

Trabajo Fin de Máster
Máster en Sistemas de Energía Térmica

Revisión del estado actual de la aplicación de energía
solar térmica en procesos industriales

Autor: Darío Azogil Arrayás

Tutor: José Julio Guerra Macho

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

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Máster
Máster en Sistemas de Energía Térmica

Revisión del estado actual de la aplicación de energía solar térmica en procesos industriales

Autor:

Darío Azogil Arrayás

Tutor:

José Julio Guerra Macho

Catedrático Universidad de Sevilla

Dpto. Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Máster: Revisión del estado actual de la aplicación de energía solar térmica en procesos industriales

Autor: Darío Azogil Arrayás

Tutor: José Julio Guerra Macho

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Agradecer a mi tutor, José Julio Guerra Macho, su dedicación, paciencia y buen hacer durante el desarrollo y confección del proyecto.

A mi familia y amigos.

A mis compañeros y profesores.

Darío Azogil Arrayás

Sevilla, 2022

Resumen

El objeto principal de este trabajo es analizar el estado actual del uso de los sistemas de energía térmica en procesos industriales a nivel mundial. Es interesante conocer cómo evoluciona la integración de la energía solar térmica en la industria para establecer modelos operativos y de instalación según las instalaciones existentes.

En las circunstancias actuales donde la tecnología avanza a pasos agigantados en cualquier campo de investigación y las políticas medioambientales tienden a ser primordiales a nivel global, las energías renovables juegan un papel fundamental. En el ámbito global, la industria es el primer sector en consumo de energía y, por ello, uno de los objetivos para frenar el calentamiento global y reducir las emisiones de gases de efectos invernaderos es potenciar la generación y uso de energía renovable en este sector. De esta forma, se conseguirá una reducción en el consumo de combustibles fósiles. En 2021, las renovables incrementaron hasta el 9% su capacidad de producción y el 80% de las instalaciones energéticas puestas en marcha corresponden a tecnologías verdes. Con este trabajo se precisa conocer el impacto del uso de sistemas solares térmicos en la lucha por la consecución para frenar el cambio climático y la producción de energía procedentes de fuentes renovables.

La energía solar térmica es utilizada en un amplio abanico de sectores industriales por lo que la configuración de los sistemas solares térmicos es muy dispar. Existen numerosos parámetros para configurar como son el tipo de captador solar utilizado según la temperatura de operación requerida por el proceso y el fluido caloportador, la instalación de almacenamiento térmico para evitar horas de desabastecimiento o el punto de integración en el proceso industrial entre otros. Todos los sectores industriales y los diversos parámetros están recogidos y descritos en la base de datos creada para realizar el análisis estadístico. Dicha base de datos cuenta con 483 plantas registradas y se desarrolla en el contenido del trabajo.

Con los datos obtenidos y tras realizar el estudio estadístico en el que se reflejan las principales configuraciones de sistemas solares térmicos en cuanto a tecnología de captación, punto de integración o sectores industriales según temperatura de operación entre otros. Se describen los resultados y conclusiones obtenidos.

Abstract

The main purpose of this project is to analyse the current status of the use of thermal energy systems in industrial processes worldwide. It is interesting to know how the integration of solar thermal energy in industry is evolving in order to establish operational and installation patterns according to existing installations.

In the current circumstances, where technology is growing faster in any field of research and environmental policies tend to be paramount worldwide, renewable energies play a key role. Industry is the largest energy consuming sector in the world and therefore one of the objectives to reduce global warming and greenhouse gas emissions is to promote the generation and use of renewable energies in this sector. This will reduce the consumption of fossil fuels. In 2021, renewables increased their production capacity to 9%, and 80% of the energy installations commissioned correspond to green technologies. With this project, the aim is to find out the impact of the use of solar thermal systems in the fight to stop climate change and the production of energy from renewable sources.

Solar thermal energy is used in a wide range of industrial sectors and the configuration of solar thermal systems is diverse. There are many parameters to be configured, such as the type of solar collector used depending on the operating temperature required by the process and the heat transfer fluid used, the thermal storage installation to avoid shortage hours or the point of integration in the industrial process, among others. All industrial sectors and the different parameters are collected and described in the database created for the statistical analysis. This database has 483 registered plants and is developed in the content of the project.

With the data obtained and after carrying out the statistical study in which the main configurations of solar thermal systems are reflected in terms of collection technology, integration point or industrial sectors according to the operating temperature, among others. The results and conclusions obtained are described.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Figuras	xv
1 Introducción	17
1.1 <i>Introducción</i>	17
1.2 <i>Energía solar térmica</i>	19
1.3 <i>Contenido y organización del trabajo</i>	20
2 Sistemas de energía solar térmica en la industria	21
2.1 <i>Introducción</i>	21
2.2 <i>Sistemas de energía solar térmica</i>	21
2.2.1 Sistema de generación térmica	21
2.2.2 Sistema de distribución o red de transporte	22
2.2.3 Sistema de transferencia de energía térmica	22
2.2.4 Sistema de almacenamiento	24
2.3 <i>Sistema de captación</i>	25
2.3.1 Tipos de conexión de captadores solares térmicos	25
2.3.2 Tipos de captadores solares térmicos	27
2.4 <i>Principales procesos térmicos en la industria</i>	33
2.5 <i>Principales sectores industriales en aplicaciones térmicas</i>	34
2.5.1 Sector alimentario y bebidas	35
2.5.2 Sector papelero	35
2.5.3 Sector textil	36
2.5.4 Sector químico	36
2.5.5 Sector minero	36
2.5.6 Sector agrícola	37
2.5.7 Sector del metal	37
2.5.8 Sector del cuero y pieles	37
2.5.9 Sector automovilístico	37
2.5.10 Sector petrolero y del gas	38
2.5.11 Otros sectores	38
3 Integración de energía solar en procesos industriales	40
3.1 <i>Introducción</i>	40
3.2 <i>Metodología de evaluación para integración de sistemas de energía solar</i>	41
3.2.1 Fase I: Estudio previo de viabilidad	41
3.2.2 Fase II: Estudio de viabilidad	41
3.2.3 Fase III: Toma de decisiones	41
3.2.4 Nivel de integración	42
3.3 <i>Revisión bibliométrica sobre la energía solar térmica en la industria</i>	49

3.3.1	Introducción	49
3.3.2	Metodología	49
3.3.3	Resultados	50
4	Análisis instalaciones existentes	54
4.1	<i>Introducción</i>	54
4.2	<i>Descripción de instalaciones existentes</i>	54
4.2.1	Ivanpah Solar	54
4.2.2	Miraah Oman	54
4.2.3	Mojave Solar	55
4.2.4	Estación de Generación Solana	55
4.2.5	Proyecto de Energía Solar Génesis	55
4.3	<i>Base de datos de instalaciones solares térmicas</i>	57
4.3.1	Parámetros de registro	57
4.3.2	Análisis paramétrico	60
5	Conclusiones y resumen	72
	Referencias	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Tecnologías de generación y tipo de caloportador y combustible utilizado.	22
Tabla 2. Principales sectores industriales, procesos y temperatura de operación.	35
Tabla 3. Conceptos de integración a nivel de proceso.	43
Tabla 4. Cadenas de búsqueda en Scopus.	50
Tabla 5. Cronología de instalaciones según el tipo de captador solar.	61
Tabla 6. Cronología del tipo de captador frente a la superficie bruta instalada (m ²).	62
Tabla 7. Cronología del tipo de captador frente a la potencia térmica instalada.	64
Tabla 8. Potencia térmica instalada por sector industrial y tipo de captador.	67
Tabla 9. Potencia térmica instalada por proceso térmico y tipo de captador.	68
Tabla 10. Volumen de almacenamiento según temperatura de operación y proceso térmico.	68
Tabla 11. Número de instalaciones y porcentaje según tipo de almacenamiento térmico.	69
Tabla 12. Número de instalaciones según punto de integración.	70
Tabla 13. Número de instalaciones según fluido caloportador y temperatura de operación.	71
Tabla 14. Resumen de conclusiones sobre análisis paramétrico.	73

Índice de Figuras

Figura 1. Cambios en demanda energética, emisiones CO ₂ e inversión en 2020. [3]	17
Figura 2. Evolución de emisiones CO ₂ según escenarios. [4]	18
Figura 3. Consumo de energía según su procedencia para uso final. [5]	19
Figura 4. Componentes sistema de distribución. [7]	22
Figura 5. Esquemas intercambiadores externos al proceso. [8]	23
Figura 6. Esquemas intercambiadores internos al proceso. [8]	23
Figura 7. Sistemas de calentamiento directo. [8]	23
Figura 8. Clasificación tipos de almacenamiento térmico.	24
Figura 9. Esquema agrupación en paralelo de captadores solares. [13]	26
Figura 10. Esquema agrupación en serie de captadores solares. [13]	26
Figura 11. Esquema agrupación mixta de captadores solares.	26
Figura 12. (a) Regulación por válvulas. (b) Retorno invertido. [14]	27
Figura 13. Clasificación sistemas energía solar térmica.	27
Figura 14. Mecanismos transferencia de calor en captador solar plano. [16]	28
Figura 15. Componentes captador solar plano. [17]	29
Figura 16. Esquema funcionamiento captadores de vacío de calor. [10]	30
Figura 17. Esquema funcionamiento captadores de vacío en U. [17]	30
Figura 18. Esquema funcionamiento captadores de vacío de flujo directo. [15]	30
Figura 19. (a) Captador simétrico. (b) Captador asimétrico.	31
Figura 20. Captador cilindro-parabólico.	32
Figura 21. Disposición captador Fresnel.	32
Figura 22. Esquema planta generación mediante receptor central.	33
Figura 23. Disco parabólico.	33
Figura 24. Posibles puntos de integración tecnologías SHIP. [26]	40
Figura 25. Fases del estudio de integración. [26]	42
Figura 26. Niveles de integración. [26]	43
Figura 27. Integración SHIP para generación directa de vapor. [26]	44
Figura 28. Integración SHIP para generación indirecta de vapor. [26]	44
Figura 29. Integración SHIP para precalentamiento de agua de alimentación. [26]	44
Figura 30. Integración SHIP para precalentamiento del agua de reposición. [26]	45
Figura 31. Integración SHIP en paralelo para calentamiento con fluido caloportador. [26]	45
Figura 32. Integración SHIP en serie para calentamiento con fluido caloportador. [26]	46
Figura 33. Integración SHIP en almacenamiento y procesos en cascada. [26]	46
Figura 34. Integración SHIP en el proceso con intercambiador externo. [26]	46
Figura 35. Integración SHIP para calentamiento de agua con intercambiador externo. [26]	47
Figura 36. Integración SHIP para calentamiento de baños, maquinaria o depósitos. [26]	47

Figura 37. Integración SHIP para calentamiento de flujos de entrada con intercambiador externo. [26]	47
Figura 38. Integración SHIP en el proceso con intercambiador interno. [26]	48
Figura 39. Integración SHIP para generación de vapor en vacío. [26]	48
Figura 40. Integración SHIP para generación de vapor a baja presión. [26]	48
Figura 41. Evolución de publicaciones desde 2012. [30]	50
Figura 42. Tipos de documentos analizados. [30]	51
Figura 43. Entidades de afiliación de documentos. [30]	51
Figura 44. Entidades de financiación de estudios. [30]	52
Figura 45. Países con mayor número de publicaciones. [30]	52
Figura 46. Mapa de concurrencia de palabras claves.	53
Figura 47. Mapa de color con frecuencia de concurrencia de palabras claves.	53
Figura 48. Vista aérea del campo solar de Ivanpah. [33]	55
Figura 49. Módulos en operación de la planta de Miraah. [32]	56
Figura 50. Campo solar de Mojave Solar. [33]	56
Figura 51. Vista aérea Solana. [34]	56
Figura 52. Detalle de captadores en Proyecto Génesis. [33]	57
Figura 53. Cronología de instalaciones según el tipo de captador solar.	61
Figura 54. Porcentaje de uso de tecnologías de captación por lustros.	63
Figura 55. Porcentaje de uso de tecnologías de captación por lustros sin Planta de Miraah.	63
Figura 56. Cronología de la potencia térmica instalada por lustros.	65
Figura 57. Cronología de la potencia térmica instalada por lustros sin Planta de Miraah.	66

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El sistema energético actual se encuentra en una situación de cambios constantes que lo hacen tambalearse y crear, cada vez más, ideas, sugerencias, proyectos y búsquedas de nuevas alternativas que modifiquen la base del actual sistema hacia un sistema más verde. Entendiendo como sistema energético verde un sistema en el que la principal fuente de energía proceda de fuentes de energía renovables y que sean apoyadas por fuentes de energía no renovables.

La búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles es una realidad plasmada en los muchos estudios que demuestran el impacto negativo de estos combustibles sobre el medioambiente y la realidad de su agotamiento. Los primeros efectos en el medioambiente que se detectaron, disminución de la capa de ozono, generación de gases de efecto invernadero y calentamiento global, promovió a numerosos países a reunirse y tomar medidas para poder controlar las emisiones causantes de tales efectos. Así dio lugar el Acuerdo de París en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21), que entraría en vigor en 2016.

En el Acuerdo de París, los 196 países participantes, se comprometieron a limitar el calentamiento global por debajo de 2 °C, preferiblemente, 1,5 °C en comparación con los niveles preindustriales. Este objetivo, a largo plazo, comienza con la imposición de máximos para las emisiones de efecto invernadero según el nivel industrial y de desarrollo de cada país. Se creó un nuevo marco tecnológico y financiero, de forma que las políticas de los diferentes países tomen decisiones que ayuden a adoptar medidas para la consecución de los países desarrollados y permitan el desarrollo de los más vulnerables [1].

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) estableció diferentes escenarios en base a los objetivos acatados por los países en el Acuerdo de París. Estos escenarios contemplaban las posibles corrientes políticas que tomarían los países para hacer frente al cambio climático y su ajuste al cumplimiento de los parámetros pactados [2].

Estos escenarios lanzados por IEA en 2018 pasan a invalidarse en 2019 cuando aparece la pandemia de la Covid-19 en la que se ha visto implicada la población mundial. En 2020, aún en pandemia, IEA lanza nuevos escenarios posibles tras los estudios del impacto sobre la población, la economía y la energía mundial de la Covid-19. El ámbito energético la próxima década, previa a 2030, está remarcada para saber si es posible una rápida transición hacia un sistema limpio y sostenible o, por el contrario, se alarga en el tiempo por la repercusión de la pandemia.

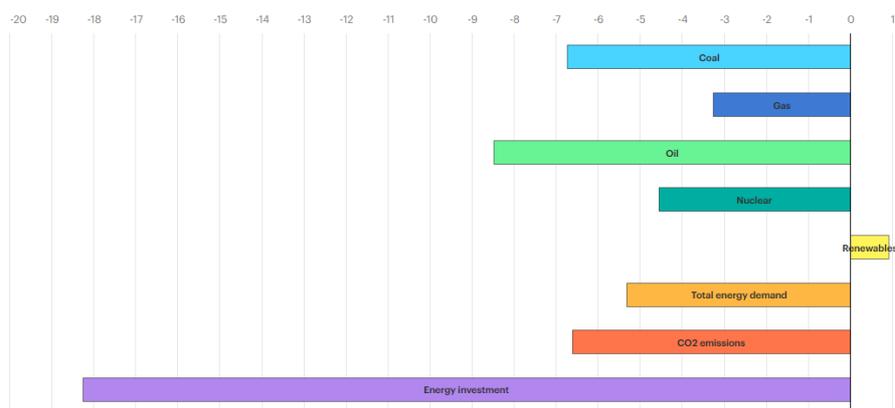


Figura 1. Cambios en demanda energética, emisiones CO₂ e inversión en 2020. [3]

La pandemia y las restricciones establecidas por los gobiernos supuso para el sector energético un gran impacto que se tradujo en la reducción entorno al 5% de la demanda mundial de energía conllevando la disminución de las emisiones de CO₂ en un 7% y la inversión en energía se redujo un 18%, de ahí, que la década actual tome un papel tan importante para conocer el porvenir del sistema energético. En la Figura 1 se observan los cambios producidos por la Covid-19 donde hay que destacar el crecimiento de la demanda de energía renovables como algo esperanzador de cara al cambio de sistema energético necesario.

En plena recuperación de la pandemia la economía energética intenta avanzar hacia un sistema más electrificado, eficiente e interconectado. El impulso de las energías limpias, sobretudo de la solar fotovoltaica (FV) y la eólica, gracias a la innovación y a la reducción de costes está permitiendo que la balanza caiga de este lado y se reduzca el consumo de combustibles fósiles. Aunque en el último año se ha producido un repunte en el consumo de carbón y petróleo y una subida en el precio de los mercados del gas natural, el carbón o la electricidad debido a la paralización de las inversiones necesarias para continuar con la transición del sistema energético, hacer accesible la electricidad a toda la población y la intervención militar rusa en Ucrania.

Con todo ello, IEA mantiene como meta el escenario Cero Emisiones Netas en 2050 (NZE) que traza una estricta programación para la estabilización del aumento de temperatura global en 1,5 °C entre otros objetivos en el ámbito energético. Para la COP26 muchos países establecieron nuevos programas para contribuir a la consecución de los objetivos marcados actualizándose el Escenario de Compromisos Anunciados (APS). Este escenario apoya la generación de energía mediante tecnologías de bajas emisiones, es decir, energías limpias y renovables y, como consecuencia, el consumo de combustibles fósiles podría ser inferior al 20% del máximo para 2030. También, la continua mejora del sistema implicaría que la demanda energética mundial se estancará. Con la ejecución de todos los compromisos anunciados las emisiones de CO₂ descenderían sobre un 40% para 2050. Por último, el Escenario de Políticas Declaradas (STEPS) en el cual se tiene en cuenta las medidas adoptadas y proyectos en marcha en la actualidad. De esta manera, el panorama es diferente: el cambio en el sector energético es palpable pero las emisiones siguen en continuo crecimiento debido a la industria y transporte de las economías en desarrollo. [4]

La Figura 2 plasma la línea base de las emisiones antes de la COP21 de París en 2015 y el escenario objetivo NZE para 2050. Se observa también, la repercusión de los acuerdos firmados en la última COP26 de Glasgow y la brecha para conseguir el objetivo de cero emisiones.

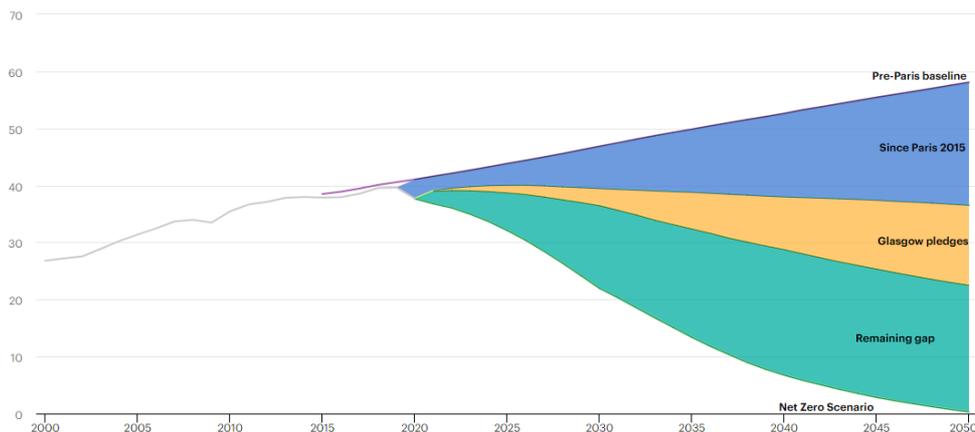


Figura 2. Evolución de emisiones CO₂ según escenarios. [4]

Las principales acciones que se deben acatar para cumplir con los objetivos pasan por impulsar las energías limpias y bajas en emisiones, conllevaría el aumento de instalaciones de energía solar FV y eólica, flexibilizar el sistema eléctrico y aumentar el ritmo de eliminación de los combustibles fósiles para la descarbonización del mix eléctrico; seguir avanzando en la eficiencia energética, tanto de los procesos como de los materiales y el compromiso humano; reducir las operaciones con combustibles fósiles con generación de metano, a corto plazo, restringiría el calentamiento terrestre y el uso de combustibles fósiles; y por último, la innovación en energías renovables, donde es necesario afianzar todos los prototipos y ensayos en todos los sectores.

La corriente de crecimiento de las energías renovables está presente en todos los escenarios descritos, las tecnologías están asentando sus bases y la financiación e inversión en este tipo de proyecto sigue en auge. En lo referido a la energía solar y solar térmica, están tomando un papel fundamental en la actualidad y para los años venideros debido al bajo coste de acceso, el conocimiento de la tecnología y el apoyo de las políticas. La operatividad de esta tecnología es otro de sus puntos fuertes ya que permite la incorporación de almacenamiento para flexibilizar la producción.

1.2 Energía solar térmica

La energía solar térmica consiste en la conversión de la radiación solar incidente en energía térmica, denominado calor. La utilización de esta tecnología está presente en aplicaciones, industriales, de transporte, comerciales y residenciales por medio de los diferentes procesos como la producción de vapor, sistema de calefacción o refrigeración... Estos sistemas están caracterizados por su amplio rango de temperaturas de operación, desde los 45 °C hasta por encima de los 400 °C, por lo que son bastantes flexibles y útiles para cualquier tipo de aplicación en una extensa gama de sectores.

Al tener como fuente de energía la radiación solar se convierte en una fuente de energía limpia, renovable y muy abundante, de coste cero y se erige como tecnología clave para la descarbonización ya que no genera emisiones. Pero es una tecnología con ciertos inconvenientes ya que no es controlable por las variaciones de la radiación solar debido a los cambios estacionales, la localización geográfica y los fenómenos atmosféricos.

En datos, la radiación solar incidente en La Tierra es suficiente para hacer frente a la demanda de energía primaria mundial. El ratio de energía solar útil y consumo de energía primaria es superior a 9000:1 y, teniendo en cuenta, que debido a los fenómenos de reflexión en el espacio la radiación incidente es de 1 kW/m² por los 1,3 kW/m² que se proyectan sobre la atmósfera.

A nivel mundial, el consumo de energía para la generación de calor es mucho mayor que para la generación de electricidad, pero esta última es la que capta la atención. Como plasma la Figura 3, se observa que la mitad del consumo de energía en 2018 se utiliza para la generación de calor. Y se estima que el crecimiento promedio anual de la demanda de calor en la industria sea de 1,7% hasta 2030.

