319.50	1617259.28
FV + BC & R	382.97	3829672.25	3940800.00	1558382.31	2004826.14
Colector Fresnel	822.62	8226177.12	3940800.00	1279587.77	1954787.79
Cilindro Parabólico	949.17	9491742.82	3940800.00	1299582.42	1995496.25

Tecnología	Cobertura (%)	Rendimiento (%)	Almacenamiento (kWh)	Excedentes (kWh)	VAN (€)	TIR (%)	LCOE (€/kW)
FV + Resistencia	79.67	99.32	10000.00	21385.20	3354049.65	20.03	0.04
FV + BC & R	90.42	93.09	10000.00	264558.48	4484725.17	24.58	0.04
Colector Fresnel	82.07	39.32	10000.00	4991801.55	4371124.58	11.17	0.08
Cilindro Parabólico	83.61	34.72	10000.00	6196664.15	3806844.90	9.20	0.09

Figura 6-30: Caso 2. Resultados iniciales. Nuevamente aclara lo del rendimiento.

En la Figura 6-30 se presentan los resultados iniciales para el caso de estudio, considerando una superficie de captación de 10.000 m<sup>2</sup> y un almacenamiento térmico de 10.000 kWh. Se observa que la tecnología que mayor cobertura alcanza es la fotovoltaica con bomba de calor y resistencia, aunque no sea la que más energía genera por unidad de superficie. Su rendimiento global del sistema, concepto explicado anteriormente resulta muy elevado y, tras la fotovoltaica con resistencia, es la opción que menos excedentes produce. Además, presenta los valores más favorables de TIR, VAN y LCOE en comparación con el resto de las tecnologías analizadas.

### 6.2.4 Análisis de sensibilidad

#### 6.2.4.1 Análisis de sensibilidad respecto a la superficie de captación

En este primer análisis de sensibilidad se evaluará cómo varía el rendimiento, el porcentaje de demanda cubierta y el VAN en función de la superficie de captación, manteniendo en todos los casos una capacidad de almacenamiento térmico constante de 10000 kWh.

#### Relación entre superficie de captación y rendimiento global del sistema

En la siguiente figura se observa la variación del rendimiento global del sistema en función de la superficie de captación. A medida que la superficie aumenta, el rendimiento disminuye, ya que la energía térmica generada supera la capacidad de almacenamiento disponible, incrementando así los excedentes. Además, puede apreciarse que las tecnologías termosolares presentan una mayor dependencia de la superficie en lo que respecta al rendimiento, mientras que en las tecnologías basadas en fotovoltaica la reducción del rendimiento con el

incremento de superficie es mucho más limitada.

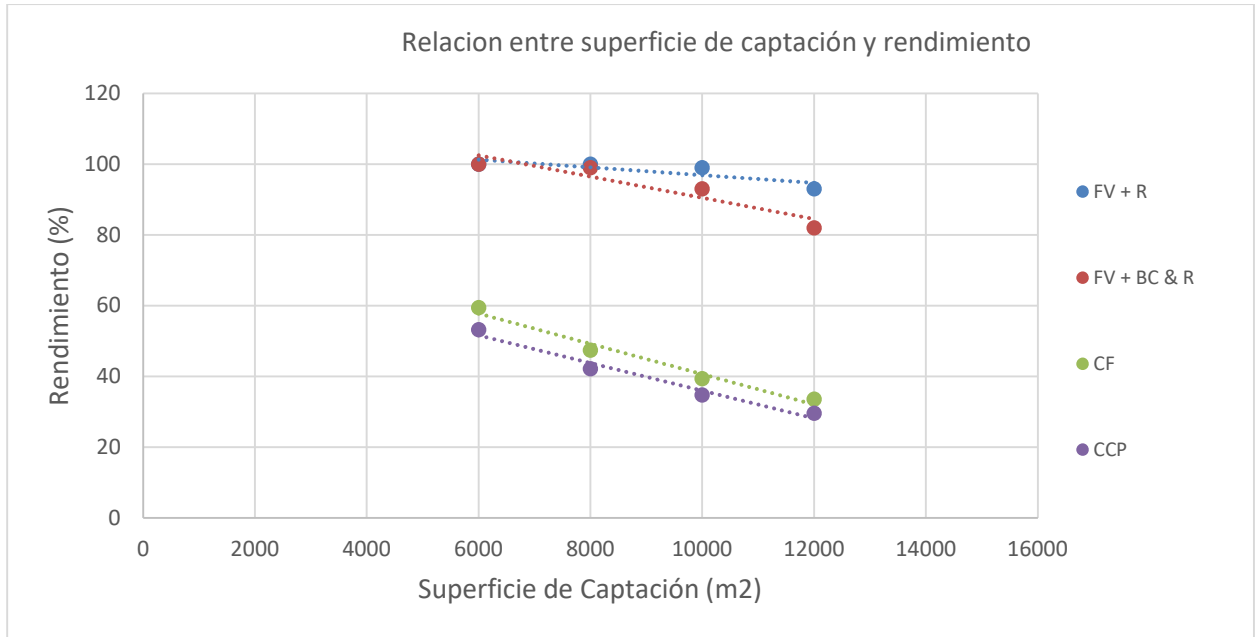


Figura 6-31: Caso 2. Relación entre superficie de captación y rendimiento.

### Relación entre superficie de captación y demanda cubierta

En la siguiente figura se aprecia una marcada relación entre la cobertura y la superficie de captación. Para superficies reducidas, en torno a 6.000 m<sup>2</sup>, las tecnologías termosolares alcanzan una mayor cobertura; sin embargo, al aumentar la superficie de captación, el crecimiento de la cobertura en las tecnologías fotovoltaicas resulta mucho más significativo, llegando incluso a superar a las termosolares.