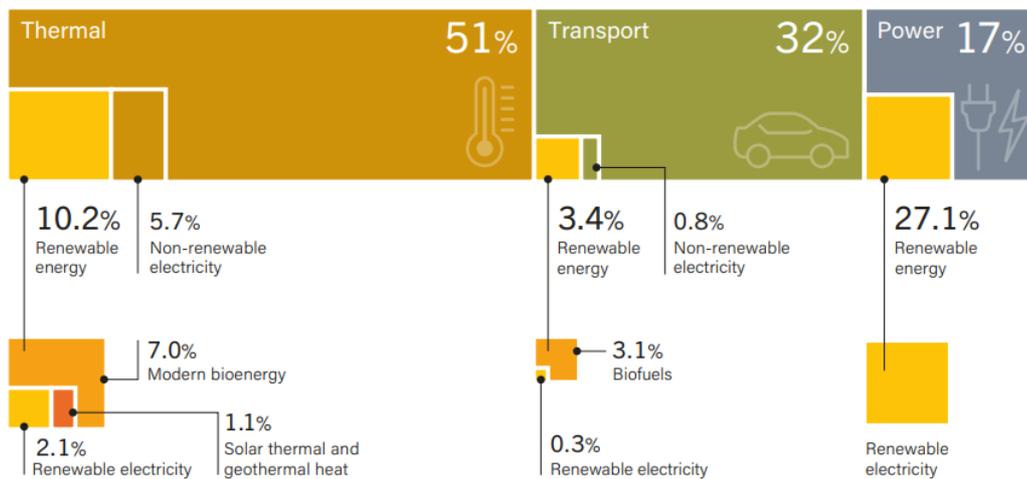


Figura 3. Consumo de energía según su procedencia para uso final. [5]

Como se ha mencionado, el uso de la energía solar térmica en la industria es muy diverso y una buena oportunidad de inversión para la transformación hacia las energías limpias, las principales industrias son: alimentaria, papelera, textil, pieles y cuero, metal, automóvil, minera, farmacéutica... se puede prever que las temperaturas necesarias en cada industria mencionada son diferentes y se pueden clasificar en tres categorías. Alta temperatura, por encima de 400 °C; media temperatura, entre 150 °C y 400 °C; y, baja temperatura, por debajo de 150 °C. Existen diferentes sistemas de captación que se adecuan para cada proceso, se distinguen captadores planos, de tubos de vacío, parabólicos, cilindro-parabólicos, Fresnel, de receptor central o disco parabólicos. También, existen diferentes fluidos caloportadores para la transferencia de la energía térmica.

Todo ello, junto con los diferentes sistemas que componen una instalación de energía térmica, los procesos principales en los que se utilizan y el proceso de integración se desarrollaran a lo largo de los diferentes apartados con el fin de conocer la operación de los sistemas de energía solar térmica, su uso y proyección de futuro.

1.3 Contenido y organización del trabajo

El contenido del documento pretende dar a conocer el estado en el que se encuentran los sistemas de energía térmica en la actualidad. Para ello y tras una introducción para entender el contexto energético en el que nos encontramos, se describen los componentes de los sistemas de energía térmica y sus diferentes tipos de captadores solares. Se realiza un recorrido por los principales procesos térmico utilizados en la industria para terminar con la descripción de los procesos industriales. La tarea de la integración de estos sistemas en las industrias existentes y los pasos a seguir para conseguirlo son tratados antes de finalizar el documento con un análisis paramétrico de los instalaciones térmicas existentes a nivel mundial y registradas en la web <http://ship-plants.info/>. Es la base de datos más completa a la que se puede acceder a día de hoy, cuenta con las características de 430 instalaciones destinadas a la producción de calor para diversas aplicaciones industriales.

2 SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN LA INDUSTRIA

2.1 Introducción

El principal consumidor de energía a nivel global es el sector industrial. La energía eléctrica y la energía térmica son las principales en cuanto a consumo y son generadas, principalmente, a partir de combustibles fósiles. La energía térmica es utilizada para una gran diversidad de procesos con diferentes temperaturas de funcionamiento y en menor medida para la generación de frío mediante absorción.

La diversidad de procesos en los que es participe la energía térmica abre una amplia gama de posibles combinaciones para la creación de un sistema de energía térmica. Las instalaciones térmicas son complejas debido a las diferentes demandas de temperatura, con procesos en serie o en paralelo, contemplar almacenamiento o la elección de fluido caloportador. Estos algunos, de los principales, parámetros a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de energía solar térmica. Tras el diseño, se estudiará la integración en el proceso industrial pero como se ha mencionado, la amplia gama de posibilidades aporta gran flexibilidad a los sistemas de energía solar térmica.

En este apartado se pretende dar a conocer el conjunto de sistemas que componen los sistemas de energía térmica en la industria actual, es decir, los procesos generadores de calor. Estos procesos están compuestos por diferentes sistemas que cuentan con variedad de elementos que integrados entre sí, conforman el sistema de energía térmica.

2.2 Sistemas de energía solar térmica

Los sistemas que componen los procesos de generación de calor son los sistemas de generación, sistema de distribución o red de transporte, sistema de transferencia de energía y sistema de almacenamiento, si se diera el caso. El conocimiento y dominio de cada uno de ellos es importante para poder realizar el diseño de cualquier sistema y su posterior integración en el proceso industrial requerido.

Antes de comenzar, es necesario diferenciar que, en función del método de transferencia de calor, los sistemas de generación térmica se pueden clasificar en directos o indirectos, independiente del mecanismo de transferencia.

Se consideran sistemas directos aquellos en los que el calor generado está en contacto con el material o en la zona a calentar. Los sistemas indirectos son en los que el calor es generado en otro lugar diferente a donde se produce el proceso y es necesario transportarlo. [6]

2.2.1 Sistema de generación térmica

Es el sistema encargado de producir energía en forma de calor para los procesos industriales a partir del consumo de diferentes combustibles como pueden ser derivados del petróleo, gas natural, carbón, biomasa o electricidad. El calor generado está relacionado con el tipo de combustible y el fluido caloportador utilizado en la instalación.

El fluido caloportador más utilizado a nivel industrial es el vapor de agua o agua sobrecalentada y el sistema de cogeneración ya que permiten la obtención de electricidad a partir de un generador de vapor y vapor y agua caliente mediante intercambiadores. La elección definitiva de que caloportador utilizar está sujeta al rango de temperaturas de trabajo del proceso.

El uso de electricidad para la generación de calor queda restringido a nivel residencial y sector servicios ya que se produce el efecto Joule que conlleva importantes pérdidas no admisibles a nivel industrial. En la Tabla 1 se pueden observar las principales tecnologías de generación, así como los principales fluidos caloportadores o los combustibles:

Tabla 1. Tecnologías de generación y tipo de caloportador y combustible utilizado.

Tecnología de generación	Fluido caloportador	Combustible
Generador	Vapor, agua sobrecalentada, aceite térmico	Gas natural, biogás, carbón, fueloil, biomasa, derivados del petróleo
Cogeneración		
Generador de aire caliente	Aire caliente	
Bomba de calor	Agua y aire caliente, aceite térmico	Electricidad

2.2.2 Sistema de distribución o red de transporte

Son el conjunto de los diferentes procesos que están destinados a transportar el calor generador hasta el proceso en el que se requiere la energía térmica. Estos sistemas están diseñados en función del tipo de caloportador utilizado en el proceso, siendo el vapor, el más común en la industria.

La red de vapor y condensado son las más complejas debido a la necesidad de garantizar unas condiciones de vapor adecuadas a la entrada del proceso, vapor saturado y seco, y en la vuelta, el condensado, debe ser limpio y contener la máxima energía posible en la entrada en el sistema de generación. En la Figura 4 se pueden observar los principales componentes de las redes de vapor y condensado de una instalación, mediante la operación de estos elementos se garantiza la calidad del vapor.

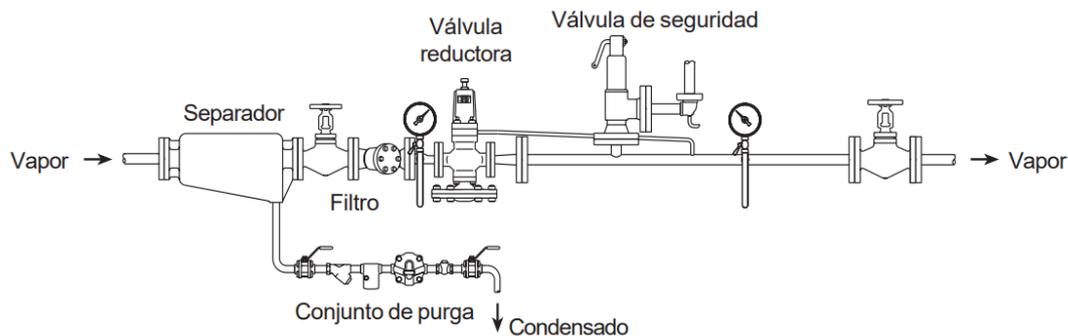


Figura 4. Componentes sistema de distribución. [7]

El uso de vapor como principal fluido caloportador en la industria es debido a que los sistemas son, relativamente, fáciles de operar y mantener, están muy estudiados, el uso de combustibles fósiles para su generación está muy extendido desde el inicio de la industria y por la forma de almacenar de la energía en forma de calor latente que aporta eficiencia a la transferencia de calor a temperatura constante en el proceso.

2.2.3 Sistema de transferencia de energía térmica

La transferencia del calor generado hacia el proceso que lo requiere se realiza mediante equipos de intercambio, se pueden considerar varios tipos de equipos: intercambiadores de calor externo al proceso, intercambiadores de calor incorporados al proceso o sistemas de calentamiento directo. También, se consideran los procesos de evaporación y secado ya que son muy frecuentes en el ámbito industrial y están configurados en base a los diferentes tipos de intercambiadores.

2.2.3.1 Intercambiadores externos al proceso

Los más utilizados de este tipo de intercambiadores son los de carcasa y tubo; los compactos, de espiral o de placas, y los aleteados de flujo cruzado cuando el aire es uno de los fluidos de trabajo. La elección de un tipo u otro de intercambiador dependerá principalmente de la temperatura y la presión de operación, el cambio de fase, el espacio disponible y las propiedades de los fluidos de trabajo.

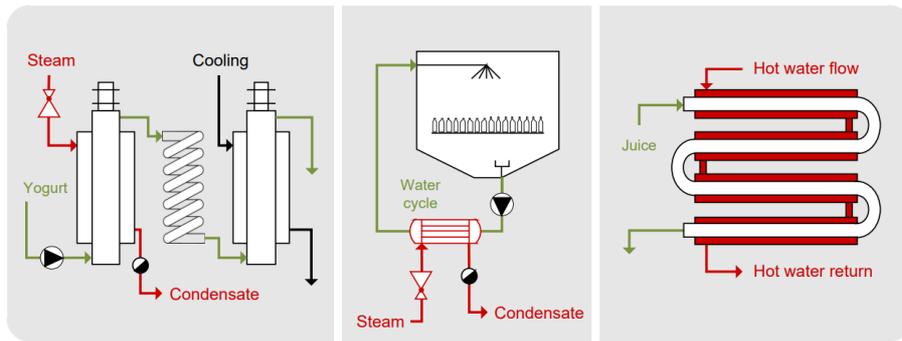


Figura 5. Esquemas intercambiadores externos al proceso. [8]

2.2.3.2 Intercambiadores incorporados al proceso

Son intercambiadores utilizados para el calentamiento de depósitos, baños u otros equipos. Los intercambiadores más comunes son de camisa con doble envoltente, serpentines y banco de tubos. Los menos habituales son los de placa y de resistencia eléctrica. En los procesos en los que la presión de trabajo sea superior a 6 bar y el volumen necesario superior a 10 m³ se utilizan serpentines soldados, perfiles o media tubería soldada. En la Figura 6 se puede observar la disposición de este tipo de intercambiadores.

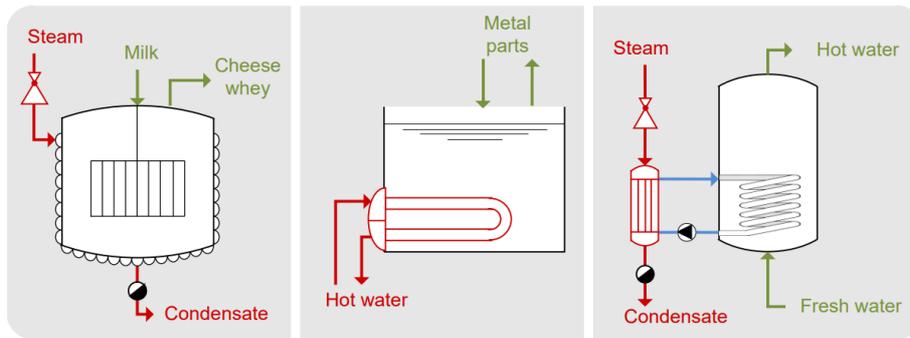


Figura 6. Esquemas intercambiadores internos al proceso. [8]

2.2.3.3 Sistemas de calentamiento directo

Se pueden contabilizar dos sistemas directos de calentamiento, la combustión directa y la inyección de vapor como se observa en la Figura 7. La combustión directa utiliza los gases generados como fluido caloportador para calentar el medio o el material. Por su parte, la inyección de vapor vivo se utiliza para el calentamiento de baños, tanques y depósitos y flujos de fluidos.

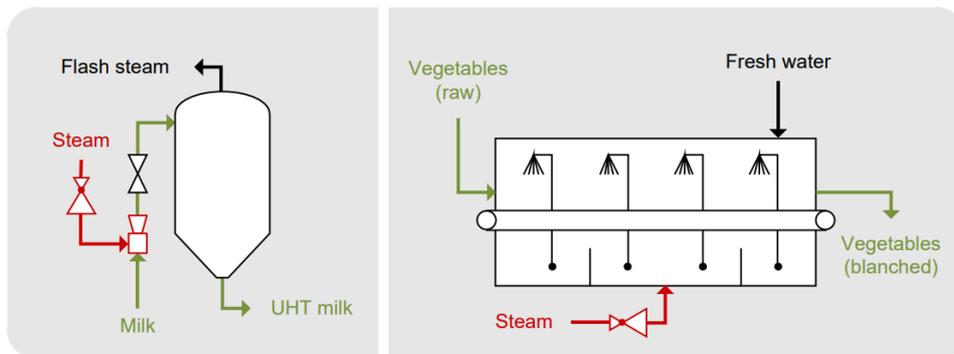


Figura 7. Sistemas de calentamiento directo. [8]

2.2.3.4 Evaporadores y secadores

Estos equipos están compuestos por intercambiadores externos e internos al proceso, pero pueden clasificarse con grupo propio.

Los evaporadores se clasifican según el tipo de mecanismo utilizado en el proceso de evaporación en: evaporadores tipo Kettle, con circulación natural o forzada, y evaporadores en película ascendente o descendente. Comúnmente, se diseñan evaporadores calentados por vapor con sistemas de evaporación de múltiple efecto.

Los secaderos pueden clasificarse en convectivos, por contacto, radiantes y liofilizadores. La energía solar puede ser integrada en los secaderos convectivos por aire caliente y en los secaderos por contacto.

2.2.4 Sistema de almacenamiento

Los sistemas de almacenamiento son los encargados de almacenar la energía solar térmica cuando está disponible o hay excedentes en la producción y de cubrir la demanda de energía cuando sea requerida ya sea por necesidad de producción o por la ausencia de la fuente de energía ya que depende de la hora del día, la época del año y la meteorología. [9]

Los sistemas de almacenamiento pueden disponerse en las diferentes fases del proceso, es decir, en los diferentes sistemas que se han descrito. La elección del lugar de instalación del almacenamiento, si fuera necesario, es importante de cara a la eficiencia y la productividad del proceso aun con cargas parciales. La instalación cercana a la generación permite mantener la inercia en generadores que usan combustible como el carbón o la biomasa y no tiene un margen de reacción rápida ante cualquier modificación de la demanda.

Se pueden distinguir diferentes tipos de almacenamiento como se observa en la Figura 8 descritos a continuación. También, es necesario clasificar los sistemas de almacenamiento en función del estado en el que se encuentre el medio utilizado. Los sistemas activos engloban a los fluidos y pasivos a los sólidos. Para medios sólidos, el almacenamiento puede ser directo si el medio de almacenamiento utilizado actúa como fluido de transferencia de calor o indirecto si se utilizan dos fluidos diferentes.

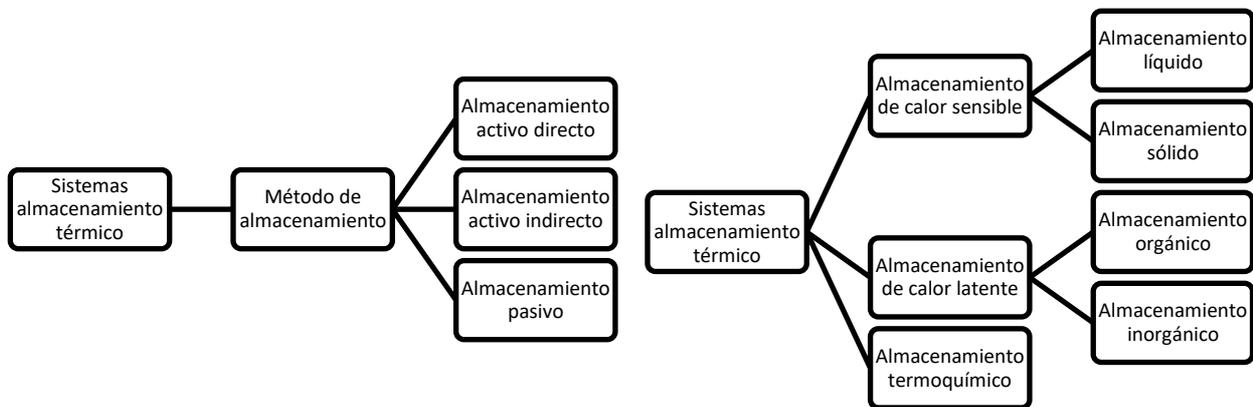


Figura 8. Clasificación tipos de almacenamiento térmico.

2.2.4.1 Almacenamiento de calor sensible

Consiste en elevar la temperatura, es decir, la energía de un medio, líquido o sólido, con el objetivo de almacenarla y liberar con la disminución de temperatura donde y cuando sea necesario para el proceso. La capacidad calorífica del medio utilizado es el parámetro vinculante para conocer la capacidad de energía almacenada. [10]

- Tanques con líquidos: su funcionamiento es muy simple. El fluido que contiene el depósito o tanque es calentado mediante algún proceso térmico. Es posible almacenar fluidos a baja temperatura como en un estanque solar.

- Sales fundidas: método utilizado en plantas termosolares de concentración. La radiación solar está dirigida desde los heliostatos hasta el concentrador por el que circulan las sales fundidas. Estas sales con alta temperatura son dirigidas al tanque de almacenamiento para su posterior uso cuando la demanda lo requiera en un intercambiador de calor donde intercambia la energía con el agua para generar vapor. Este intercambio puede darse directamente sin necesidad de que las sales sean almacenadas.
- Lecho de rocas: las rocas son almacenadas en depósitos que cuentan con dos entradas de aire, una entrada caliente y otra fría. La operación consiste en hacer pasar aire caliente para que las rocas almacenen la energía y cuando sea necesario, se hace pasar aire frío para obtener la energía almacenada previamente.

2.2.4.2 Almacenamiento de calor latente

Estos sistemas de almacenamiento utilizan materiales, orgánico o inorgánicos, que absorben energía en un proceso de cambio de fase que tiene lugar en el rango de temperatura requeridas por el proceso. Los cambios de fase que pueden darse son sólido-sólido, líquido-vapor y sólido-líquido, este último es el que implica menor expansión volumétrica en el cambio de fase y, por tanto, uno de lo más usado.

Los materiales orgánicos tienen la capacidad de fusión congruente sin separación de fases y son utilizados en procesos de temperaturas medias-bajas. En cambio, los materiales inorgánicos, son capaces de fundir de manera incongruente, cuentan con una mayor capacidad calorífica y, por ello, son usados en proceso a alta temperatura, pero presentan corrosión.

2.2.4.3 Almacenamiento termoquímico

En este tipo de almacenamiento se utilizan reacciones endotérmicas donde se utiliza la energía térmica para disociar un material termoquímico en dos materiales que pueden ser almacenados. El almacenamiento se caracteriza por realizarse a temperatura ambiente y tener pérdidas energéticas mínimas. Cuando se requiera la energía almacenada basta con poner en contacto los dos materiales almacenados y el calor será liberado para volver a formar el material de inicio.

2.3 Sistema de captación

Los sistemas de conversión de energía térmica están compuestos por diferentes sistemas, pero el sistema más importante de todos ellos es, el sistema de captación. El sistema de captación es el encargado de captar la mayor radiación solar incidente evitando las pérdidas hacia el ambiente para poder comenzar el proceso de conversión.

El principio de conversión de la radiación solar a otro tipo de energía aprovechable es simple: un dispositivo capta la radiación y transfiere la energía térmica a un fluido caloportador que intercambia la energía adquirida en el proceso con otro fluido o directamente.

La configuración de un sistema de captación es dependiente exclusivamente del nivel térmico necesario en el proceso. Debido a que la radiación solar disponible en la superficie terrestres es menor a 1 kW/m^2 para procesos en los que la temperatura de operación sea superior a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ será necesario considerar sistema para la reducción de pérdidas térmica al máximo, ya sea introduciendo vacío en el sistema de captación y/o aumentando la densidad de la radiación disponible mediante a concentración. Para procesos por debajo de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ se suelen utilizar captadores planos de superficie negra o selectiva. En procesos con mayor requerimiento de temperatura se utilizan tubos de vacío con o sin concentración para aumentar el rango de temperaturas de trabajo [11].

2.3.1 Tipos de conexión de captadores solares térmicos

Hay que tener en cuenta que, en el montaje de una instalación solar térmica, los captadores estarán agrupados y distribuidos de forma uniforme según las condiciones y criterios de diseño. Las agrupaciones de captadores están compuestas por captadores idénticos entre sí.

La configuración del patrón de agrupamiento de los captadores se establece en base a la temperatura necesaria del fluido caloportador a la salida del campo sin que está tenga influencia sobre el rendimiento del sistema de

captación y a la minimización del coste del transporte del fluido en el circuito primario.