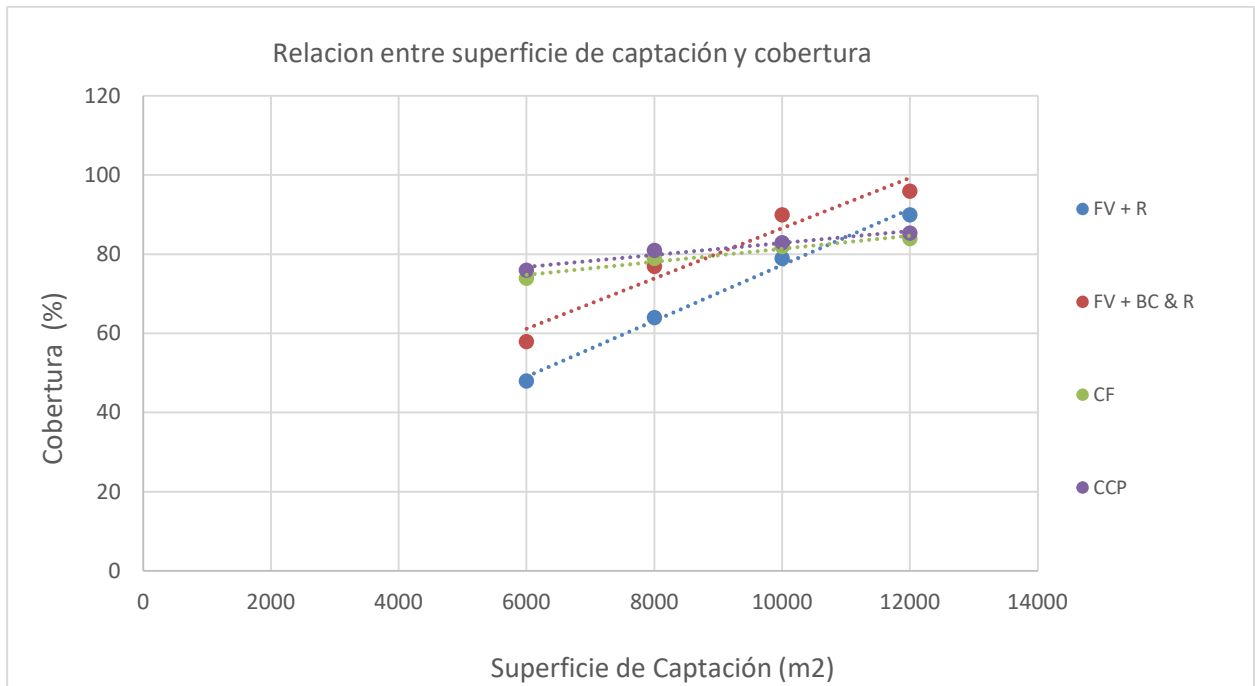


Figura 6-32: Caso 2. Relación entre superficie de captación y porcentaje de demanda cubierta

### Relación entre superficie de captación y VAN

En la siguiente figura se muestra la variación del VAN en función de la superficie de captación. Se observa que el VAN crece de forma notable al aumentar dicha superficie, alcanzando en todos los casos los valores más altos con la fotovoltaica combinada con bomba de calor y resistencia. No obstante, para superficies mayores, en torno a 12.000 m<sup>2</sup>, el colector Fresnel se aproxima a estos resultados. Por el contrario, la fotovoltaica con resistencia presenta los valores más bajos en la comparación.