Se distinguen tres tipos de distribución para el campo de captadores:

- Agrupación en paralelo

Los captadores de este tipo de agrupaciones comparten las mismas condiciones de operación. El salto de temperatura, la temperatura de entrada del fluido y el rendimiento de un captador es igual para el resto. Por ello, la pérdida de carga del campo completo es la de un solo captador y el caudal de la bomba del circuito primario encargada de impulsar al fluido es la de un captador por el número de captadores. En la Figura 9 se puede observar un esquema de este tipo de conexión. [12]

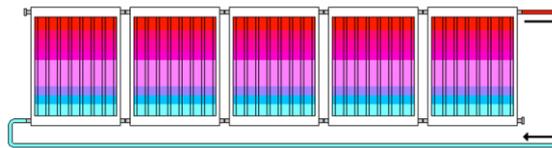


Figura 9. Esquema agrupación en paralelo de captadores solares. [13]

- Agrupación en serie

En este tipo de conexiones los captadores tienen diferentes condiciones de operación, la temperatura de entrada de un captador es la temperatura de salida del anterior, como se puede observar en la Figura 10, esto hace que la temperatura a la salida del campo sea mayor. En contra, el rendimiento del campo de captadores disminuye. Las pérdidas de carga se traducen en la pérdida de carga de un captador por el número de captadores del campo y el caudal de la bomba del circuito primario es igual al caudal de un solo captador.

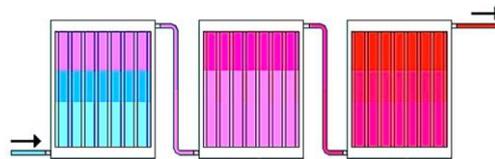


Figura 10. Esquema agrupación en serie de captadores solares. [13]

- Agrupación mixta o serie-paralelo

Como se ha descrito, las agrupaciones anteriores, cuentan con ventajas y desventajas por parte iguales. El diseño en agrupación mixta es capaz de beneficiarse de las ventajas de ambos sistemas. En la Figura 11 se observa este tipo de conexión.

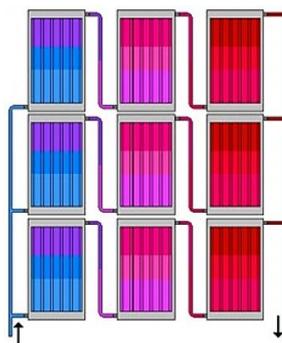


Figura 11. Esquema agrupación mixta de captadores solares.

Tanto las agrupaciones en paralelo como las mixtas deben operar con el mismo caudal en cada línea del ramal de captadores para que el sistema esté equilibrado y el rendimiento no se vea afectado. El equilibrio se consigue mediante dos posibles configuraciones de las líneas, con la incorporación de válvulas de regulación de caudal en cada línea o con el diseño de un sistema de retorno invertido. Ambas configuraciones pueden ser observadas en la Figura 12.

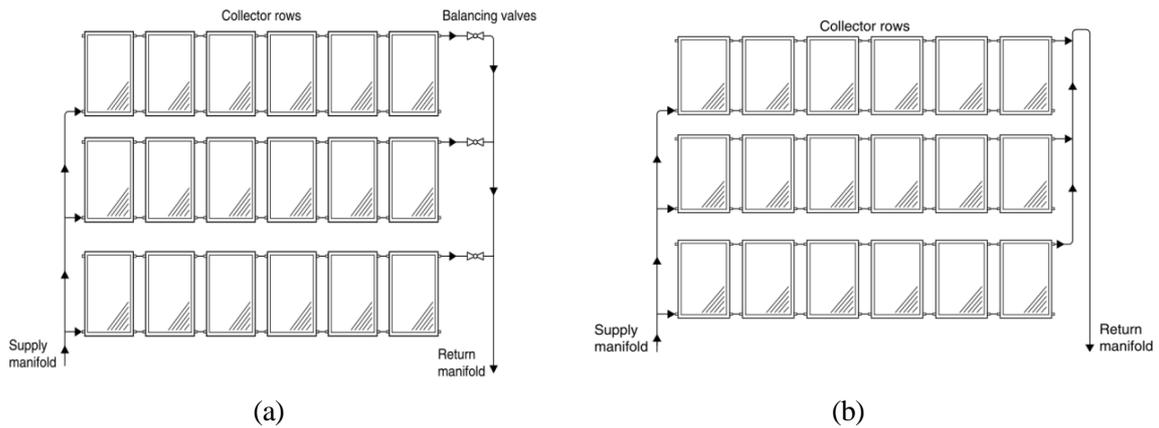


Figura 12. (a) Regulación por válvulas. (b) Retorno invertido. [14]

2.3.2 Tipos de captadores solares térmicos

Ya se han mencionado algunos parámetros que son claves para poder clasificar la gran variedad de sistema de captación que existen. A continuación, se describen los diferentes tipos de captadores, pero antes se puede observar en la Figura 13 la clasificación de los sistemas de captación en función de los siguientes parámetros:

- Clasificación según temperatura de operación: baja, por debajo de 60 °C; media, entre 60-150 °C; y alta, por encima de 150 °C.
- Clasificación según seguimiento solar: captadores fijos; seguimiento a un eje, NE-SO siguiendo la radiación solar; y seguimiento a doble eje, describen la trayectoria solar durante todo el año.
- Clasificación según concentración: sin concentración de la radiación, es decir, aprovechan la que le impacta sobre la superficie de captación y con concentración, reflejan la radiación para hacerla incidir sobre una superficie denominada absorbedor.
- Clasificación según óptica del captador: según el comportamiento de los rayos solares al incidir sobre la superficie de captación, pueden ser reflejados hacia un absorbedor o refractados hacia el interior.

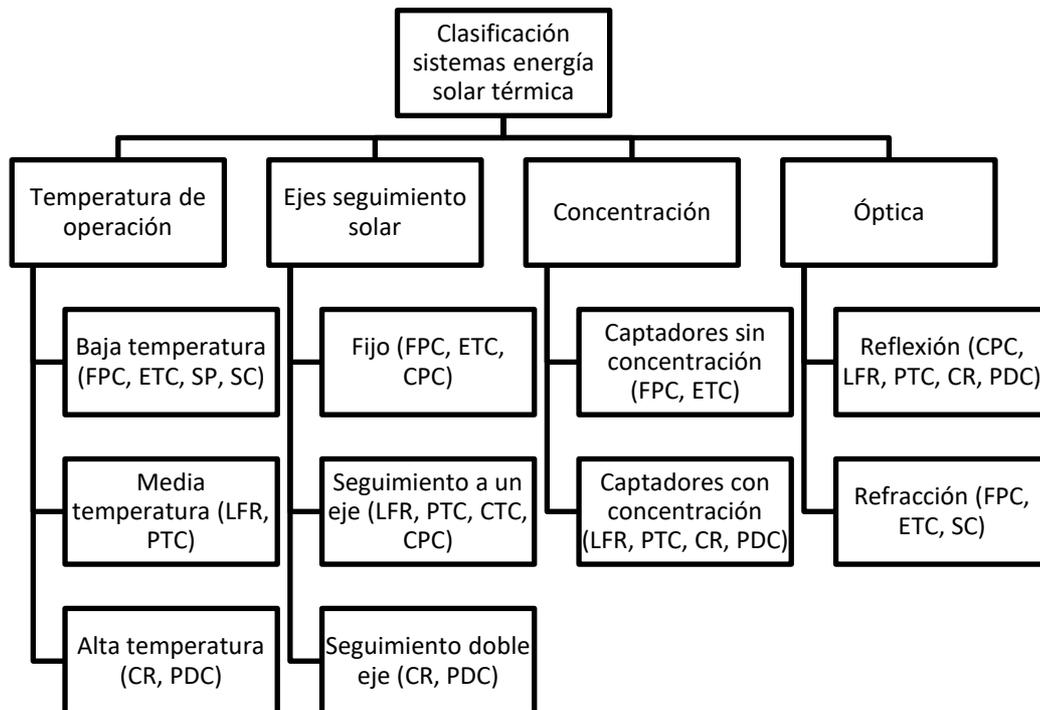


Figura 13. Clasificación sistemas energía solar térmica.

2.3.2.1 Captador solar plano

Este tipo de captadores son muy populares desde sus inicios por la simplicidad operativa y su uso está bastante extendido a nivel mundial. Son elementos sin concentración, fijos y capaz de captar la radiación directa y difusa. Su funcionamiento se basa en el conocido “efecto invernadero” ya que las propiedades de la cubierta permiten el paso de la radiación solar que incide sobre la superficie del absorbedor y se genera el aumento de temperatura del fluido caloportador.

En el captador se producen la transferencia de calor por mecanismos combinados. Se observa radiación entre la cubierta y la radiación incidente; radiación y convección con el ambiente exterior y entre la cubierta y el absorbedor; conducción en el absorbedor y el aislante; y convección en el fluido caloportador. Por lo general, se utiliza agua o aire como fluido caloportador, aunque suelen ser mezclados con otras sustancias para mejorar sus propiedades o utilizar otros fluidos. [15]

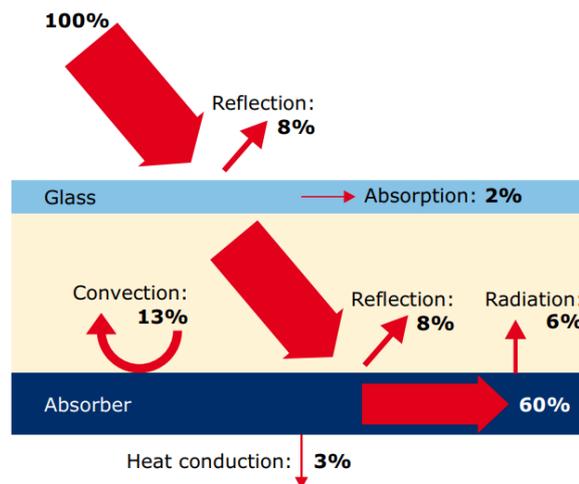


Figura 14. Mecanismos transferencia de calor en captador solar plano. [16]

En la Figura 14 se observan los mecanismos de transferencia que tienen lugar en los diferentes componentes del captador. El mayor porcentaje de radiación solar incidente atraviesa la cubierta, una pequeña parte es absorbida y otra reflejada, la radiación que atraviesa e incide sobre el absorbedor es transformada en calor. El absorbedor, por el aumento de temperatura, emite radiación que no puede salir hacia el exterior ya que la cubierta es opaca a esta radiación. El calor generado es evacuado del interior por el fluido caloportador.

Los componentes básicos del captador se observan en la Figura 15:

- **Cubierta transparente:** por lo general se fabrica de vidrio. Asegura la estanqueidad del interior del captador protegiendo a los diferentes elementos de los agentes externos y reduce las pérdidas por radiación y convección. Existen otro tipo de captadores solares planos que no incluyen cubierta y el absorbedor está fabricado por materiales que soportan la radiación y resisten a los agentes externos. Suelen ser económicos y muy flexibles para su montaje. El rendimiento está muy afectado por la temperatura ambiente y por el viento.
- **Absorbedor:** placa metálica encargada de convertir la radiación incidente del Sol en energía térmica. Por lo general, recibe un tratamiento superficial para mejorar la absorción y la emisividad del material y así mejorar el rendimiento del captador.
- **Circuito hidráulico:** compuesto por una serie de conducciones, en parrilla o serpentín, por las que el discurre el fluido caloportador y en el que se produce la transferencia del calor generado en el absorbedor. El material de fabricación debe facilitar la transferencia de calor.
- **Aislamiento:** su objetivo es evitar pérdidas de calor en la parte posterior y en los laterales del captador. Se suelen utilizar espumas sintéticas o lana mineral.
- **Carcasa:** el elemento que incluye a todo el conjunto, aportando rigidez y protegiéndolos del exterior. Se fabrica de materiales como el aluminio, acero inoxidable o galvanizado que soportan la corrosión. Suele tener perforaciones para desalojar condensados.

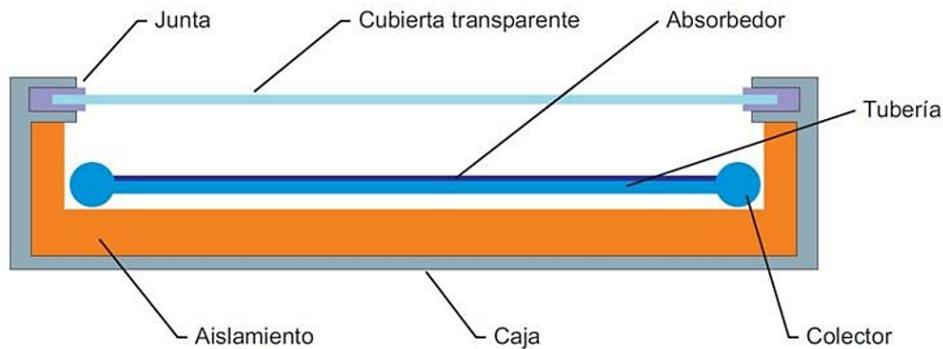


Figura 15. Componentes captador solar plano. [17]

2.3.2.2 Captador solar de tubos de vacío

Estos captadores suelen ser fijos, trabajar con o sin concentración y captan la radiación directa y difusa. Permiten trabajar a mayor temperatura que el captador solar plano debido al vacío existente entre la superficie absorbente y el vidrio que la encapsula, disminuyendo, cuantiosamente, las pérdidas térmicas por conducción y convección. El nivel de vacío afecta de manera directa al rendimiento del captador y es el parámetro que marca la fiabilidad y la vida útil del tubo captador. Suelen incluir elementos de Bario en el interior de los tubos que, en contacto con aire, cambian a un color blanquecino para localizar los tubos degradados.

La incorporación de reflectores que concentren la radiación solar en el tubo absorbente tiene una gran influencia sobre la operatividad a mayor temperatura sin reducción de rendimiento.

Existen varios tipos de captadores de tubo de vacío, lo más comunes se describen a continuación:

- Captador de tubos de vacío de calor o “Heat-Pipe”

El tubo de vacío de vidrio acoge en su interior un tubo metálico de cobre, normalmente, con ambos extremos cerrados. En su interior contiene un fluido a una presión determinada a la que es capaz de evaporarse cuando eleva su temperatura y condensar cuando transfiere la temperatura al fluido caloportador. En la Figura 16 se observa su esquema.

- Captador de tubos de vacío en U o tubos concéntricos o “U-tube”

El tubo de vacío contiene un tubo de cobre en forma de U conectado por sus extremos a un captador como se aprecia en la Figura 17. El principio de funcionamiento es sencillo, el fluido caloportador entra por un extremo, aumenta su temperatura durante el recorrido por el tubo y sale por el otro extremo. Esta configuración puede realizarse de forma que los tubos sean concéntricos, entrando el fluido frío por el exterior y saliendo caliente por el centro.

- Captador de tubos de vacío de flujo directo

El propio tubo de vidrio en su interior ha recibido un tratamiento superficial para actuar como absorbente. Se utiliza agua como fluido caloportador con circulación natural de forma que irá aumentando su temperatura a medida que recorre el tubo. La entrada y salida del tubo están selladas mediante juntas elásticas que requieren ser cambiadas con frecuencia. En la Figura 18 se observa un tubo sin acumulador. La configuración con acumulador incorporaría un pequeño depósito en la parte superior.

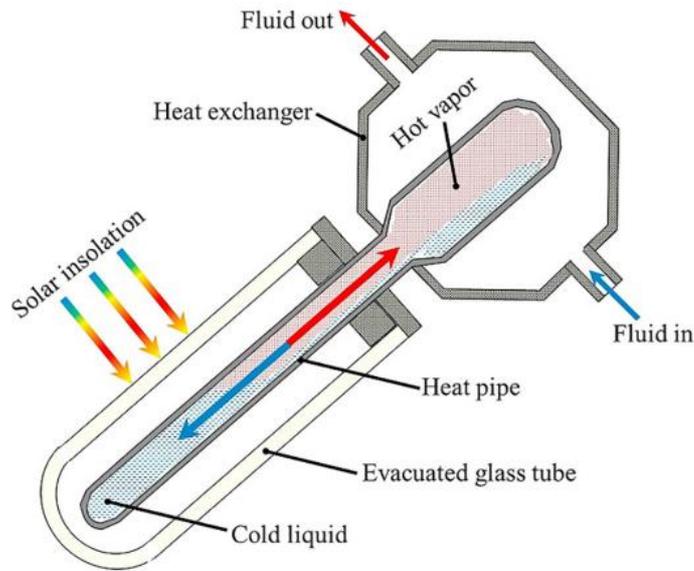


Figura 16. Esquema funcionamiento captadores de vacío de calor. [10]

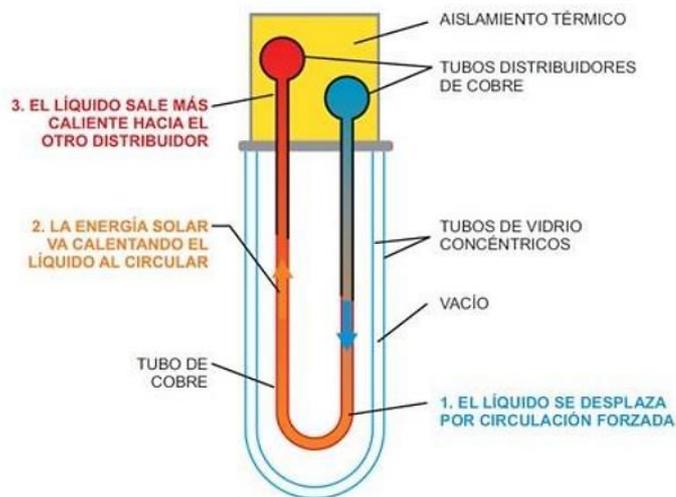


Figura 17. Esquema funcionamiento captadores de vacío en U. [17]

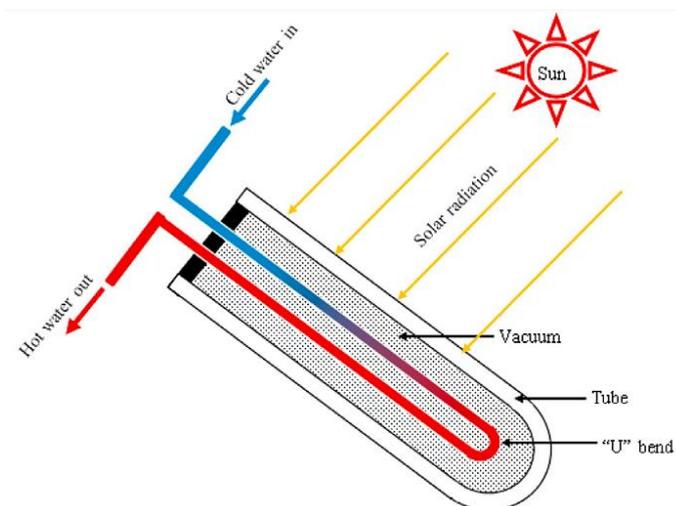


Figura 18. Esquema funcionamiento captadores de vacío de flujo directo. [15]

2.3.2.3 Captadores parabólicos compuestos (CPC)

Estos captadores suelen ser fijos o tener seguimiento a un eje. Son captadores con concentración capaces de captar la radiación directa y difusa. La radiación puede incidir en un amplio rango de incidencia, ya que, aquella radiación que lo haga fuera del ángulo de aceptación será reflejada hacia el absorbedor. [18]

Una de las ventajas con las que cuenta este tipo de captador es que no requiere tener seguimiento continuo, se distinguen dos tipos de captadores, simétricos y asimétricos como muestra la Figura 19. Además, la configuración simétrica, dependiendo de la aplicación, la forma y la posición del captador el absorbedor puede ser plano, bifacial, de cuña o de tubo para facilitar la captación de la radiación solar. [15]

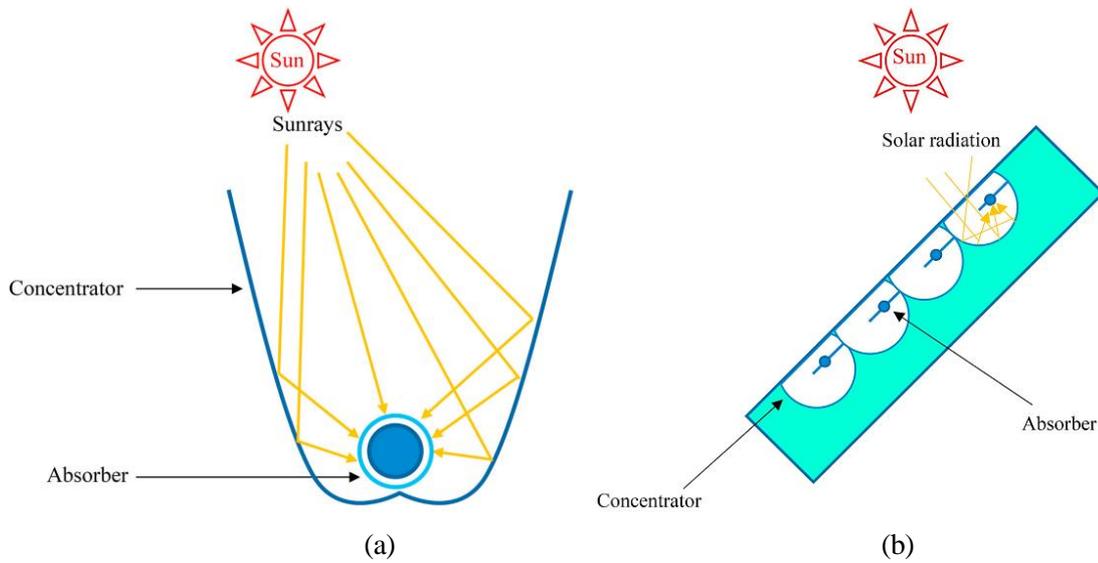


Figura 19. (a) Captador simétrico. (b) Captador asimétrico.

2.3.2.4 Captadores cilindro-parabólico (CTC y PTC)

Los captadores CTC y PTC son captadores con concentración focal, seguimiento a un eje y que solo captan la radiación directa. El sistema más utilizado es el PTC ya que permite la operación a altas temperaturas, 400 °C, manteniendo un rendimiento óptimo, con una soportación ligera que permite una fácil instalación y reducen su coste.