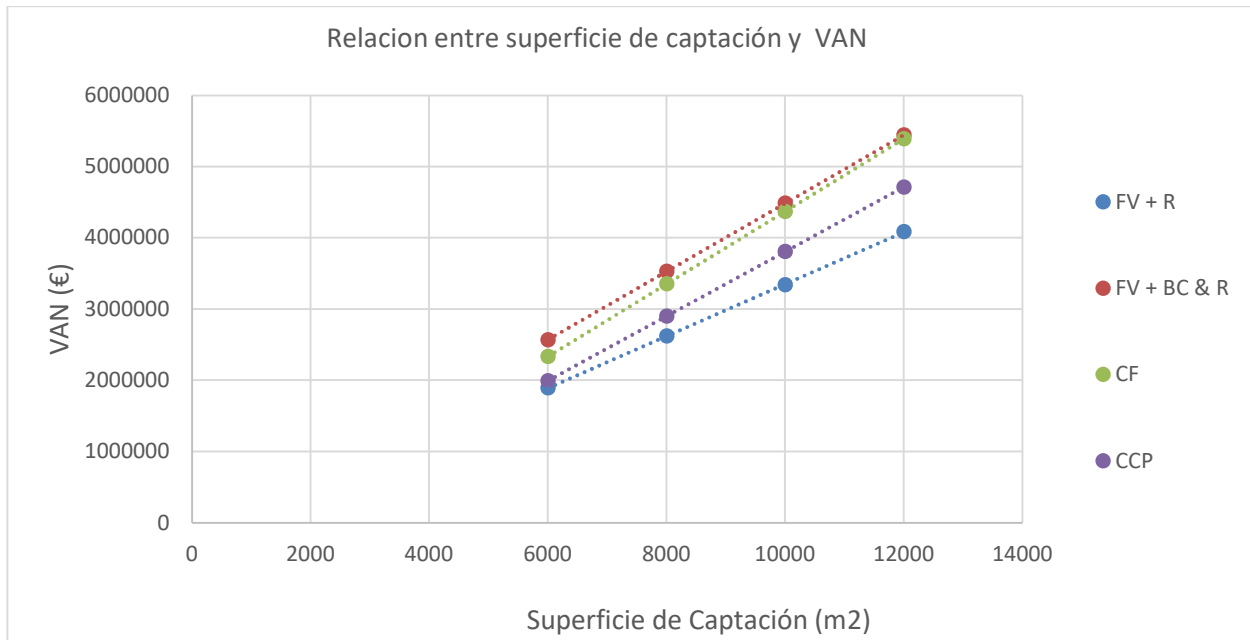


Figura 6-33: Caso 2. Relación entre superficie de captación y VAN

#### 6.2.4.2 Análisis de sensibilidad respecto a la capacidad de almacenamiento

En este análisis de sensibilidad se evaluará cómo varía el rendimiento, el porcentaje de demanda cubierta y el VAN en función de la capacidad de almacenamiento, manteniendo en todos los casos una superficie de captación constante de 10000 (m<sup>2</sup>).

##### Relación entre capacidad de almacenamiento y rendimiento global del sistema

En la siguiente figura se observa la relación entre la capacidad de almacenamiento y el rendimiento global del sistema de cada tecnología. En todos los casos, el rendimiento aumenta al incrementarse la capacidad de almacenamiento, ya que se consigue guardar una mayor cantidad de energía y se reducen los excedentes. Asimismo, las tecnologías basadas en fotovoltaica mantienen siempre los valores más altos de rendimiento,

mientras que las termosolares se sitúan en niveles inferiores.

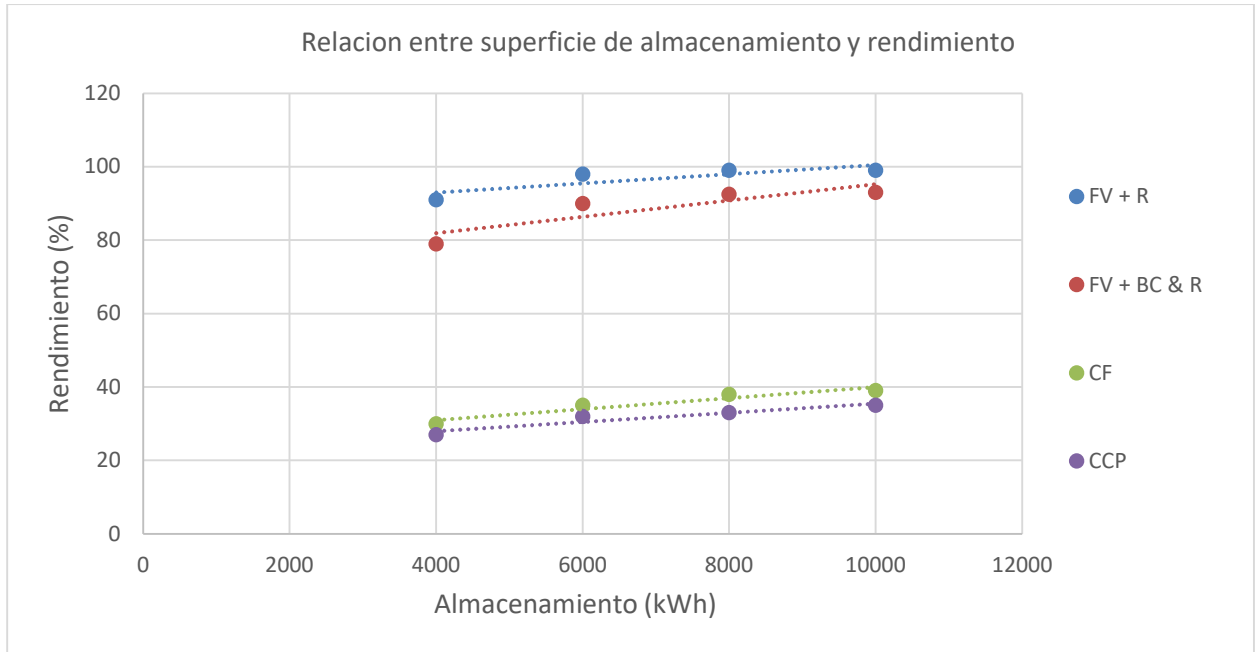


Figura 6-34: Caso 2. Relación entre capacidad de almacenamiento y rendimiento

### Relación entre capacidad de almacenamiento y cobertura

En la siguiente figura se muestra la relación entre la capacidad de almacenamiento y el porcentaje de demanda cubierta. Se observa que la fotovoltaica con bomba de calor y resistencia mantiene siempre los valores más elevados. Además, para capacidades reducidas, las tecnologías termosolares presentan una cobertura inferior a la fotovoltaica con resistencia eléctrica; sin embargo, al aumentar la capacidad de almacenamiento, logran superarla.

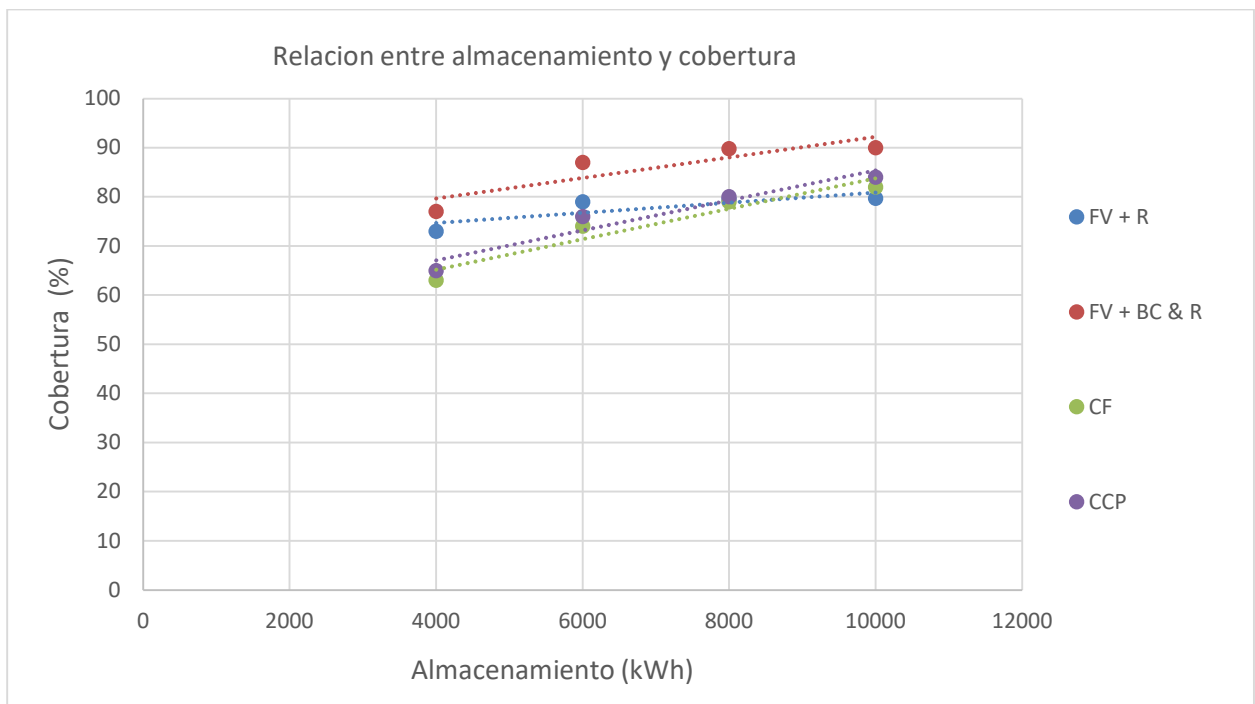


Figura 6-35: Caso 2. Relación entre capacidad de almacenamiento y porcentaje de demanda cubierta

### Relación entre capacidad de almacenamiento y VAN

En la siguiente figura se observa la relación entre la capacidad de almacenamiento y el VAN. En todos los casos, el VAN disminuye a medida que aumenta dicha capacidad. Inicialmente, los colectores Fresnel presentan un VAN superior al de la tecnología fotovoltaica con bomba de calor y resistencia; sin embargo, al incrementarse la capacidad de almacenamiento, esta última acaba superándolos. Por otro lado, la fotovoltaica con resistencia eléctrica es la que mantiene los valores más bajos de VAN.