Las parábolas son fabricadas de un material metálico de alta reflectividad que conduce la radiación hacía un tubo metálico selectivo contenido dentro de un tubo de vidrio que está situado en el foco de la parábola como muestra Figura 20. La disposición del sistema de seguimiento es un eje este-oeste para captar el Sol de norte a sur o un eje norte-sur para captar el Sol desde este a oeste. A parte de la disposición elegida, el mecanismo de seguimiento solar se encarga de proteger al captador ante adversidades meteorológicas. Pueden distinguirse dos mecanismos de seguimiento: sistemas mecánicos y sistemas eléctricos/electrónicos que cuentan con mayor fiabilidad y precisión. [10]

Está comprobado que el seguimiento solar norte-sur aumenta las pérdidas al mediodía y las reduce en las hora iniciales y finales del día, esta disposición capta mayor cantidad de energía a lo largo de un año. Por otro lado, la disposición este-oeste capte menos energía durante el año lo hace de forma constante. En definitiva, la aplicación industrial de estos captadores y la distribución estacional requerida de consumo marcarán que tipo de disposición será más beneficiosa para su vida útil.

2.3.2.5 Captadores Fresnel

Son captadores con concentración focal, seguimiento a un eje y que solo captan la radiación directa. La tipología más utilizada es captadores lineales Fresnel que puede ser comparados con los captadores cilindro-parabólicos.

Este tipo de captadores está compuesto por un reflector primario encargado de realizar el seguimiento de la radiación solar mediante mecanismos mecánicos o electrónicos. Está formado por una superficie, a modo de

espejo, calibrada que concentra y envía la radiación al reflector secundario que se encuentra en la parte superior de un tubo absorbedor fijo a una cierta altura. Para minimizar las pérdidas, el tubo absorbedor está contenido en un tubo de vidrio. En la Figura 21 se puede observar el esquema de este tipo de captadores.

En comparación con otro tipo de captadores, el coste de instalación puede ser reducido en casi en la mitad debido a varios factores: se usan reflectores planos o muy poco curvados; se instala a nivel del suelo, por lo que está menos expuesto al viento y abarata la estructura; y receptor y circuito hidráulico están fijos, menor coste de mantenimiento.

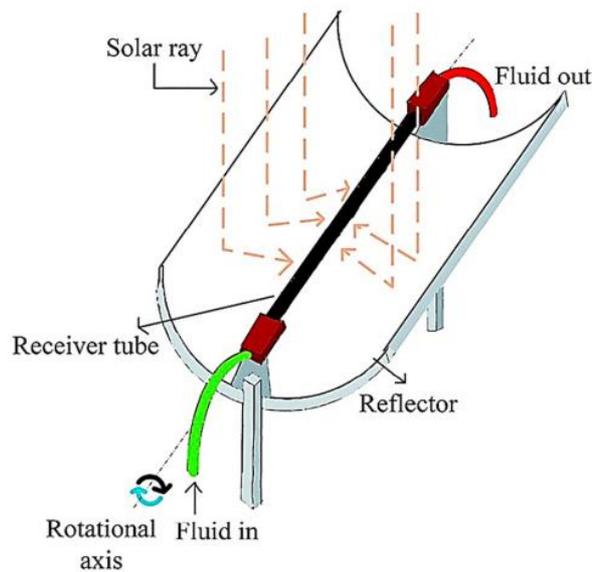


Figura 20. Captador cilindro-parabólico.

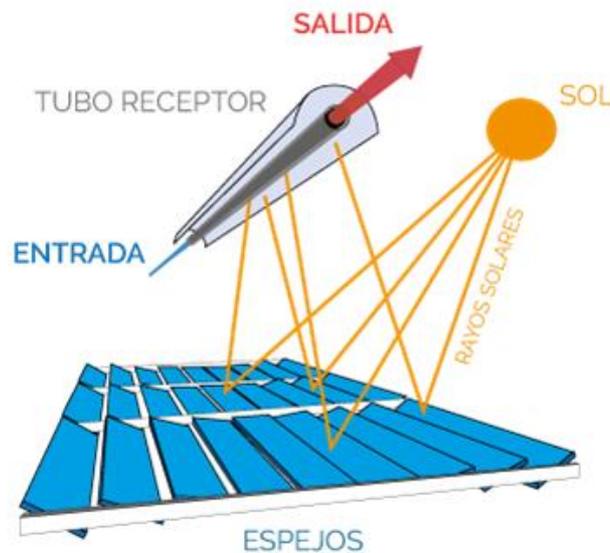


Figura 21. Disposición captador Fresnel.

2.3.2.6 Captadores receptor central y heliostatos

El receptor central o de torre genera calor a alta temperatura a partir de la concentración de luz por medio de heliostatos. Los heliostatos están formados por un gran número de espejos planos con movimiento en dos ejes para concentrar la radiación solar en un punto de la torre situada en el centro del campo de heliostatos como se

aprecia en Figura 22. La temperatura de trabajo puede rondar los 1500-2000 °C.

La energía térmica es transferida a un aceite térmico, agua o sales fundidas para realizar el intercambio con el sistema agua-vapor o con los tanques de almacenamiento. Generalmente, este sistema se utiliza en planta de generación de electricidad por medio de la expansión de vapor de alta presión en una turbina.

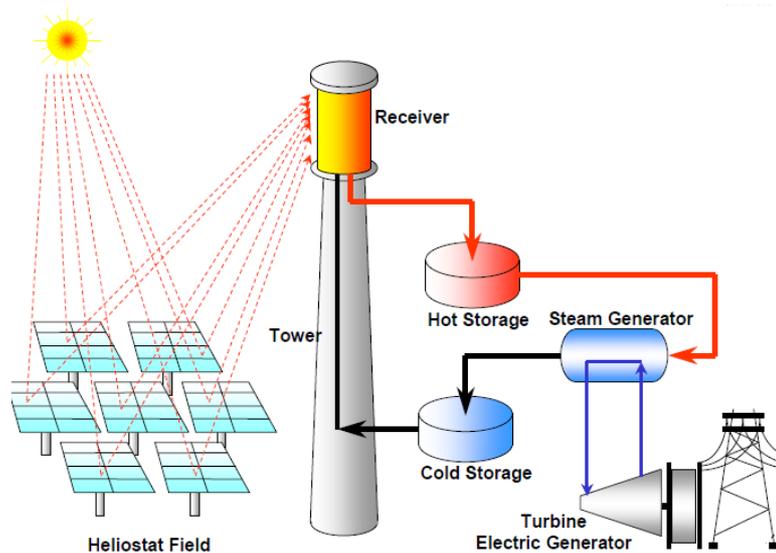


Figura 22. Esquema planta generación mediante receptor central.

2.3.2.7 Captadores de discos parabólicos

Como se muestra en la Figura 22 el captador de disco parabólico consiste en un conjunto de espejos dispuesto de forma semejante a una antena parabólica capaz de concentrar toda la radiación en el punto focal de la misma por donde circula el fluido caloportador. Es un sistema con seguimiento a dos ejes. Su rendimiento es bastante elevado en comparación con otros sistemas de captación y puede trabajar con temperaturas cercanas a 1500 °C.

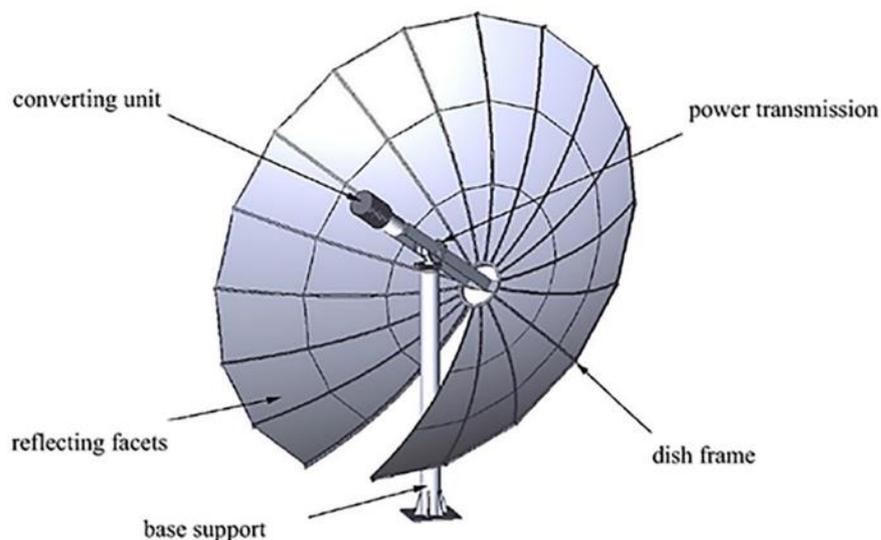


Figura 23. Disco parabólico.

2.4 Principales procesos térmicos en la industria

La energía solar puede integrarse en los procesos industriales en dos partes bien diferenciadas, a nivel de procesos o a nivel de suministro. Esto se desarrolla en otro apartado más adelante. Los principales procesos que podemos encontrar son: a nivel de suministro, la generación directa de vapor, calentamiento de agua de

alimentación o del fluido caloportador. A nivel de proceso, el calentamiento o precalentamiento de fluidos de trabajo, el aumento o mantenimiento de la temperatura para tanques, depósitos o baños y diversos procesos de trabajo como la separación mediante calor, secado, pasteurización o lavado y limpieza. [18]

Los principales procesos que encontramos en la industria son:

- Calentamiento de agua: la integración de este proceso debe ser focalizada a operaciones de baja temperatura para poder aumentar la eficiencia del captador. El uso de este sistema es el mayoritario en la aplicación de tecnología solar térmica en la industria. La inversión y el coste de operación es más beneficioso que cualquier otra tecnología de captación. Por el contrario, el conjunto de intercambiadores hace que las dimensiones de la instalación sean mayores a la instalación convencional.
- Secado: el objetivo principal es la eliminación de la humedad del material de trabajo ya sean frutas, verduras, comidas, minerales o textil. Generalmente, se realiza con aire caliente directamente o por intercambiadores.
- Precalentamiento: suele ser utilizado en aplicaciones de baja temperatura para mejorar las condiciones de trabajo como calentar el agua de alimentación de caldera o agua caliente.
- Generación de vapor: de manera general, se utilizan combustibles convencionales pero sus instalaciones son de mayor tamaño que las necesarias para generar vapor mediante intercambiadores que operan con un sistema de captación. El sistema de captación deberá trabajar a la temperatura que maximice su eficiencia.
- Pasteurización y esterilización: la industria láctea es la principal consumidora de estos procesos térmicos, seguida de la cervecera. Al operar de forma continua, la integración de un sistema térmico aporta eficiencia y ahorro al ciclo de trabajo. El mayor consumo de energía se realiza por parte de los procesos nombrados, pero existen otros en el ciclo de producción de productos lácteos.
- Lavado y limpieza: ambos procesos son utilizados en numerosos sectores e industrias como la alimentaria, del metal, textil o minera y en todas ellas, debido al gran volumen de agua necesario, la integración de sistemas de energía térmica tiene gran eficiencia. [19]

2.5 Principales sectores industriales en aplicaciones térmicas

Como se ha mencionado en apartados anteriores, el rango de temperaturas de operación de los sistemas de energía térmica es muy amplio y, por ello, la integración y aplicación de estos sistemas energéticos es muy susceptible en cualquier sector industrial.

En el sector industrial, el uso de sistemas térmico para la generación de calor de baja y media temperatura constituye 45% del total. El uso de energía térmica representa una alternativa para los procesos de refrigeración de los sectores alimentarios, agrícolas o farmacéuticos que actualmente operan con sistemas eléctricos. Los procesos de producción de calor a alta temperatura se destinan, principalmente, a los sectores de transformación de materiales como los metales, el vidrio o el mineral y para sistemas de producción eléctrica a partir de la generación de vapor.

Queda de manifiesto que, prácticamente, la totalidad de la demanda de calor de los procesos industriales en los diferentes sectores pueden ser satisfechos por sistemas de energía térmica. Los principales sectores que usan estos sistemas se enumeran en la Tabla 2 y se desarrolla el uso del calor de proceso y su posible integración en los procesos existentes. Es necesario destacar el gran impacto que tiene sobre las emisiones de gases de efecto invernadero el uso de fuentes de energía renovables como la solar térmica [20].

Tabla 2. Principales sectores industriales, procesos y temperatura de operación.

Sector industrial	Proceso	Temperatura operación (°C)
Alimentación y bebidas	Secado	30-180
	Lavado	60-90
	Pasteurización	60-80
	Evaporación	95-105
	Esterilización	60-120
Pulpa y papel	Preparación de pulpa	120-170
	Blanqueo	130-150
	Agua alimentación caldera	60-90
Textil	Lavado	40-80
	Blanqueo	60-100
	Tinte	100-160
Químico	Evaporación	95-105
	Destilación	110-300
	Calentamiento procesos	120-180
	Petroquímica	100-150
Minero	Secado	100-400
	Fundición concentrado	
	Calentamiento procesos	
	Lavado	
Otros	Precaentamiento agua alimentación	30-100
	Frío solar	55-180
	Calentamiento de espacios	30-80

2.5.1 Sector alimentario y bebidas

Es un sector muy amplio con diversidad de procesos según el producto transformado y obtenido finalmente. Como se observa en la tabla anterior los principales procesos son secado, lavado, pasteurización y esterilización y operan a temperatura media, entre los 60 y 180 °C. Con ello estas industrias consiguen una gran reducción en el consumo energético ya que los procesos SHIP pueden hacer frente a toda la demanda requerida.

Actualmente, es el sector en el que la tecnología SHIP está más presente en cuanto a número de instalaciones y las tecnologías de captación más utilizados son los captadores planos. Se pueden destacar la industria láctea y cervecera donde la integración de los sistemas solares térmicos se realiza a lo largo de las diferentes fases del proceso productivo [21].

2.5.2 Sector papelerero

En el proceso de obtención de papel se distinguen varias fases y procesos. La primera etapa es la de trituración de la madera hasta obtener un tamaño adecuado para pasar a la segunda etapa. En esta fase se trata la madera hasta la obtención de la pulpa con la adicción del licor blanco, un producto químico que disuelve la lignina y separa las fibras de celulosa. Una vez obtenida la pulpa, se realiza el lavado y blanqueo, donde se recuperan los productos químicos utilizados previamente denominado licor negro, debido al cambio de color que experimenta. Por último, se procesa la celulosa hasta conseguir la calidad deseada y se procede al secado de la misma mediante

evaporadores. Solo faltaría el corte y empaquetado.

Es habitual que este tipo de industrias instalen centrales de cogeneración para obtener energía eléctrica y térmica a partir de la eliminación de residuos como el licor negro o la corteza de madera. Durante el proceso se requiere energía térmica y eléctrica, por lo general, de forma continua ya que la producción de papel se realiza en régimen “non-stop” y los sistemas de energía térmica son una forma más eficiente y limpia de obtenerla [22].

La temperatura de operación de los procesos como el lavado y blanqueo se encuentra entre los 120-180 °C entre otros procesos y para la generación de vapor y obtención de energía sobre los 500 °C. Por lo que los captadores de tubos de vacío son una buena opción para los procesos intermedios, mientras que los sistemas con concentración como Fresnel o cilindro-parabólico son idóneos para procesos como la digestión o la generación de energía a partir de vapor. Para hacer frente a la oscilación solar se opta por el aumento del múltiplo solar, la integración de un sistema de combustible fósil o almacenamiento térmico intermedio. [15]

2.5.3 Sector textil

La industria textil es la encargada de la producción de hilos, telas y su posterior diseño, fabricación y distribución a partir de la materia prima ya sea natural o sintética. La principal potencia mundial en el sector es el mercado estadounidense seguido por la UE ya que constituyen el 65% del consumo de ropa. [15]

Durante el proceso productivo el suministro de agua caliente, en torno a los 80-90 °C, es continuo por lo que implica una gran demanda energética térmica. Esta energía requerida suele ser obtenida a partir de combustibles fósiles con el impacto que ello supone al medioambiente por lo que la integración de sistemas de energía térmica en el sector tiene bastante nicho de crecimiento de cara al futuro.

Las necesidades térmicas en la industria textil no solo se reducen al calentamiento de agua de proceso, existen otros procesos como el blanqueo, lavado o pintado que también requieren energía térmica. La mayoría de estos procesos tienen un rango de temperatura de operación entre 40-120 °C. Los tipos de captadores más utilizados para esta aplicación suelen ser captadores de tubos de vacío o captadores planos ya que, fácilmente, consiguen temperaturas en el fluido de trabajo de 120 °C. Además, por su forma física permiten la instalación en la cubierta de las naves industriales o incluso en sus paredes lo que facilita la integración de los sistemas térmicos. Los captadores Fresnel también son una opción a tener en cuenta si se tiene disponibilidad de superficie para la instalación. [18]

2.5.4 Sector químico

El sector químico es el encargado de la fabricación, extracción, procesado, purificación y empaquetado de diversos productos químicos para que sean usados en otros sectores como el agrícola, la industria metálica o farmacéutica.

En el sector se suelen compaginar el uso de la energía eléctrica, en torno al 54%, y energía térmica, obtenida de diferentes fuentes de combustibles fósiles, 27% petróleo, 4% carbón y 15% de otros combustibles. El principal uso de esta energía es para la generación de agua caliente y la generación de vapor, comúnmente a baja temperatura para los procesos de destilación, limpieza, secado o evaporación. [15]

Los sistemas de energía térmica pueden tomar gran importancia en el sector debido a que los procesos mencionados suelen trabajar en un rango de temperaturas de 55-120 °C. Y para las tecnologías de captación sería fácil obtener temperaturas cercanas a los 120 °C en el fluido de trabajo con captadores solares planos, con o sin cubierta, o con captadores de tubos de vacío. [19]

2.5.5 Sector minero

El principal uso de energía térmica en la industria minera se produce en el calentamiento de agua para otros procesos, la calefacción y la generación de vapor. Los procesos que requieren energía térmica para su operación se pueden clasificar en procesos térmicos, químicos o de reducción. Los sistemas de energía térmica están más desarrollados en minas cuya situación geográfica es más remota para ahorrar en el transporte de combustibles fósiles.

La operación de los sistemas de captación solar hasta 150 °C se consiguen con captadores solares sin concentración como los captadores planos o de tubos de vacío. Por su parte, los procesos que requieren alta

temperatura, 400 °C, se pueden obtener con tecnologías con concentración como discos solares o cilindro-parabólico. [19]

En el sector minero aún queda un largo camino por recorrer ya que existen numerosas operaciones en las que la aplicación de tecnologías de captación solar a baja, media o alta temperatura pueden integrarse y desarrollarse para disminuir el impacto medioambiental.

2.5.6 Sector agrícola

Los sistemas de energía térmica son utilizados en diversidad de países para tareas agrícolas o pesqueras. Los principales procesos llevados a cabo son el secado de productos, la cocción y la refrigeración. También, un importante ámbito de aplicación de las tecnologías SHIP son en las construcciones destinadas a contener la actividad agrícola o pesquera o a almacenar los productos. [23]

En líneas generales, los procesos que se han comentado operan a baja temperatura y la integración de sistemas de captación que sean capaz de cubrir la demanda de calor necesaria es bastante óptima. Los sistemas de captación de aire y de placa plana son los más usuales ya que permiten operar a temperaturas entre 10-80 °C.

2.5.7 Sector del metal

La fabricación de metal aglutina la producción de hierro, acero y aluminio mediante diferentes procesos de trabajo. En general, los metales se obtienen tras un primer tratamiento térmico de los minerales que lo contienen o mediante aleaciones a unas temperaturas de operación próximas a los 1500 °C. Mientras que para los acabados superficiales se trabaja con temperaturas entre 30-80 °C. El uso e integración de tecnologías SHIP en el proceso tiene un fuerte impacto en el coste productivo de metales frente al uso de combustibles convencionales debido a su elevado precio. [15]

Las tecnologías de captación utilizadas en el sector son dispares dependiendo de su aplicación. Para el pretratamiento y fundición del mineral los sistemas con concentración son los seleccionados por sus temperaturas de operación, pueden llegar hasta los 3500 °C, y por su posibilidad de integración. Los sistemas de torre con heliostatos pueden instalarse a modo de horno de fundición y eliminar, durante el día, el consumo de combustibles fósiles. Para otras aplicaciones a menor temperatura, los sistemas de captación plana o de tubos de vacío son muy útiles.

2.5.8 Sector del cuero y pieles

La industria del cuero engloba la producción de productos de cuero semiacabados y acabados, pudiéndose diferenciar las siguientes clases: curtido, generan cueros semiacabados y acabados mediante el procesado de pieles en bruto; producción de bienes, productos como el calzado, artículos de moda o de seguridad, guantes, sillas de montar que se fabrican a partir de cuero acabado; y producción integrada, la unión de las dos anteriores, donde tratan el cuero y obtiene el producto final.

En la producción de pieles y cuero se diferencian varios procesos englobados en dos grandes ciclos, el curtido para generar pieles y cueros semiacabados y, el segundo ciclo, donde se generan los productos finalizados. La línea de proceso que siguen las pieles, a modo grueso, son el secado, el curtido, el acabado y el tratamiento térmico, los cuales tiene un consumo energético del 40%, 13%, 37% y 10%, respectivamente.

El consumo energético de este sector se centraliza en el suministro de agua caliente para el tratamiento de las pieles a una temperatura de 60-80 °C y en el secado, el proceso más crítico del ciclo ya que proporciona la calidad final del cuero. Normalmente, se requieren temperaturas entre 70-100 °C para el secado. [15]

Las temperaturas de operación en el proceso muestran el potencial de los sistemas de energía térmica en esta industria para hacer frente a fuentes de energía convencionales. Los sistemas de tubos de vacío son convenientes para la generación de calor a estas temperaturas.

2.5.9 Sector automovilístico

En la industria automovilística la mayoría de los procesos son mecánicos y usan energía eléctrica en sus operaciones, no obstante, la energía térmica está muy presente en el proceso de fabricación de los componentes, en la zona de modelado de la carrocería y en el pintado.

Principalmente, la energía térmica procede de productos derivados del petróleo, aunque en países como España o India, el uso de sistemas de energía térmica es cada vez más habituales para estas aplicaciones. Los procesos en los que interviene la energía térmica son el calentamiento de agua para el modelado, pintado y el tratamiento superficial de la carrocería, el lavado de componentes del motor y la climatización de los espacios industriales.

Las temperaturas demandadas para los procesos de tratamiento de agua, tratamiento y pintado de la carrocería y climatización oscilan entre los 40-150 °C y para el agua utilizada para el lavado de componentes, la temperatura de operación, puede llegar a 300 °C. Por ello, los sistemas de placa plana o tubos de vacío son los más adecuado y, además, permiten su instalación en las naves industriales [24].

2.5.10 Sector petrolero y del gas

Se pueden diferenciar dos procesos, la extracción del material y el procesado de este para la obtención de otros derivados.

El proceso de extracción en los pozos se divide en tres etapas de recuperación. La primera etapa la mezcla de petróleo y gas es bombeada gracias a la presión en el interior de la corteza, pero una vez alcanzada la presión umbral, la extracción se detiene debido a la viscosidad y la presión requerida. La segunda etapa consiste en inyectar agua o gas para intentar mantener la presión de la corteza de los niveles a mayor profundidad para seguir con el bombeo. Y, la tercera etapa o recuperación mejorada de petróleo, "Enhanced oil recovery, (EOR)" consiste en la inyección de fluidos miscibles con la mezcla de gas y petróleo que generalmente son otros gases, vapor de agua, aire o compuesto poliméricos. [25]

La integración de los sistemas solares en la industria petrolera se produce en la tercera etapa, se denomina recuperación solar mejorada de petróleo, "Solar Thermal Enhanced Oil Recovery (Solar TEOR)". Se suelen usar sistemas cilindro-parabólicos que permiten la generación de vapor sobre 250-300 °C y a una presión de 70-110 bar, parámetros aptos para la extracción. [15]

La integración de tecnologías SHIP se pueden producir en: la fase de precalentamiento de agua, consigue ahorrar hasta un 10% del gas utilizado; generación continua de vapor para su inyección, con capacidad suficiente para producir vapor durante el día y solo usar gas durante la noche, la buena operación de este sistema permite el ahorro del 25% de combustible fósil; y, por último, generación variable de vapor para su inyección, mismo procedimiento que el anterior pero sin mantener el ritmo de producción de vapor durante la noche, de esta manera el ahorro en combustible dependerá de la producción requerida. [15]

El proceso de obtención de los diferentes derivados del petróleo como el petróleo crudo, GLP, gasóleo o gasolina entre otros se realiza por diferencia de presión y temperatura en la misma corriente de separación. El uso de vapor en los diferentes procesos de separación se ocasiona en operaciones como el accionamiento mecánico de los equipos, calentamiento del proceso o la generación de energía cautiva para otros procesos. La presión de operación suele ser por debajo de 20 bares, excepto en ciertos equipos que llega hasta los 70 bares.

Para las operaciones nombradas anteriormente las temperaturas de trabaja oscilan entre los 135-260 °C y para la generación de energía cautiva hasta los 500 °C. Por lo que la integración de los sistemas de captación con concentración como los equipos Fresnel o cilindro-parabólico tienen cabida en esta parte del proceso. El punto de integración del campo solar puede realizarse sobre el proceso directamente o sobre el equipo convencional existente para evitar fluctuaciones debido a horario solar.

2.5.11 Otros sectores

La integración y uso de sistemas de energía térmica tiene lugar en un amplio abanico de sectores, de los cuales, los principales a nivel global ha sido descritos en el desarrollo del apartado. No obstante, existen otros muchos sectores en los que el uso de energía térmica está muy presente y tienen un gran camino recorrido para lograr la descarbonización o ser piedra de apoyo para conseguirlo.

En el sector sanitario y el sector servicios la demanda de agua caliente es continua a diario por lo que el cambio hacía un sistema de producción de energía térmica permite el ahorro económico del coste del combustible utilizado en los equipos convencionales, por lo general, calderas de gas o de carbón. Además del ahorro económico, este cambio tiene un adecuado impacto sobre el medioambiente debido a la gran cantidad de centros hospitalarios existentes que, además, son gestionados por entidades públicas que están adheridas al Acuerdo de París. En el sector servicio y de la empresa privada, el uso de sistemas limpios y verdes suele estar subvencionado

para la consecución de los objetivos firmados.

Una de las piedras de apoyo de todos los estados participantes en el Acuerdo de París es la generación de electricidad mediante tecnologías limpias y sostenibles. De ahí, que el Sol, sea una de las fuentes de energía de la actualidad y del futuro, por su carácter sostenible, la capacidad de radiación y por el avance en las tecnologías de aprovechamiento y uso existentes a día de hoy.

Por ello, los sistemas SHIP con concentración destinados a la generación de vapor deben ir tomando importancia de cara al futuro. Estos sistemas solares pueden instalarse de manera individual o de forma híbrida con los sistemas convencionales, ambas opciones tienen repercusión positiva sobre las emisiones de gases de efecto invernadero.

3 INTEGRACIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN PROCESOS INDUSTRIALES

3.1 Introducción

Los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, reducción del consumo de combustibles fósiles y proporcionar un papel importante a las fuentes de energía renovables marcan la hoja de ruta de la UE para conseguir la descarbonización y lograr el mantenimiento del aumento de la temperatura media terrestre para el 2050. Por ello, las medidas de eficiencia energética en la industria actual y el impulso de las energías renovables son los pilares fundamentales para la consecución del objetivo. Es aquí donde la energía solar y la tecnología para su aprovechamiento se hacen imprescindibles debido a la cantidad de energía en forma de calor que se consume en el ámbito industrial y, en menor medida, en otros sectores como el transporte o el sector servicios.

La aportación de los sistemas solares a la eficiencia energética de cualquier proceso es evidente pero la importancia del punto y el carácter de la integración generan una gran repercusión en el proceso completo. La instalación de un nuevo sistema conlleva unos costes asociados a la instalación y mantenimiento del sistema de conversión, un ahorro en el consumo de combustible de la fuente de energía convencional y otros muchos aspectos a tener en cuenta y que deberán ser estudiados y analizados. En definitiva, se realizará una optimización tecnológica del proceso concreto y del sistema de producción en general.

Para conocer la viabilidad y todos los aspectos relacionados con la instalación de sistemas SHIP en un proceso existente se realiza el estudio de integración. Este estudio comienza con los datos más básicos como son la temperatura de operación requerida, la demanda energética y el espacio de instalación disponible. Esta fase es tan importante como otras fases del proceso como son la generación de calor, su distribución o el almacenamiento. En la Figura 24 se muestran las numerosas posibilidades de integración y se diferencian los dos niveles de integración existentes, integración a nivel de suministro o integración a nivel de proceso.

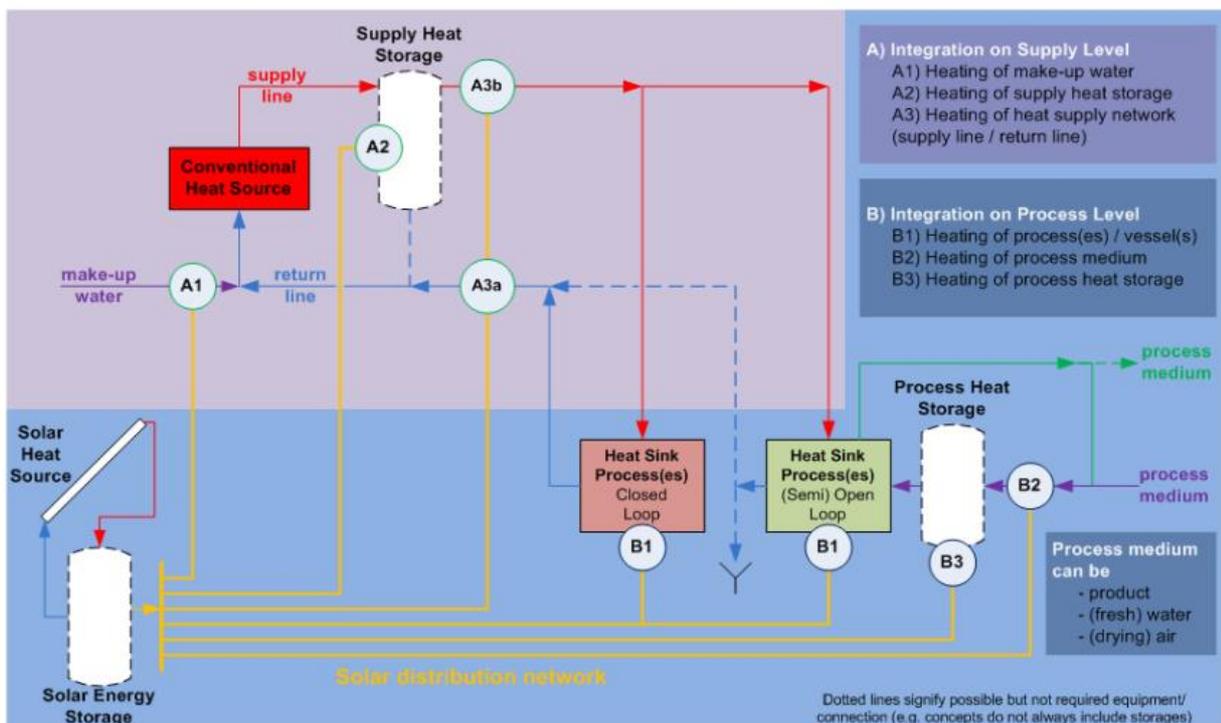


Figura 24. Posibles puntos de integración tecnologías SHIP. [26]

3.2 Metodología de evaluación para integración de sistemas de energía solar

Para que el proceso de integración de los sistemas de energía solar sea óptimo y genere los beneficios esperados se deben seguir unas pautas establecidas en diferentes fases como se observa en la Figura 25. Estas fases del estudio de integración son [27]:

3.2.1 Fase I: Estudio previo de viabilidad

Adquisición de datos básicos: estos datos se adquieren por medio de un cuestionario básico aplicable a todos los sectores industriales y con la intención de tener información general sobre el proceso y la motivación del cliente antes de realizar una visita a la empresa.

Preparación: usar información específica sobre la tecnología solar para obtener un punto de vista general del proceso a llevar a cabo. Para ello, se pueden utilizar estudios o informes realizados en otros casos. Será necesario conversar con la empresa para conocer la implicación de esta en cuanto al conocimiento de la tecnología, su operación y mantenimiento y estrategias futuras.

Decisión: concluir, en base a los puntos desarrollados, si existe potencial para proceder a la instalación del sistema de energía solar en el proceso estudiado y comunicarle la decisión a la empresa.

3.2.2 Fase II: Estudio de viabilidad

Visita a la empresa: obtener una visión general del lugar de instalación y operación, del consumo energético y del suministro de calor. Además, realizar o trazar croquis con las posibles líneas de suministro, puntos de integración, localización del almacenamiento, conexión del sistema de captación... todo ello, junto a los técnicos de la empresa.

Análisis estado actual: verificar los datos obtenidos con los datos básicos de la primera fase. Realizar el balance energético y el diagrama de flujo del proceso productivo y estimar el consumo energético de los diferentes procesos unidad.

Optimización del proceso y eficiencia energética: estudiar el potencial de ahorro energético para el proceso y establecer el calor recuperado sin los sistemas de servicio como el aire de proceso, refrigeración o calefacción.

Identificación de puntos de integración: obtener los posibles puntos de integración en base unos criterios de los procesos consumidores de calor y el nivel de integración. Los criterios para todos los procesos con demanda de calor son: temperatura de operación para integración, perfil de carga, consumo energía térmica, esfuerzo para la integración, sensibilidad a los cambios en el entorno y fracción solar.

Análisis puntos de integración: establecer el captador solar adecuado, el área necesaria, el volumen de almacenamiento, la fracción solar propuesta y el rendimiento del conjunto. También, añadir los costes generales para los diferentes puntos propuestos en el paso anterior. Realizar una comparativa de datos técnicos y económicos y realizar una clasificación.

Reportar información: redactar un informe con un resumen general en el que aparezcan los puntos de integración más adecuados y el equipamiento necesario.

3.2.3 Fase III: Toma de decisiones

Decisión: discutir con la empresa las posibilidades del sistema de energía solar a instalar e integrar en el proceso. La empresa, apoyada en el informe del estudio de viabilidad de tomar la decisión de implementar el sistema de energía solar y donde integrarlo.

Plan detallado: comenzar con la ejecución del proyecto en base a la decisión de la empresa. Será necesario repetir ciertos pasos anteriores para la recolección de datos de forma exhaustiva.

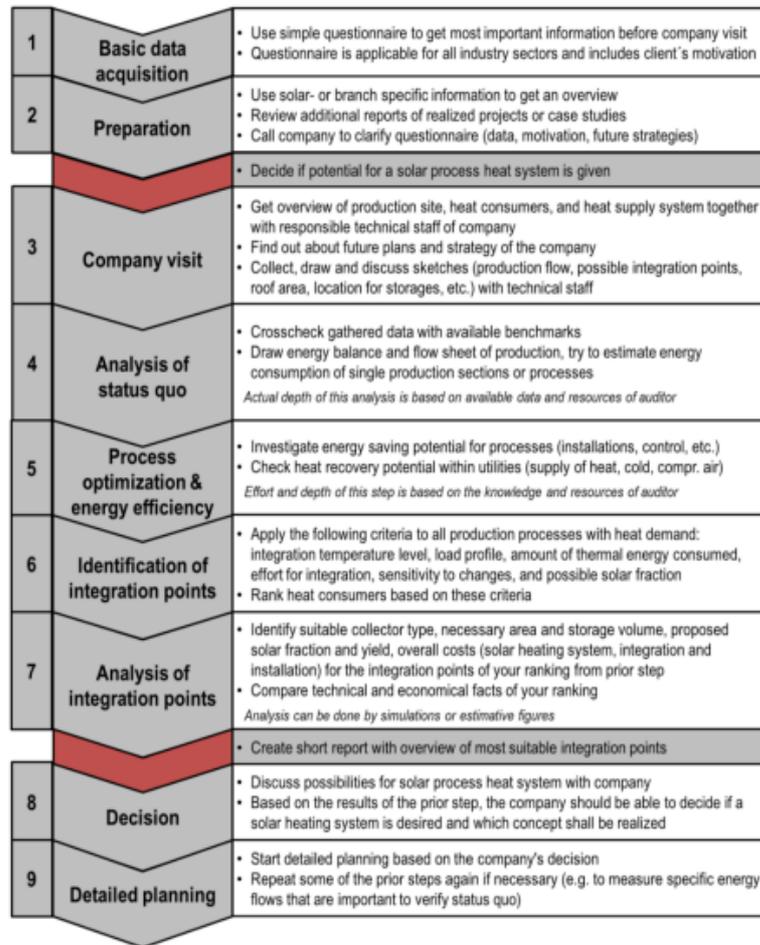


Figura 25. Fases del estudio de integración. [26]

3.2.4 Nivel de integración

El nivel de integración del calor generado por el sistema de energía solar definirá, en parte, la metodología del sistema seleccionado y ayudará a establecer el plan detallado. La integración puede darse en dos niveles diferentes, integración a nivel de suministro o integración a nivel de proceso.

La integración a nivel de suministro engloba como medios de transferencia líquidos y vapor. Los conceptos de integración para los medios de transferencia de calor líquidos son válidos para el agua caliente, aceites térmicos o medios sintéticos, incluso, para el aire. El medio de transferencia utilizado influirá en el tipo de intercambiador de calor necesario.

El uso de vapor como fluido caloportador permite la integración de tres conceptos diferentes: generación de vapor solar, calentamiento de agua de alimentación de caldera y calentamiento del agua de reposición. En el caso de fluidos caloportadores líquidos, los conceptos de integración pueden ser: integración paralela, incrementar temperatura en el flujo de retorno o aportar calor al almacenamiento o los procesos en cascadas del sistema convencional.

Por su parte, la integración a nivel de proceso puede escalonarse en dos fases, en función del tipo de proceso en el que se integra el sistema de energía solar, precalentamiento de una corriente de fluido, calentamiento de un baño, maquinaria o depósito y procesos térmicos de separación; y, en función del modo de calentamiento, por intercambiador externo o interno, inyección de vapor, secado convectivo o por contacto y evaporación. Cruzando las dos fases anteriores, se puede obtener de forma resumida la Tabla 3:

Tabla 3. Conceptos de integración a nivel de proceso.

	Tipo de proceso		
	Pre calentamiento de corriente de fluido	Calentamiento de baño, maquinaria o depósito	Procesos térmicos de separación
Modo de calentamiento	Intercambiador externo	Intercambiador externo	Secado convectivo
	Inyección de vapor	Intercambiador interno	Secado por contacto
		Inyección de vapor	Evaporación

En general, la integración del sistema de energía solar dispuesto durante el estudio de viabilidad deberá cumplir con todos los requisitos técnicos y económicos establecidos, así como los parámetros de operación que permitan obtener un rendimiento elevado. De forma visual, se observa en la Figura 26 los dos niveles de integración que se han desarrollado, el tipo de integración y su concepto. Partiendo de la figura mencionada se describen a continuación las diferentes opciones de integración de la energía solar en un proceso industrial.

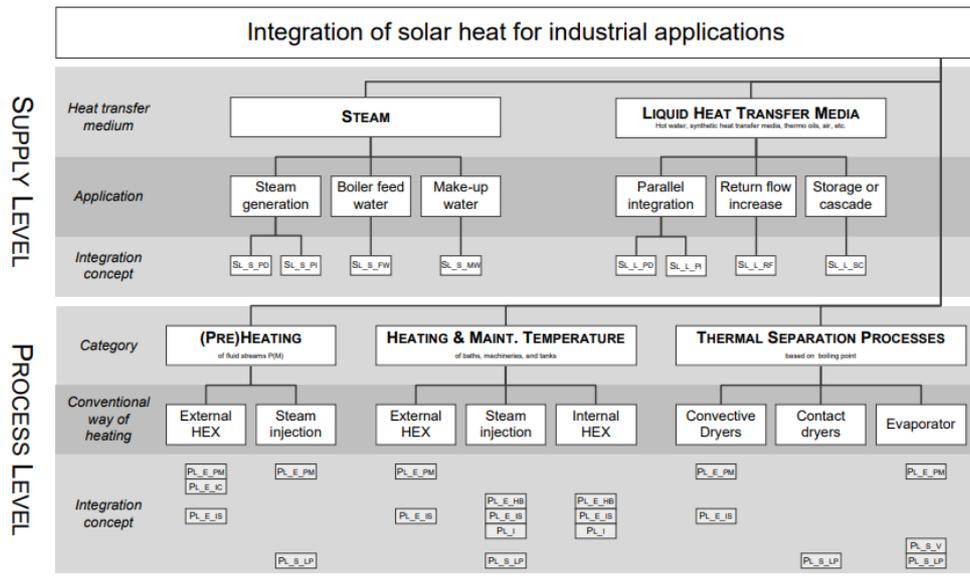


Figura 26. Niveles de integración. [26]

A nivel de suministro se suelen encontrar integración en paralelo con un sistema convencional de generación de energía térmica por lo que, habitualmente, la temperatura de integración es elevada, sobre 150 °C. En este caso, los sistemas de captación con concentración toman ventaja. En cuanto a los conceptos de integración encontramos:

- Generación de vapor solar directa

La integración en este sistema consiste en un tanque que contiene una mezcla de agua-vapor, el agua del tanque alimenta a los captadores mientras que el vapor se almacena en el tanque hasta alcanzar la presión suficiente para ser introducido en el circuito de vapor en el que opera el sistema convencional. Durante el paso de vapor solar al circuito de vapor, el sistema convencional reduce su producción de vapor y consumo de combustible. En la Figura 27 se observa el esquema de la instalación.

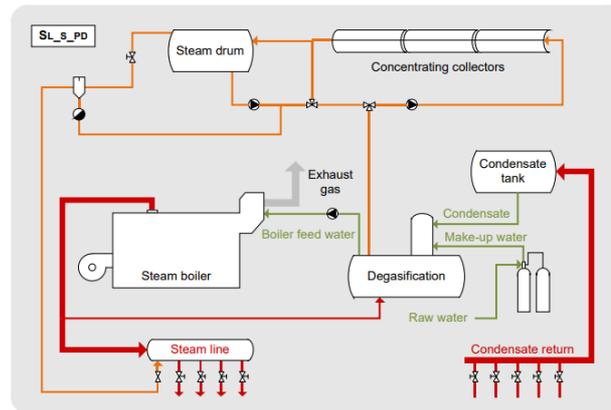


Figura 27. Integración SHIP para generación directa de vapor. [26]

- Generación de vapor solar indirecta

La integración de este sistema es, prácticamente, idéntica al anterior como se observa en la Figura 28. La diferencia se encuentra en la existencia de un intercambiador y su fluido caloportador. El fluido caloportador circula desde el campo de captadores hasta el intercambiador, eleva la temperatura de la mezcla agua-vapor y vuelve a los captadores. Es necesario que el intercambiador opere a la misma presión que la línea de vapor convencional.

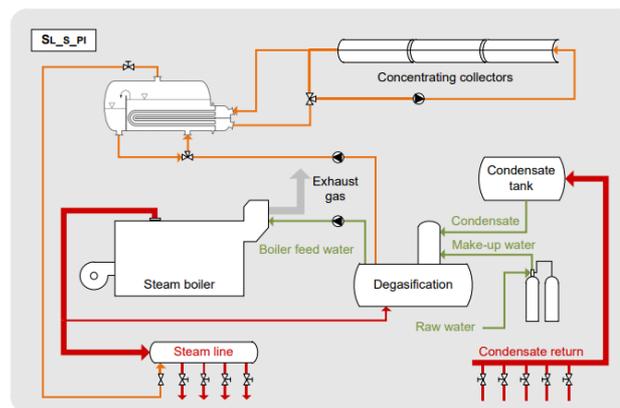


Figura 28. Integración SHIP para generación indirecta de vapor. [26]

- Precalentamiento de agua de alimentación de caldera

La integración de la energía térmica solar se produce en la línea de agua tras su paso por el degasificador como se observa en la Figura 29. En estos sistemas, el economizador es el encargado de elevar la temperatura del agua antes de entrar en caldera.