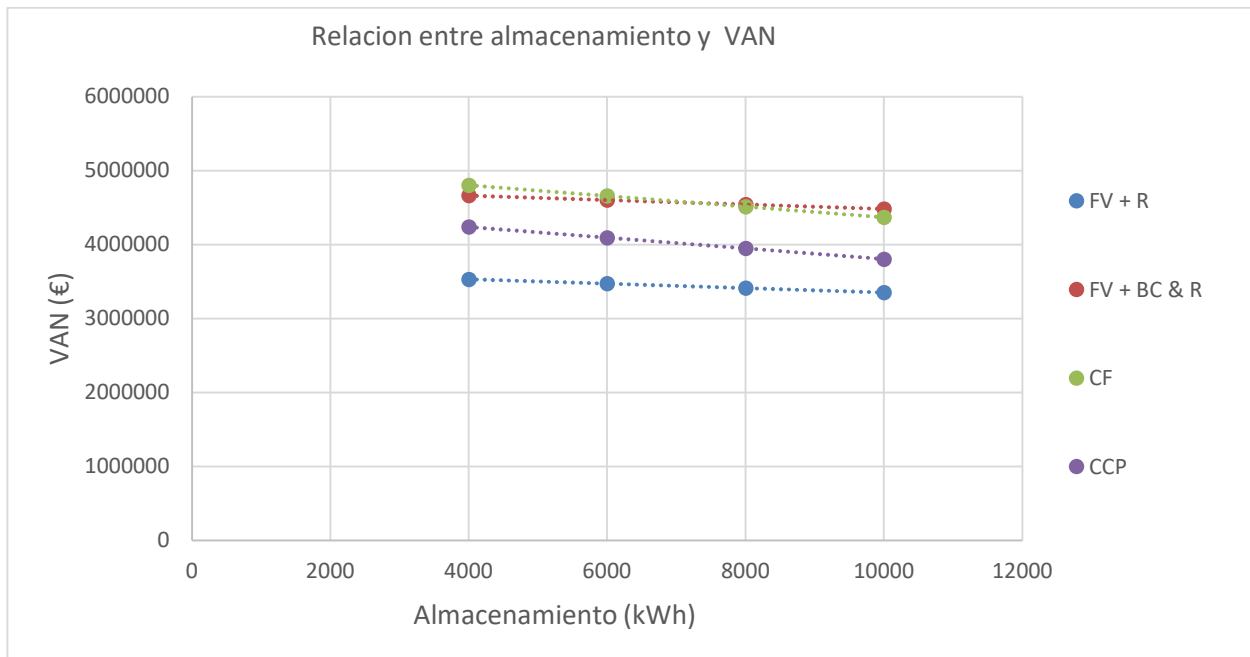


Figura 6-36: Caso 2. Relación entre capacidad de almacenamiento y VAN

En conclusión, la alternativa más rentable resulta ser la fotovoltaica con bomba de calor y resistencia en los escenarios analizados de superficie de captación y capacidad de almacenamiento. Cabe destacar que, a medida que aumentan ambos parámetros, la tecnología Fresnel muestra una mejora significativa. No obstante, los resultados están fuertemente condicionados por los parámetros económicos, los cuales dependen en gran medida del proveedor, la localización y otros factores externos.

# 7 CONCLUSIÓN

---

En conclusión, el presente trabajo ha permitido el desarrollo de una aplicación que sigue una metodología estructurada de comparación entre distintas tecnologías solares destinadas a la producción de calor. Dicha comparación se ha llevado a cabo considerando diferentes rangos de temperatura de operación, así como un perfil horario de demanda previamente definido.