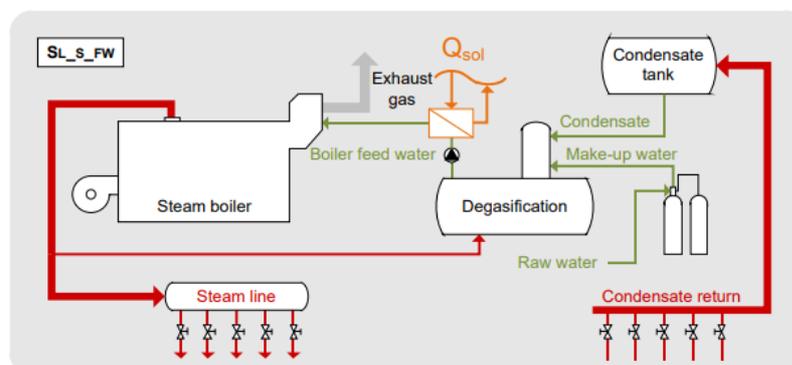


Figura 29. Integración SHIP para precalentamiento de agua de alimentación. [26]

- Precalentamiento del agua de reposición

La integración en este punto compensa las pérdidas por condensación procedentes de la evaporización del vapor flash, purgas y consumo directo de vapor. Por lo general, la integración tiene lugar antes de la entrada en el desgasificador, pero es necesario estudiar el calor residual en la entrada a caldera para no disminuir el efecto generado y la eficiencia. En la Figura 30 se observa este tipo de integración.

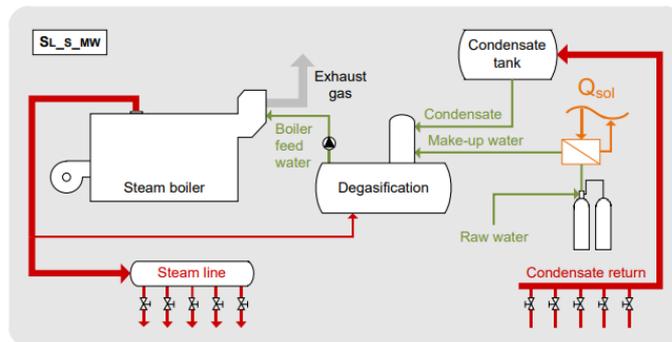


Figura 30. Integración SHIP para precalentamiento del agua de reposición. [26]

- Integración paralela a nivel de suministro con fluido caloportador

Para la integración de sistemas de calor solar en paralelo con líneas de agua caliente es necesario dividir el flujo de vapor y acumular el condensado generado que le aportará temperatura a la línea de agua de alimentación antes de recorrer los captadores y evaporizarse de nuevo para ser integrado en la línea de vapor como se observa en la Figura 31. La operación del sistema debe garantizar la temperatura requerida del flujo procedente de los captadores y la recogida del condensado que se genere en la unión de ambas corrientes de vapor. La integración puede ser directa, sin intercambiador, o indirecta, con intercambiador.

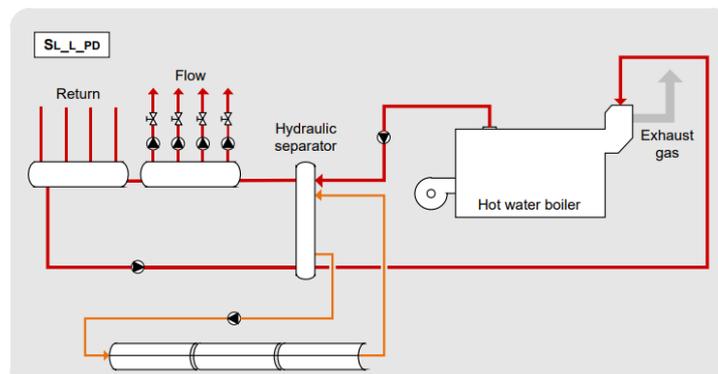


Figura 31. Integración SHIP en paralelo para calentamiento con fluido caloportador. [26]

- Integración en serie a nivel de suministro con fluido caloportador

Este tipo de integración es similar al anterior solo se diferencia en que, en el retorno, el fluido es precalentado, por lo que no se requiere garantizar una temperatura en el flujo procedente de los captadores solares. Este sistema mostrado en la Figura 32 puede generar disminución de la eficiencia del sistema convencional.

- Energía térmica para almacenamiento o procesos en cascada

Las combinaciones de los tipos de conexión de los sistemas de almacenamiento, su volumen y el número de tanques o depósitos son muy numerosas en la industria. Por lo que el calor solar puede tener dos diferentes usos, precalentamiento de las corrientes de entrada o mantenimiento de la temperatura de almacenamiento, ambos procesos se representan en la Figura 33.

En los procesos de calentamiento en cascada, el retorno de agua eleva la temperatura a su paso por el campo solar antes de conseguir la temperatura de operación mediante la inyección de vapor durante su paso en cascada. Estos sistemas se muestran en la Figura 33.

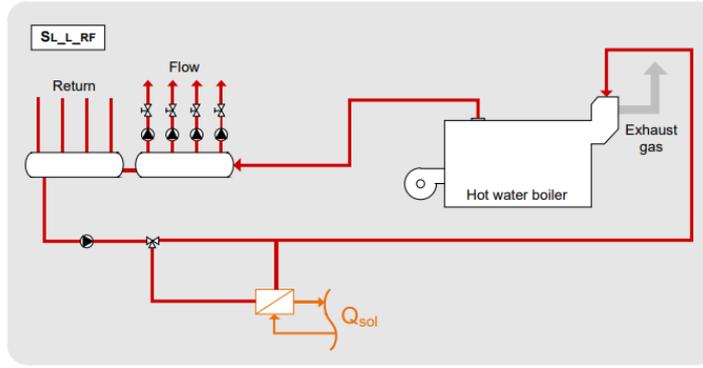


Figura 32. Integración SHIP en serie para calentamiento con fluido caloportador. [26]

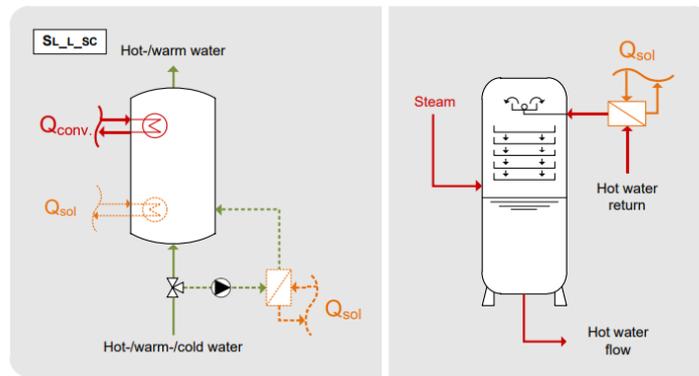


Figura 33. Integración SHIP en almacenamiento y procesos en cascada. [26]

A nivel de proceso encontramos tres fases de diferencias como se ha mostrado en la Tabla 3.

- Integración a nivel de procesos con intercambiador externo indirecto

Es uno de los conceptos más comunes ya que su integración consiste en la implementación de un intercambiador en serie con la fuente de calor convencional cuyo funcionamiento se basa en la energía solar térmica. Su esquema se muestra en la Figura 34 en el que el proceso puede ser cualquiera que demande una temperatura a la que el campo solar pueda responder.

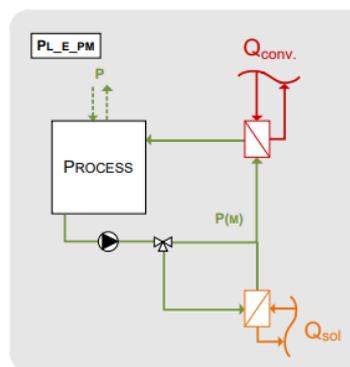


Figura 34. Integración SHIP en el proceso con intercambiador externo. [26]

- Intercambiador externo indirecto en el circuito de agua de calentamiento

Este sistema es utilizado en industrias donde el agua caliente es usada para calentar productos delicados y la temperatura demandada no es excesivamente elevada. La integración, como se muestra en la parte izquierda de la Figura 35, es idéntica a la anterior solo que esta enlazada con el circuito de agua. En la parte derecha se observa la integración en el proceso de pasterización en la industria láctea.

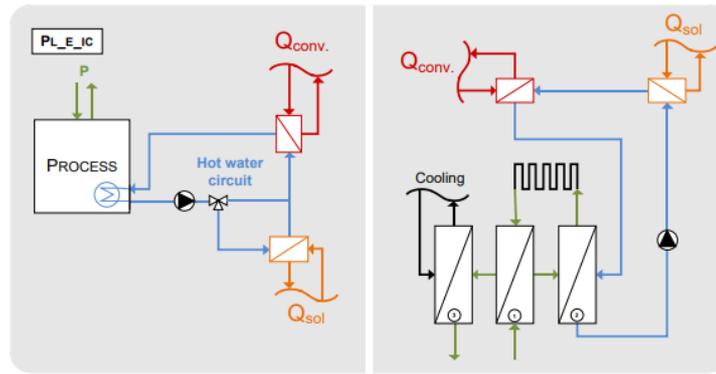


Figura 35. Integración SHIP para calentamiento de agua con intercambiador externo. [26]

- Calentamiento de baño, maquinaria o depósito con intercambiador externo

En este concepto, el calor solar es utilizado en paralelo con el calor procedente de la fuente convencional, es decir, de forma adicional para disminuir la cantidad de calor procedente de la caldera. Es importante ajustar, en el tiempo, la temperatura requerida por el proceso para evitar que la temperatura de demanda del sistema solar sea baja y disminuya la eficiencia. En la Figura 36 se observa este tipo de integración.

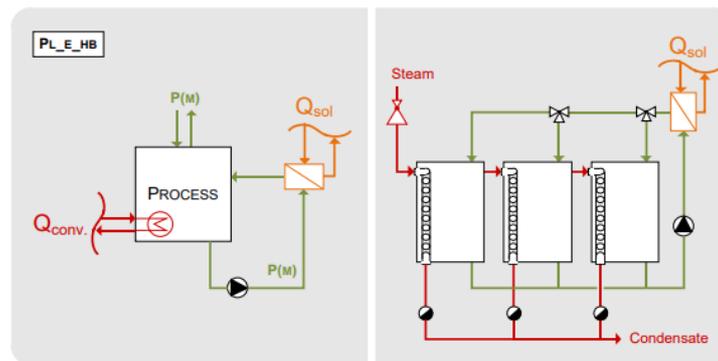


Figura 36. Integración SHIP para calentamiento de baños, maquinaria o depósitos. [26]

- Calentamiento de flujos de entrada con intercambiador externo

Los intercambiadores externos operados mediante energía solar térmica en este tipo de integración se basan en el calentamiento de los flujos de entrada al proceso ya que requiere una temperatura mayor una vez iniciado el proceso. En la Figura 37 se observa un proceso en el que el agua de reposición se precaliente con el sistema de captación solar.

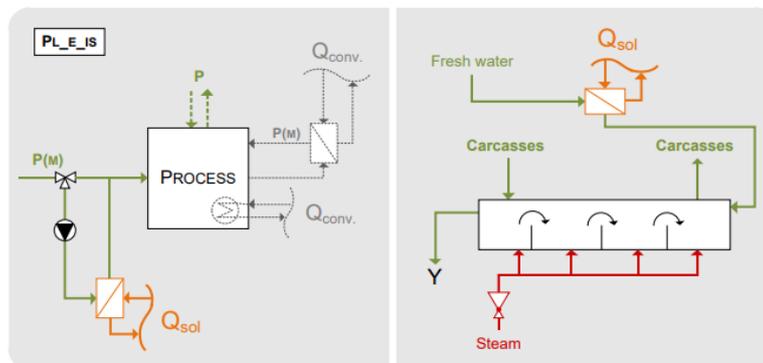


Figura 37. Integración SHIP para calentamiento de flujos de entrada con intercambiador externo. [26]

- Integración a nivel de procesos con intercambiador interno

Se han descrito los conceptos de integración con intercambiadores externos, en este caso, el intercambiador operado por medio de la energía solar térmica se encuentra dentro de los baños, maquinarias o tanques y su cometido es el mantenimiento de la temperatura en su interior, en la Figura 38 se observa el esquema. Es de

especial importancia el espacio disponible en el interior del equipo.

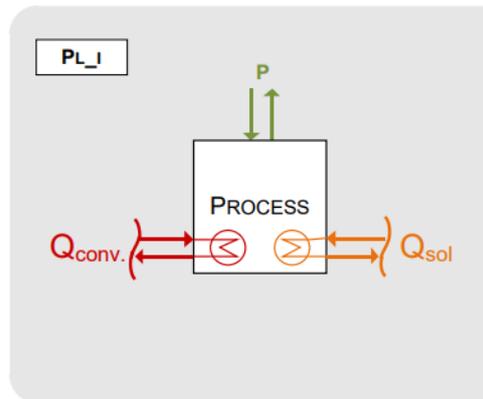


Figura 38. Integración SHIP en el proceso con intercambiador interno. [26]

- Generación de vapor en vacío

Este concepto es utilizado en industrias que requieran temperaturas de trabajo en el rango de 40-80 °C para procesos de evaporación. Es necesario contar con un tanque de vacío en el que opere el sistema convencional. El sistema solar térmico se encargará de revaporizar el condensado del tanque de vacío y del vapor de proceso como se observa en la Figura 39.

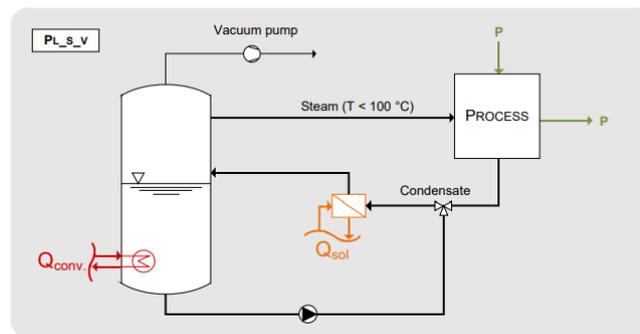


Figura 39. Integración SHIP para generación de vapor en vacío. [26]

- Generación de vapor a baja presión

Este concepto se basa en introducir el condensado del vapor de proceso y agua de alimentación en una caldera o intercambiador que opera con el campo de captadores. El vapor generado, a baja presión, es utilizado para calentar el proceso y de esta manera el sistema convencional disminuye la cantidad de calor generado. En la Figura 40 se muestra el esquema, es muy semejante a la generación de vapor indirecta a nivel de suministro, pero a una temperatura inferior.

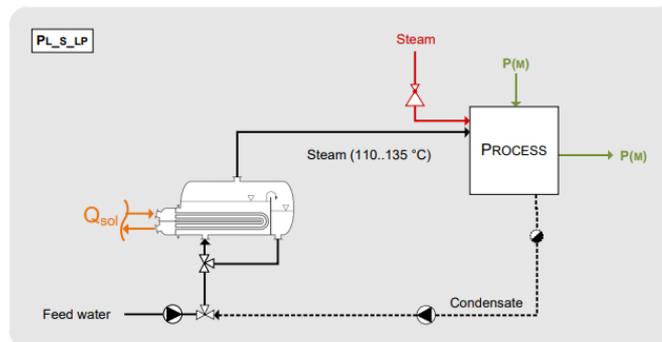


Figura 40. Integración SHIP para generación de vapor a baja presión. [26]

3.3 Revisión bibliométrica sobre la energía solar térmica en la industria

3.3.1 Introducción

Es sabido por todos que el uso de combustibles fósiles, principal materia prima para la generación de calor, tiene efectos negativos para el medioambiente, la economía y, además, no se regeneran. Por tanto, el desarrollo de sistemas de energía térmica para la industria se postuló como algo primordial tras los primeros acuerdos sobre políticas energéticas. Estos acuerdos, a nivel europeo, recogían un aumento de la eficiencia y la reducción de emisiones de efecto invernadero para 2050 [2].

Por ello, la energía solar térmica toma un papel fundamental en el proceso de reducción de consumo de combustibles fósiles y su uso más eficiente; la reducción de gases de efecto invernadero y en la creación de un sistema energético más competitivo a nivel económico que garantice el suministro, pero basado en energías renovables.

La energía térmica consumida por la industria a nivel global se puede clasificar en función del rango de temperaturas de trabajo del proceso: baja temperatura, por debajo de 150 °C; media temperatura, entre 150-400 °C y alta temperatura, por encima de los 400 °C. Conociendo estos rangos de temperatura, la energía solar térmica podría hacer frente a los de baja y media temperatura seleccionando la tecnología adecuada, además, los procesos en estos dos rangos de temperatura suponen el 50% de la energía térmica utilizada en la industria [28]. Los principales inconvenientes que presenta este tipo de tecnologías son la variación de la radiación solar en función de la situación geográfica y meteorológica y de la estacionalidad; la discontinuidad del suministro debido a la traslación de la Tierra y la necesidad de establecer un sistema de almacenamiento, conlleva un aumento de inversión. Los sistemas de alta temperatura se suelen destinar a la generación eléctrica a partir de la generación de vapor.

Todo lo anteriormente descrito se encuentra respaldado por numerosos estudios y publicaciones de todo tipo, desarrollo tecnológico y ensayos experimentales. Por lo que realizar un análisis bibliométrico sobre la energía solar térmica y todas sus áreas de aplicación y estudio puede ser beneficioso para conocer la dimensión y el impacto de esta fuente de energía renovable en el día a día de la sociedad.

En el siguiente capítulo se utilizará como herramienta el análisis bibliométrico para analizar la gran cantidad de datos científicos, dividiendo la evaluación en diferentes áreas científicas, países en los que se publicaron los documentos y la frecuencia de las palabras clave entre otros. Con ello, se intenta valorar cuantitativamente la calidad académica de las publicaciones y/o autores mediante métodos estadísticos. Existen varias bases de datos que ofrecen suficiente cobertura académica para realizar este estudio como son Scopus, Web Of Science o Google Académico. [29]

Para el análisis realizado se decide tomar la base de datos de Scopus por estar asociada a la web ScienceDirect a la que la Universidad de Sevilla tiene acceso y su interfaz es semejante. Además, esta base de datos permite realizar un análisis sobre los resultados de la búsqueda de artículos, así como su fácil exportación para tratar los datos en otros programas. Se analizan los documentos publicados por año durante la última década, es decir, desde el 2012 hasta nuestros días; según la fuente de publicación o revista; por autores; por país de procedencia; por el tipo de documento y por el área de estudio. A parte, con los datos exportados se realizará un mapeado de interrelación entre las palabras claves de las publicaciones en el programa VOSviewer. El resultado obtenido es un mapa con nodos que según su tamaño y líneas de conexión destacan la importancia de la palabra clave.

3.3.2 Metodología

La bibliometría es la rama del conocimiento que estudia y analiza las publicaciones existentes sobre algún tema concreto. La metodología elegida para realizar este análisis sigue los pasos descritos a continuación:

- Definición del tema de investigación: nuestro caso de estudio son los sistemas de energía solar térmica en la industria.
- Selección de la base de datos: como se ha mencionado, la base de datos seleccionada es Scopus.
- Selección de objetivo y metodología: el objetivo es conocer la relación entre los documentos publicados sobre los sistemas SHIP. En cuanto a la metodología, se realiza un filtrado de documentos y publicaciones por medio de cuatro cadenas de consulta que se muestran en la Tabla 4. Con estas cadenas

se han podido filtrar los documentos iniciales, 8120, hasta obtener finalmente 1137 documentos. Era necesario poder reducir la búsqueda por debajo de 200 publicaciones para poder utilizar el programa de mapeo VOSviewer, para ello, en esta búsqueda se ha reducido el rango de años de publicación desde el 2020 hasta nuestros días. Para el análisis realizado en Scopus se mantiene el rango de los últimos diez años.

- Eliminar duplicados: esta fase se realiza si se utilizan dos o más base de datos, no es nuestro caso.
- Obtención de resultados: realizar el análisis y comentar los resultados obtenidos.

Tabla 4. Cadenas de búsqueda en Scopus.

Cadenas de búsqueda utilizadas en la base de datos	
SHIP	TITLE-ABS-KEY (“Solar termal Energy systems” OR “Solar heat industrial process”)
SHIP + collectors	TITLE-ABS-KEY (“Solar termal Energy systems” OR “Solar heat industrial process”) AND (“collectors”)
SHIP + integration	TITLE-ABS-KEY (“Solar termal Energy systems” OR “Solar heat industrial process”) AND (“collectors” OR “integration”)
SHIP + storage	TITLE-ABS-KEY (“Solar termal Energy systems” OR “Solar heat industrial process”) AND (“collectors” OR “integration” OR “storage”)

3.3.3 Resultados

En primer lugar, se comentarán los resultados obtenidos para los documentos obtenidos en la última década. En total, se han considerado 2193 documentos publicados desde el 2012 y tras ser filtrados por la última cadena de búsqueda establecida.

Para comenzar a comentar los resultados se muestra en la Figura 41 la evolución de las publicaciones desde el inicio del rango estudiado. Es evidente la tendencia al alza de los estudios e investigaciones que se centran en los sistemas de energía solar térmica desde 2012 donde comienzan, por partes de los gobiernos, la concienciación sobre el cambio climático y la necesidad de buscar soluciones. Las publicaciones tienen dos repuntes, un primer repunte en el año 2015, causado por la puesta en marcha del Acuerdo de París. Y otro repunte en el año 2019, coincidiendo con la pandemia del Covid-19, donde, de manera general, las publicaciones crecieron en casi todos los ámbitos de estudio debido a las restricciones planteadas para la población y la vida social.

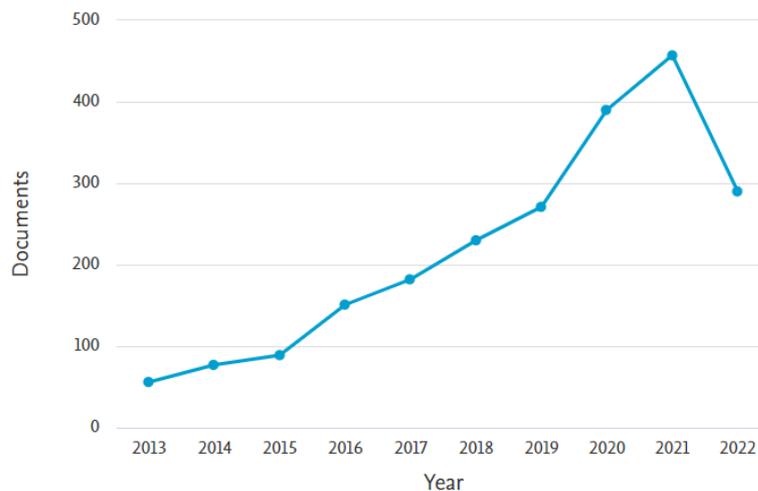


Figura 41. Evolución de publicaciones desde 2012. [30]

Tras conocer la cantidad de documentos publicados es necesario clasificarlos en función del tipo de documento generado. Los tipos y números de documentos disponibles en Scopus se muestran en la Figura 42. El principal tipo de publicación es el artículo científico con el 70% del total. En un segundo escalafón se encuentran las reviews sobre los temas estudiados y los artículos generados de conferencia con el 15% y 10%, respectivamente.

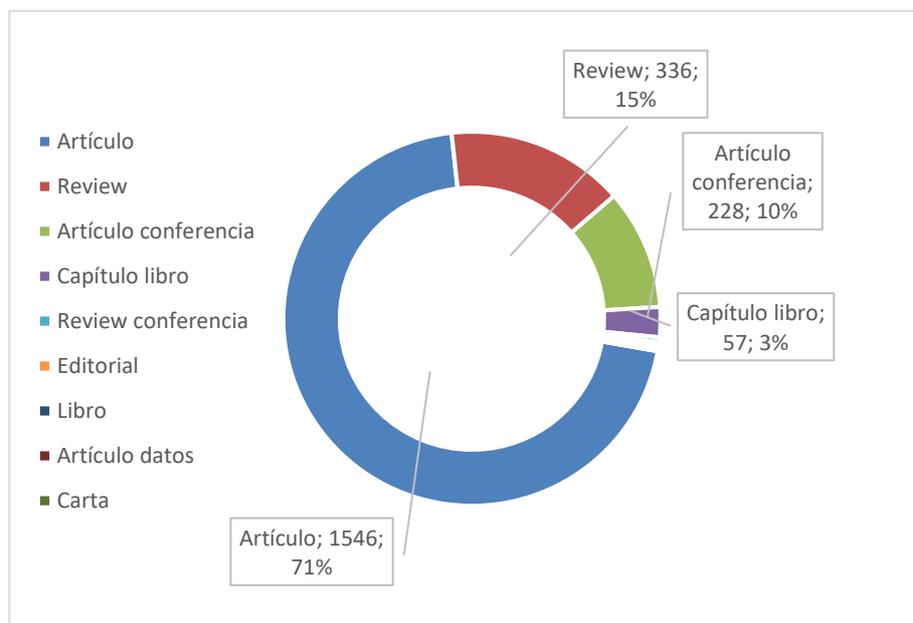


Figura 42. Tipos de documentos analizados. [30]

La localización geográfica de las publicaciones está estrechamente relacionada con dos parámetros de como son la afiliación del documento o de su autor o autores a una entidad pública o privada y el patrocinador de la financiación del estudio, investigación o ensayo llevado a cabo. Por lo que, previamente, a conocer el reparto geográfico de los documentos se muestran las Figura 43 y Figura 44 con los parámetros indicados.

Se puede extraer de la primera figura y análisis que los países asiáticos cuentan con más entidades en número que los países europeos o americanos pero el número de documentos afiliados desciende de forma reducida entre la Universidad Eléctrica del norte de China con 77 documentos y la Universidad del Rey Fahd del Petróleo y lo Minerales de Arabia Saudí con 28 documentos.

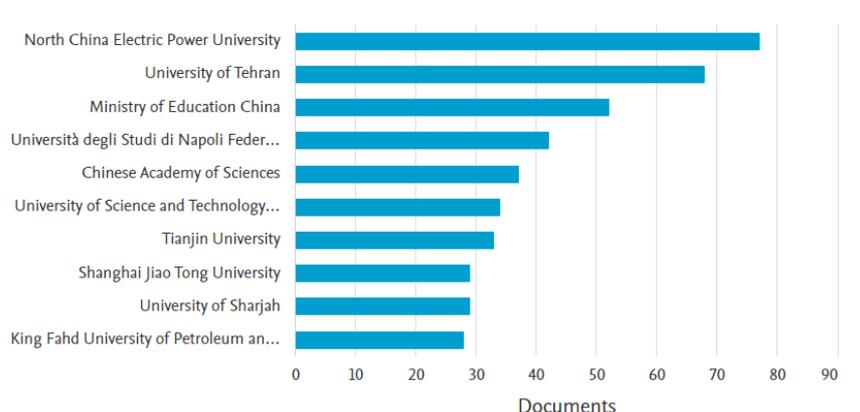


Figura 43. Entidades de afiliación de documentos. [30]

Sin embargo, en la figura que muestra la cantidad de documentos financiados por entidades, la primera entidad, destaca por encima de la segunda y la supera en más de 170 documentos. Se trata de la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China que ha financiado el desarrollo de 257 trabajos por los solo 84 documentos financiados por la Comisión Europea siendo la segunda entidad en la clasificación.

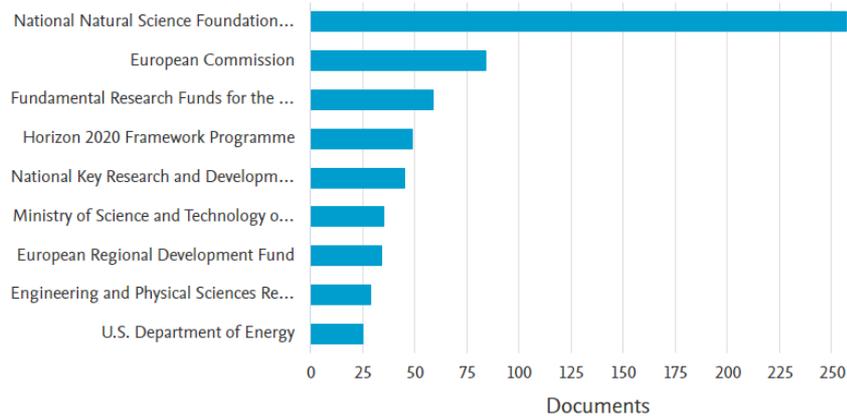


Figura 44. Entidades de financiación de estudios. [30]

Tras conocer un poco el reparto anterior, es de esperar que la localización geográfica se centre en el gigante asiático y en países orientales. El resultado se muestra en la Figura 45 y muestra de forma evidente como China encabeza la clasificación del número de publicaciones con casi el doble del segundo clasificado.

En el segundo escalón de publicaciones se encuentran India, Irán e Italia que cuentan con más de 200 publicaciones. Hay que destacar los países europeos que tienen cabida en esta clasificación, entre ellos, España, que debe dar un paso adelante en el aprovechamiento del recurso solar junto con el país vecino Portugal dado a la ubicación geográfica de la Península Ibérica.

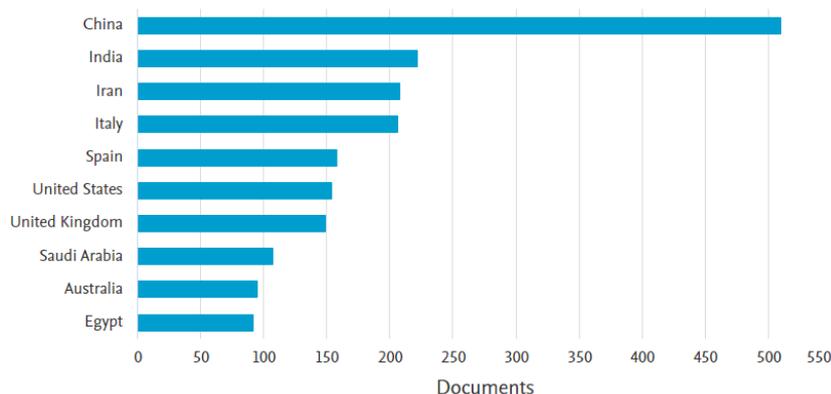


Figura 45. Países con mayor número de publicaciones. [30]

El análisis puede continuar comentando los autores con mayor participación en la investigación y publicación de resultados, como se ha comentado, estos son principalmente de origen asiático u oriental. También existe una correlación de revistas en función del número de publicaciones desde el 2012 para ver su evolución con el tiempo. Para acabar, se establece una clasificación según el área de estudio principal del documento como puede ser energía, ingeniería, materiales, economía, medioambiente... entre otros. Pero se ha decidido no ampliar este análisis ya que no se considera oportuno desviar el tema principal de este documento, el análisis de los sistemas de energía térmica y sus instalaciones hacía un análisis bibliométrico de las publicaciones realizadas sobre este tema.

Antes de finalizar el capítulo, se muestran los mapeos generados con VOSviewer en los que establece la relación de todos los documentos filtrados con las cadenas de búsqueda y sus palabras claves. De las Figura 46 y Figura 47 cabe destacar que la energía solar está muy relacionada y estudiada en conjunto con la energía solar térmica, la generación de energía térmica y las tecnologías de almacenamiento térmico para hacer frente a las horas de ausencia del recurso solar. Sin embargo, se ausentan campos importantes en el desarrollo de las políticas verdes en los que la sociedad se encuentra inmersa como son la integración de los sistemas de energía solar térmica y de almacenamiento en sistemas y procesos industriales. Por otro lado, se podría aumentar los estudios del impacto del uso de estas tecnologías en el uso de combustibles fósiles y recursos renovables para tener conocimiento de la evolución de esta disputa. Para finalizar, la relación de los estudios de sistemas SHIP y sus tecnologías adyacentes no tienen relación existente con las políticas y leyes establecidas por los diferentes países por lo que el desconocimiento de la sociedad en este ámbito es cada vez mayor.

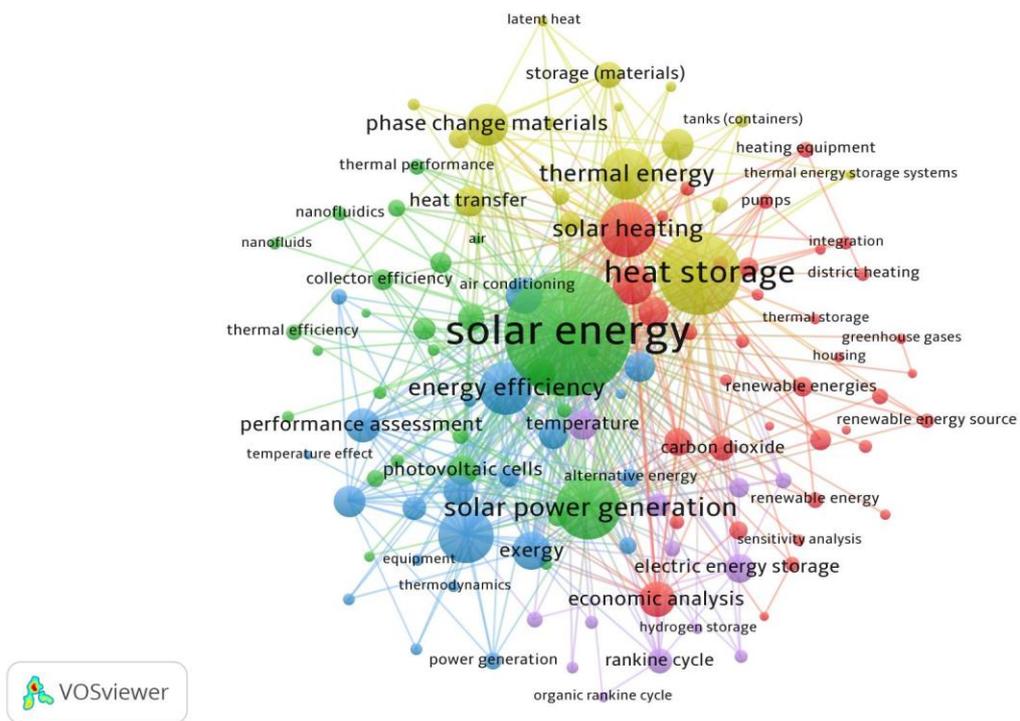


Figura 46. Mapa de concurrencia de palabras claves.

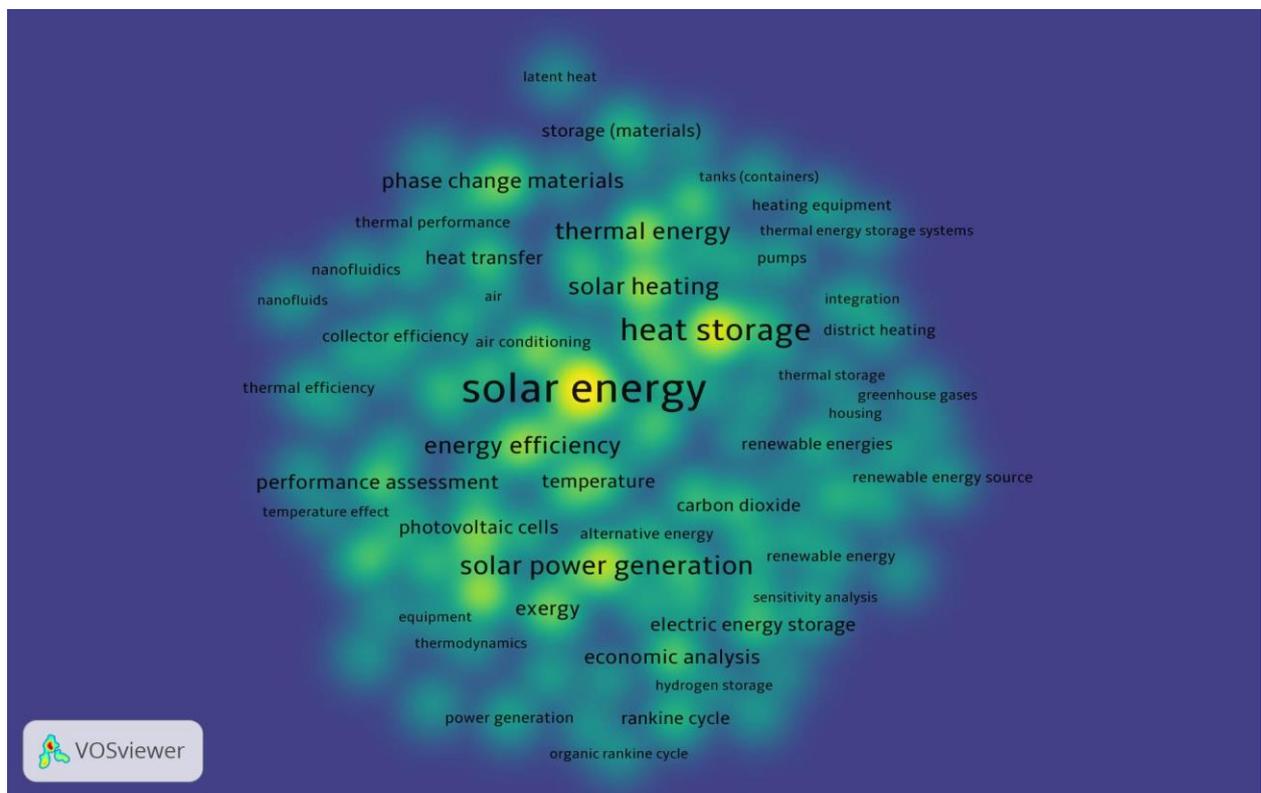


Figura 47. Mapa de color con frecuencia de concurrencia de palabras claves.

4 ANÁLISIS INSTALACIONES EXISTENTES

4.1 Introducción

Visitando la web dedicada a sistemas de energía solar a nivel mundial (<http://ship-plants.info/>) podemos comentar que hasta el año 2000 existían 27 instalaciones con una superficie de captadores solares instalados en torno a 11500 m², desde el 2001 hasta 2010 la superficie ronda los 60000 m² con un total de 102 instalaciones y desde 2011 hasta el año 2020 se registraron 259 instalaciones térmicas con una superficie superior a los 91000 m². En los dos últimos años la superficie instalada supera los 24000 m² repartida en 24 instalaciones. En resumen, esta web registra un total de 412 instalaciones térmicas con más de un millón de m² de superficie solar destinados a multitud de usos.

A continuación, serán descritas las mayores instalaciones solares térmicas de la actualidad y se realizará un análisis paramétrico con los datos obtenidos de la web para ampliar el desarrollo tecnológico que ha surgido esta tecnología a lo largo de los años.

4.2 Descripción de instalaciones existentes

Los procesos industriales en los que la energía solar térmica está presente y puede ser utilizada son muy diversos, como se ha desarrollado en el apartado 2. Estos sectores requieren temperaturas de operación muy dispares entre sí, pero la diversidad de captadores de la tecnología solar térmica, los diferentes tipos de fluidos caloportadores, la superficie del captador, la incorporación de almacenamiento puede proporcionar una solución para cada uno de los requerimientos de la infinidad de procesos existentes.

A continuación, se describen las principales instalaciones de energía térmica a nivel mundial. En esta carrera por la utilización de la energía solar térmica EEUU está a la cabeza en cuanto a plantas de gran capacidad, muy seguido de Marruecos o la India. En líneas generales, estas grandes instalaciones operan a alta temperatura para la generación eléctrica. Sin embargo, entre las principales plantas termosolares se encuentra la planta de Miraah en Omán, será la mayor planta termosolar cuando finalice su construcción completa, cuya finalidad mejorar la extracción de petróleo.

4.2.1 Ivanpah Solar

La mayor planta solar térmica de la actualidad está ubicada entre los estados de Nevada y California, en el desierto de Mojave en EEUU. Está compuesta por tres campos solares con una extensión de 13 km² y, a pleno rendimiento, tiene una capacidad de producción de 392 MWe brutos.

La tecnología utilizada es la de receptor central con tres torres idénticas de 139 m de altura y más de 300.000 heliostatos concéntricos con cada torre que concentran la radiación y permiten elevar la temperatura del agua en la torre para generar vapor y hacerlo pasar por la turbina para la generación de electricidad.

Las condiciones climáticas y el entorno favorecen a la instalación. Según estudio, existe radiación solar entre 330 y 350 días al año, además, su elevación y aire seco del entorno favorecen la operación. [31]

4.2.2 Miraah Oman

Esta planta está en camino de convertirse en la mayor del mundo. De momento, solo está en operación parte de los módulos que la componen, el resto sigue en construcción. Está localizada en Omán y desarrollada de forma conjunta entre Petroleum Development Oman (PDO) y Glasspoint para facilitar la operación de extracción de petróleo.

Tiene una potencia térmica de 330 MWt que reducirá el consumo de gas natural utilizado hasta el momento para la generación de vapor en el proceso de recuperación térmica mejorada de petróleo (EOR) que se describió en el apartado anterior.

El campo solar tiene una extensión de 622.080 m² con captadores solares cilindro-parabólicos propios de Glasspoint dispuestos en 12 bloques diferenciados. Entró en operación en el año 2017 y evita la emisión de 100.565 toneladas/año de CO₂. Como curiosidad, los bloques de captadores están protegidos por una especie de invernadero para salvar las inclemencias meteorológicas del desierto. [32]

4.2.3 Mojave Solar

Este proyecto también está situado en EEUU, de nuevo en el desierto de Mojave. Es una instalación destinada a la generación eléctrica solar con una capacidad de producción de 250 MWe netos.

El campo solar está formado por captadores solares de tecnología cilindro-parabólica dividido en dos grandes campos idénticos entre sí, denominados Alfa y Beta, que pueden operar independientes. El área de apertura del campo solar es de 1.559.347 m² con espejos desarrollados por Abengoa y fabricados por Rioglass. [31]

4.2.4 Estación de Generación Solana

De nuevo, una planta solar destinada a la generación eléctrica a partir de vapor y localizada en EEUU, actualmente, encabeza el mercado de la energía solar térmica. Cuando comenzó a operar en 2013 era considerada la mayor planta solar existente y la primera de EEUU con almacenamiento térmico.

Al igual que la anterior, fue desarrollada por Abengoa por lo que la tecnología desarrollada es idéntica. EL campo solar compuesto por captadores cilindro-parabólicos dispuestos en dos huertos solares independiente que ofrece una capacidad neta conjunta de 250 MWe.

Esta instalación cuenta con almacenamiento térmico por lo que puede seguir en funcionamiento en ausencia de la radiación solar. Cuenta con dos tanques con operación indirecta de sales fundidas que proporcionan una capacidad de almacenamiento de 6 horas. [31]

4.2.5 Proyecto de Energía Solar Génesis

Por último y para culminar las cinco plantas térmicas solares con mayor capacidad de la actualidad, encontramos el proyecto Génesis que al igual que los anteriores, convierte la energía térmica solar en energía eléctrica para su suministro.

La configuración es idéntica a la anterior, dos huertos solares independientes de captadores cilindro-parabólicos que concentran la radiación para elevar la temperatura del fluido caloportador, aceite térmico en este caso. Los huertos solares tienen una capacidad de 125 MWe cada uno y cuentan con un área de apertura de 1.928.320 m², entraron en operación en 2013 y 2014. [31]



Figura 48. Vista aérea del campo solar de Ivanpah. [33]



Figura 49. Módulos en operación de la planta de Miraah. [32]



Figura 50. Campo solar de Mojave Solar. [33]



Figura 51. Vista aérea Solana. [34]



Figura 52. Detalle de captadores en Proyecto Génesis. [33]

4.3 Base de datos de instalaciones solares térmicas

Este análisis se realizará con la ayuda de la web comentada en el apartado anterior. Se parte de la explicación de los diferentes parámetros disponibles para filtrar las 483 instalaciones registradas y se realizarán diferentes análisis paramétricos en función de los diferentes parámetros recogidos. Con ello, se intentará conocer algunos datos característicos y/o de interés en el desarrollo de la implantación de la energía solar térmica en los procesos industriales.

4.3.1 Parámetros de registro

Se describen todos los parámetros disponibles con los que cuentan las instalaciones registradas, aunque no todos estos están registrados.