A lo largo del diseño de la herramienta se han establecido una serie de supuestos y criterios de cálculo que sirven de base para el análisis, permitiendo así que los resultados obtenidos sean consistentes y fácilmente interpretables. La aplicación ofrece al usuario la posibilidad de visualizar, de manera clara y eficaz, una tabla comparativa en la que se reflejan las tecnologías que resultan más adecuadas para cada escenario de estudio.

Asimismo, una de las principales virtudes de la herramienta es su flexibilidad, ya que permite modificar y ajustar distintas variables de entrada como la superficie de captación solar, la capacidad del sistema de almacenamiento térmico y los parámetros económicos asociados a la inversión y operación. Gracias a esta funcionalidad, el usuario puede realizar simulaciones dinámicas, evaluando cómo las distintas configuraciones impactan en el rendimiento y en la viabilidad de cada tecnología.

En definitiva, la aplicación constituye una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que facilita el análisis comparativo de las tecnologías solares disponibles. Su carácter interactivo y adaptable no solo posibilita un mejor entendimiento del comportamiento de cada alternativa en función de las condiciones de diseño y operación, sino que también abre la puerta a optimizar la selección tecnológica en función de criterios técnicos, económicos y de sostenibilidad.

# REFERENCIAS

---

- [1] FUTURE CLEANTECH ARCHITECTS. Decarbonizing High Temperature Heat in Industry: Technology Assessment and Policy Recommendations for Europe. European Climate Foundation, 2024-10. Informe
- [2] SOLAR COLLECTOR TECHNOLOGIES FOR DISTRICT HEATING. [en línea]. Disponible en: <https://task68.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task68--Report-RA1.pdf>. [Consulta: 16 septiembre 2025].
- [3] LILLO BRAVO, R. H. C. H. Isidoro. Manual para uso de instaladores, fabricantes, proyectistas, ingenieros y arquitectos, instituciones de enseñanza y de investigación. Sevilla: SODEAN, 2004. ISBN 3934595316
- [4] CASTILLO, Inma C.; MADRID VICENTE, Antonio. *Energía solar fotovoltaica y térmica: Manual técnico*. Madrid: AMV Ediciones, 2019. ISBN 978-84-120954-8-7.
- [5] HEAT PUMPING TECHNOLOGIES – IEA. Annex 58: High-Temperature Heat Pumps [en línea]. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/>. [Consulta: 2025-09-16].
- [6] HEAT PUMPING TECHNOLOGIES – IEA. Annex 58: High-Temperature Heat Pumps. Task 1 – Technologies. Task Report [en línea]. Borås: Heat Pump Centre, agosto 2023. Report No. HPT-AN58-2. ISBN 978-91-89821-34-7. Disponible en: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2023/09/annex-58-task-1-technologies-task-report.pdf>. [Consulta: 2025-09-16].
- [7] AGUILAR VALERO, Francisco Javier. DTIE 8.05: Bombas de calor para producción de ACS. Madrid: ATECYR, 2020. ISBN 978-84-95010-68-1.
- [8] EUROPEAN HEAT PUMP ASSOCIATION. European Heat Pump Association (EHPA) [en línea]. Disponible en: <https://ehpa.org/>. [Consulta: 2025-09-16].
- [9] TESLA.US.ES. Potencia eléctrica (GIOI) – Efecto Joule [en línea]. Disponible en: [http://tesla.us.es/wiki/index.php/Potencia\\_el%C3%A9ctrica\\_\(GIOI\)#Efecto\\_Joule](http://tesla.us.es/wiki/index.php/Potencia_el%C3%A9ctrica_(GIOI)#Efecto_Joule). [Consulta: 2025-09-16].
- [10] JULIO MARTÍNEZ NAYA, S.A. Resistencias industriales: tipo de material a calentar [en línea]. Disponible en: <https://juliomartineznaya.com/resistencias-industriales-tipo-de-material-a-calentar/>. [Consulta: 2025-09-16].
- [11] RESISTENCIAS TOPE, S.A. Resistencias eléctricas calefactoras industriales – Resistencias Tope [en línea]. Disponible en: <https://www.resistenciastope.com/es/>. [Consulta: 2025-09-16].
- [12] STEINMANN, Wolf-Dieter. Thermal Energy Storage for Medium and High Temperatures: Concepts and Applications. Wiesbaden: Springer, 2022. ISBN 978-3-658-02003-3.

- [13] IRENA. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, octubre 2017. ISBN 978-92-9260-038-9 [en línea]. Disponible en: [https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/IRENA\\_Electricity\\_Storage\\_Costs\\_2017\\_Summary.pdf](https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017_Summary.pdf). [Consulta: 2025-09-16].
- [14] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Thermal Storage System Concentrating Solar-Thermal Power Basics* [en línea]. U.S. Department of Energy. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/solar/thermal-storage-system-concentrating-solar-thermal-power-basics> [Consulta: 6 de octubre de 2025].
- [15] HO, Clifford K.; AMBROSINI, Andrea. *Thermal Energy Storage Technologies* [en línea]. SolarPACES: Sandia National Laboratories, 2017. Disponible en: <https://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/Thermal-Energy-Storage-Technologies.pdf>. [Consulta: 6 de octubre de 2025].
- [16] CAMACHO DELGADO, José Manuel. *Apuntes de análisis termodinámico de procesos industriales*. Curso 2024-2025. Apuntes de clase. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla.
- [17] IDAE – Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Plan de Energías Renovables en España 2011–2020. Madrid: Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2011.
- [18] IEA SHC – International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme. Task 68 – Solar Collectors for District Heating. Paris: IEA, 2022. Disponible en: <https://task68.iea-shc.org>. Acceso en: 23 sep. 2025.
- [19] PROTERMOSOLAR – Asociación Española para la Promoción de la Industria Termosolar. Anuario Protermosolar 2023. Madrid: Protermosolar, 2023.
- [20] IRENA – International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs in 2022. Abu Dhabi: IRENA, 2023. ISBN 978-92-9269-487-2.

# GLOSARIO

---

SET-PLAN — Strategic Energy Technology Plan — Plan Estratégico de Tecnologías Energéticas.	1
EU — European Union — Unión Europea.	1
UNE — Una Norma Española.	11
IEA — International Energy Agency — Agencia Internacional de la Energía.	11
HTF — Heat Transfer Fluid — Fluido caloportador.	11
CST — Concentrating Solar Thermal — Solar térmica de concentración.	12
ST — Non-Concentrating Solar Thermal — Solar térmica no concentradora.	12
DNI — Direct Normal Irradiance — Irradiancia normal directa.	12
CPC — Compound Parabolic Concentrator — Concentrador parabólico compuesto.	13
CC — Corriente Continua.	17
CA — Corriente Alterna.	17
BC — Bomba de calor.	20
COP — Coeficiente de rendimiento.	20
FV — Fotovoltaica.	20
ACS — Agua Caliente Sanitaria.	23
HTHP — High-Temperature Heat Pump — Bombas de calor de alta temperatura.	23
VHTHP — Very-High-Temperature Heat Pump — Bombas de calor de muy alta temperatura.	232
ATEX — Atmospheres Explosibles — Atmósferas explosivas	27
PTH — Power-to-Heat (también: P2H) — Electricidad a calor.	29
PCM — Phase Change Material — Materiales de cambio de fase.	30
VAN — Valor Actual Neto.	41
TIR — Tasa Interna de Retorno.	41
LCOE — Levelized Cost of Energy — Coste nivelado de la energía.	41