1. Name: nombre identificativo de la instalación solar.
2. Country installed: país en el que se ubica la instalación solar.
3. Address: dirección o localidad de la instalación solar.
4. Industry sector: sector industrial en el que se utiliza la instalación solar. Los sectores industriales disponibles son:
 - a. Agricultura, silvicultura y pesca
 - b. Minería
 - c. Fabricación: dentro de este sector se diferencian numerosos subsectores como son la fabricación de motores o componentes, componentes eléctricos o electrónico, procesado y conservación de alimentos, tabaco, productos textiles, químicos, del papel... entre otros.
 - d. Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado
 - e. Suministro de agua; alcantarillado. Gestión de residuos
 - f. Construcción
 - g. Transportes y almacenamiento
 - h. Alojamiento y restauración
 - i. Información y comunicación
 - j. Actividades profesionales, científicas y técnicas
 - k. Educación

- l. Salud y trabajo social
- m. Otros servicios
5. Solar Thermal System owner/operator: propietario u operador de la instalación solar.
6. Solar thermal engineering company: empresa realizadora de la ingeniería de la instalación solar.
7. Process integration engineering company: empresa encargada de la integración en el proceso industrial.
8. Year of operation start: año de la puesta en marcha de la instalación solar.
9. Collector technology: tipo de captador solar. Los captadores solares de la base de datos son:
 - a. Captador solar plano
 - b. Captador sin cubierta
 - c. Captador de tubo de vacío
 - d. Captador de aire
 - e. Captador Fresnel
 - f. Captador cilindro-parabólico
 - g. Captador de discos parabólicos
 - h. Otro o varios captadores
10. Collector name: nombre específico de los modelos de captadores solares.
11. Installed collector area (gross): área bruta de captadores instalada en m^2 .
12. Installed collector area (aperture): área de apertura de captadores instalados en m^2 .
13. Installed collector area (absorber): área del absorbedor de los captadores instalados en m^2 .
14. Installed thermal power, kWth: potencia térmica instalada en kWth. Sin no está registrada, estiman su valor multiplicando el área bruta por $0,7 \text{ kWth}/m^2$.
15. Solar collector loop heat transfer fluid: fluido caloportador de trabajo en el circuito solar. Los fluidos de trabajo de la base de datos son:
 - a. Aceite térmico
 - b. Agua
 - c. Agua de mar
 - d. Agua-Aire
 - e. Agua-Glicol
 - f. Agua-Vapor
 - g. Aire
 - h. Vapor
16. Solar energy storage: tipo de almacenamiento de la instalación solar. Los sistemas de almacenamiento de la base de datos son:
 - a. Acumulación de vapor
 - b. Agua a corto plazo
 - c. Sin almacenamiento
 - d. Otros
17. Storage volumen: volumen de almacenamiento en m^3 .
18. Kind of conventional heat source: fuente de calor convencional en el proceso industrial. En la base de datos se recogen:

- a. Caldera agua caliente
 - b. Caldera de vapor
 - c. Planta CHP: combinación de generadores de calor y potencia.
 - d. Recuperación de calor
 - e. Otros: electricidad, bomba de calor...
 - f. Sin fuente convencional
19. Kind of fuel used: combustible utilizado en la l fuente de calor convencional. Se registran en la base de datos:
- a. Biomasa
 - b. Carbón
 - c. Electricidad
 - d. Fuel
 - e. Gas Natural
 - f. GLP (Gas licuado de petróleo)
 - g. Otros: vapor, queroseno, propano...
 - h. Sin combustible convencional
20. Solar thermal energy used for: uso para la energía solar térmica generada.
21. Unit operation: proceso unidad. En la base de datos se recogen los siguientes procesos unidad:
- a. Blanqueamiento
 - b. Calefacción de espacios
 - c. Calentamiento agua alimetnación
 - d. Cocción
 - e. Curtido
 - f. Esterilización
 - g. Evaporación
 - h. Evaporación y destilación
 - i. Extracción
 - j. Fundición
 - k. Limpieza
 - l. Pasteurización
 - m. Pintura
 - n. Procesos de calentamiento
 - o. Refrigeración
 - p. Secado
 - q. Tratamiento superficial
22. Point of Solar Heat Intgration: punto de integración del calor generador. Se diferencias varios puntos de integración mediante una nomenclatura utilizada por la web, esta nomenclatura se observa en la Figura 24 en la que se diferencia entre la integración a nivel de suministro, a nivel de proceso o en varios puntos.

23. Integration how and where: cómo y dónde se lleva a cabo la integración del sistema solar con el sistema convencional.
24. Temperature range process: rango de temperatura del proceso.
25. Temperature range solar loop: rango de temperatura del circuito solar.
26. Total investment costs, €: inversión total en Euros.
27. Solar loop, €: inversión en el circuito solar en Euros.
28. Solar energy storage, €: inversión en el almacenamiento térmico solar en Euros.
29. Others, €: otros gastos.
30. Process integration, €: inversión en el proceso de integración en Euros.
31. Subsidy, € o %: subvención obtenida en Euros, en porcentaje sobre coste total del proyecto o nombre del programa de subvencion.
32. Cost for fuel replaced, €/MWh fuel: coste del combustible reemplazado.
33. Calculated solar thermal system life time: ciclo de vida de la instalación solar en años.
34. Annual useful solar heat delivery, MWh/a: suministro anual de calor solar útil.
35. Specific annual useful solar heat delivery, MWh/año·m²: suministro de calor solar útil anual específico.
36. Specific investment costs, €/m²: costes de inversión específicos.
37. Solar fraction, %: fracción solar.
38. “Initiative”, “Integration methodology”, “Crucial interfaces”, “Construction /Commissioning”, “Operation/Performance”, “Recommendations”, “Author”, “Company of autor”, “E-mail”, “Phone” y “Homepage” son parámetros sobre las circunstancias que rodean la construcción de la instalación solar y su puesta en marcha. También aparecen parámetros acerca del autor del registro y su contacto.

4.3.2 Análisis paramétrico

En este apartado se realizan diferentes análisis paramétricos en función de la base de datos creada a partir de las plantas térmicas registradas en la web mencionada. Con estos análisis se pretende conocer e identificar los puntos sobre los que se ha desarrollado esta tecnología.

4.3.2.1 Año-Tipo de captador-Número de instalaciones

El primer análisis realizado relaciona el año de inicio de operación de la planta solar térmica con el tipo de captador solar utilizado para el proceso industrial en el que se ha integrado. Es necesario tener en cuenta que en la base de datos existen 483 plantas registradas, pero para este análisis se tienen en cuenta 456 plantas debido a la falta de datos del año de inicio de operación o del tipo de captador utilizado. El desarrollo en el tiempo puede verse en Tabla 5.

Se observa, de forma clara, como los captadores solares planos son los de mayor utilización en las instalaciones a nivel mundial, estando presente en un total de 223 plantas solares térmicas que representa el 49% del total de instalaciones incluidas en la base de datos. En el año 2018 se llevaron a cabo la puesta en marcha de 40 instalaciones siendo el año con mayor número de instalaciones de un solo tipo de captador, los años 2019 y 2021 son los siguientes con 18 y 15 instalaciones respectivamente.

Los captadores de tubos de vacío y cilindro-parabólico son las siguientes tecnologías más utilizadas con 88 y 63 instalaciones cada uno. Las instalaciones de tubos de vacío mantienen una media de instalación entre 5 y 6 plantas por año desde 2006. Por su parte, las instalaciones con tecnología cilindro-parabólico tienen un despuente entre los años 2014 y 2017, siendo este último el de mayor número de instalaciones con 14.

Tabla 5. Cronología de instalaciones según el tipo de captador solar.

Tipo Captador	1980	1987	1991	1993	1994	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Captador solar plano		1		5	3	2	1	3	3	3	5	5	4	4		4
Cilindro-Parabólico													2			
Colector de aire	1				1						2	1	2	1	2	1
Discos parabólicos																3
Fresnel																1
Plano sin cubierta																
Tubos de vacío			1					1	1				1			2
Varios										1						
Total general	1	1	1	5	4	2	1	4	4	6	6	7	8	6	1	12

Tipo Captador	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Total
Captador solar plano	7	7	10	9	5	13	12	7	11	12	11	40	18	1	15	2	223
Cilindro-Parabólico		2			3	3	7	10	11	3	14	3	4	1			63
Colector de aire	2			1		2	1				1	5	3		1		29
Discos parabólicos	1		1	4	2	2	1	1	1	3			2				21
Fresnel		2	1	1		4	2	1	3		3		4				22
Plano sin cubierta													1		1		2
Tubos de vacío	2	3	8	9	10	8	4	3	6		2	8	6	7	6		88
Varios								2	1			2	2				8
Total general	12	14	20	24	20	32	27	24	33	18	31	58	40	9	23	2	456

En la Figura 53 se observa de forma gráfica la evolución de las instalaciones solares agrupadas por lustros desde la primera planta registrada en 1987. También, se aprecia como a partir del 2005 las instalaciones de este tipo comienzan a crecer, centrado el grueso de instalaciones a partir del 2010 coincidiendo con las primeras medidas para ralentizar los efectos de los gases invernaderos y el cambio climático. Entorno al 2015, el desarrollo de las tecnologías solares térmicas junto con las políticas medioambientales, la fuerte apuesta por las energías renovables y su promoción y subvención tiene un impacto en la puesta en marcha de numerosas plantas térmicas.

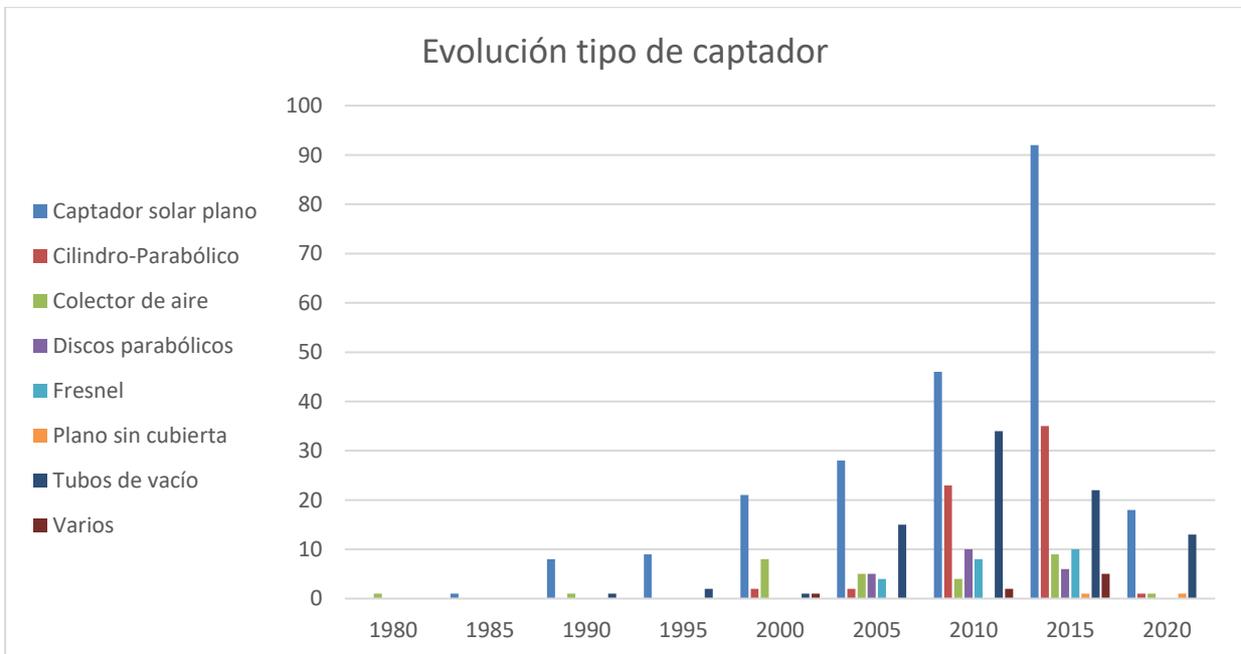


Figura 53. Cronología de instalaciones según el tipo de captador solar.

4.3.2.2 Año-Tipo de captador-Superficie bruta (m²)

En este segundo análisis se parte de la cronología de puesta en marcha de cada instalación registrada, el tipo de captador utilizado para el proceso operativo y la superficie bruta de la instalación en m². En la web, las instalaciones cuentan con tres atributos relacionados con el área de captación siendo estas: área bruta, área de apertura y área del absorbedor. La razón de analizar las instalaciones mediante la superficie bruta es debido a que es un parámetro registrado en todas las instalaciones salvo tres, por lo que este análisis incluye 480 plantas.

El resultado del análisis se recoge en la Tabla 6 mostrada en la parte inferior.

Tabla 6. Cronología del tipo de captador frente a la superficie bruta instalada (m²).

Tipo de captador	1980	1987	1991	1993	1994	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Captador solar plano		440		884	534	1.340	260	2.851	3.490	908	1.748
Cilindro-Parabólico											
Colector de aire	737				600					128	414
Discos parabólicos											
Fresnel											
Plano sin cubierta											
Tubos de vacío			216					25	9		
Varios										0	
Total general	737	440	216	884	1.134	1.340	260	2.876	3.499	1.036	2.162
Tipo de captador	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Captador solar plano	323	1.711	713		1.489	15.400	5.313	4.810	2.043	1.054	14.835
Cilindro-Parabólico		2.080					5.508			1.125	1.428
Colector de aire	350	864	1.010	860	803	160			10		710
Discos parabólicos					493	192		320	726	202	800
Fresnel					183		625	185	2.000		3.355
Plano sin cubierta											
Tubos de vacío		100			164	1	1.525	2.795	7.118	18.463	5.149
Varios											
Total general	673	4.755	1.723	860	3.132	15.753	12.971	8.110	11.897	20.844	26.278
Tipo de captador	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Total
Captador solar plano	44.908	3.578	29.630	15.491	1.068	38.283	22.328	534	17.014	140	233.119
Cilindro-Parabólico	2.711	5.177	5.117	4.838	637.178	1.022	2.856	6.000			675.040
Colector de aire	20				120	1.589	631		40		9.047
Discos parabólicos	480	186	540	2.340			1.392				7.671
Fresnel	722	678	1.634		1.988		636				12.006
Plano sin cubierta							335		70		405
Tubos de vacío	11.173	631	14.364		675	1.886	6.336	1.822	5.731		78.184
Varios		51.843	25			494	840				53.202
Total general	60.014	62.092	51.310	22.669	641.030	43.275	35.355	8.356	22.855	140	1.068.674

Examinando el análisis resalta, con mucha diferencia, la tecnología cilindro-parabólica en el año 2017 con una superficie bruta de 637.178 m² con la que casi triplica el total de la segunda tecnología con mayor superficie desde que comenzaron los registros. Esto se debe a que en el año 2017 se comenzó la construcción de la Planta de Miraah en Omán, la cual cuenta con una superficie de 630.000 m² repartidos en 36 módulos de captadores cilindro-parabólicos. Esto le otorga a la tecnología cilindro-parabólica el 60% de la superficie bruta instalada del total de todas las tecnologías y años registrados.

Analizando los resultados obtenidos sin tener en cuenta el impacto de la instalación de la Planta de Miraah se observa como el año como mayor superficie de instalación es el 2014. En este año se instalaron 62.000 m² de los que el 83%, 51.500 m², se corresponde con la puesta en marcha de la Planta Sundrop Farms en Australia y de la que no se conoce el tipo de captador utilizado. Los captadores más utilizados en este año a parte de los que no están registrados son el cilindro-parabólico con el 8% y el captador solar plano con, cerca del 6%, en superficie cuentan con 5.177 m² y 3.578 m², respectivamente.

El año 2013 es el tercer con mayor superficie bruta de instalación, muy próximo al 2014, con 60.000 m². En este año resalta la tecnología de captadores solares planos con una superficie de 44.900 m² que equivale al 75% de las instalaciones de ese año. Hay que destacar la puesta en marcha de la instalación de la empresa minera Codelco

Gabriela Mistral ubicada en Chile que cuenta con una superficie de 39.300 m² con los que hacen de su proceso productivo más sostenible y obtienen un ahorro en el consumo eléctrico. La siguiente tecnología con mayor superficie en el 2013 son los tubos de vacío con algo más de 11.100 m² o lo que es lo mismo, casi el 20% de las instalaciones puestas en marcha en dicho año.

Si centramos el análisis en el tipo captador empleado durante la cronología estudiada, vuelve a destacar la tecnología cilindro-parabólica por las razones descritas anteriormente, la instalación y puesta en marcha de la Planta de Miraah que constituye el 60% de la superficie puesta en marcha. El efecto de la puesta en marcha de esta planta se puede observar en las Figura 54 y Figura 55, donde en la segunda figura se ha omitido la superficie bruta de la instalación de la planta para comprobar de manera visual la evolución de las demás tecnologías donde los captadores solares planos y tubos de vacío toman mayor protagonismo, se comentará a continuación. En las figuras también se observa como durante la década de 2010 está el grueso de las instalaciones debido a los diferentes acontecimientos mencionados en el primer análisis.

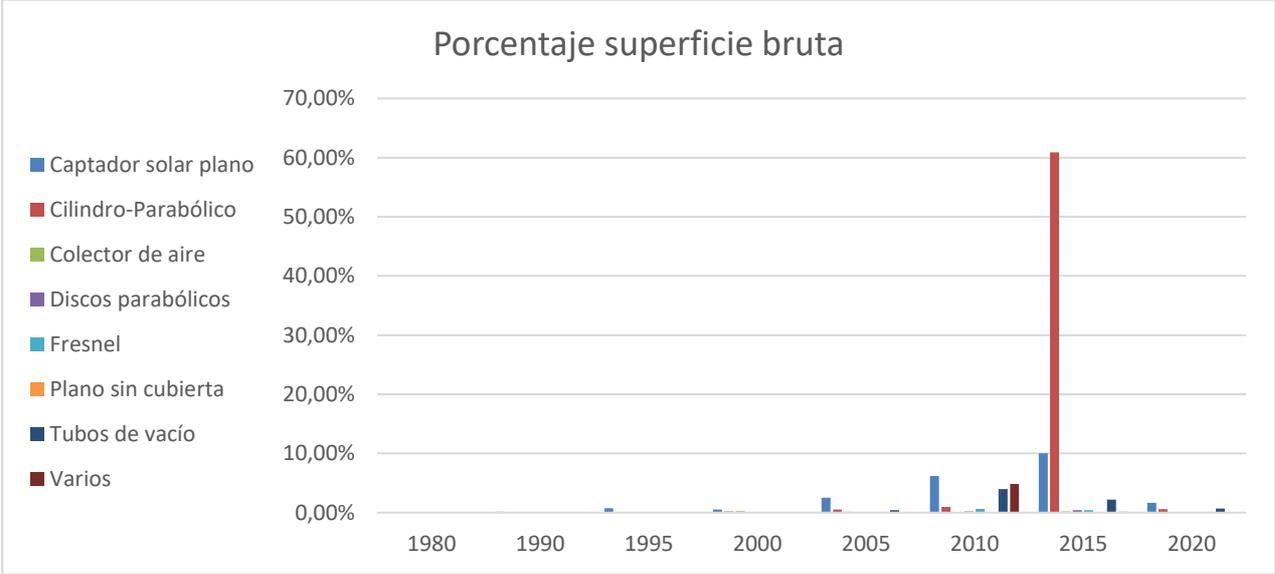


Figura 54. Porcentaje de uso de tecnologías de captación por lustros.

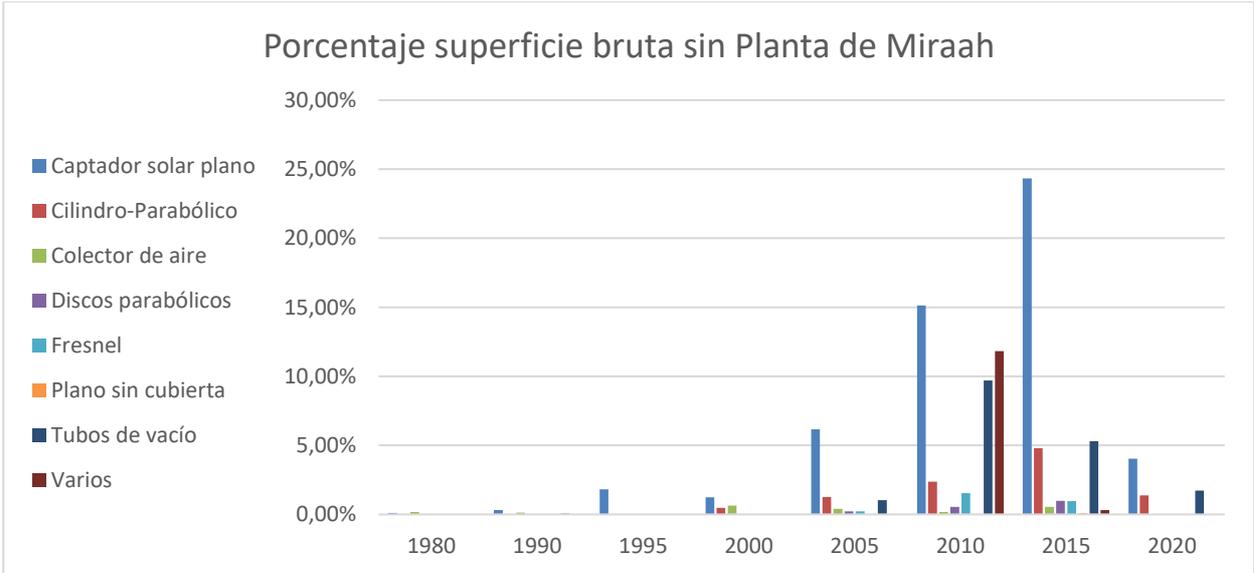


Figura 55. Porcentaje de uso de tecnologías de captación por lustros sin Planta de Miraah.

Siguiendo el análisis, nos encontramos con la tecnología de captación solar plana que agrupa al 22% del total de superficie bruta y que, desde el 2012, cuenta con años con bastantes m² de instalaciones como 2013, 2015 o 2018 con 30.000 m², respectivamente. Y, por último, los tubos de vacío son la tercera tecnología con mayor utilización en cuanto a superficie bruta se refiere con el 7%, muy lejos de las dos primeras. Esta tecnología ha tenido altibajos y no se comenzó a apostar por ella hasta el 2008 donde se instalaron, por primera vez, más de 1.000 m² y manteniendo una tendencia al alza hasta el 2011 donde alcanza su máximo con 18.400 m². Su uso baja en los siguientes años hasta el 2015 pero se mantiene en cifras entre 5.000 y 15.000 m². A partir de ahí y hasta la actualidad cuenta con instalaciones durante todos los años, pero con una superficie por debajo de los 6.000 m².

Si entrelazamos el primer análisis realizado con este se destaca como las tecnologías con mayor número de instalaciones en marcha son: captador solar plano, tubos de vacío y cilindro-parabólico con 223, 88 y 63, respectivamente. Y en relación con la superficie bruta de la instalación, las tecnologías de mayor uso se ordenan como: cilindro-parabólico, captador solar plano y tubos de vacío con el 63%, 22% y 7%, respectivamente. Esto nos deja la interpretación de que las medianas y pequeñas instalaciones en procesos industriales se realizan con las tecnologías solar plana y tubos de vacío dada su versatilidad y que en grandes industrias con grandes requerimientos energéticos se apuesta por la tecnología cilindro-parabólica.

4.3.2.3 Año-Tipo de captador-Potencia térmica (kW_t)

Este tercer análisis enlaza con lo comentado en el último párrafo del anterior. En él se describe la relación existente entre el año de puesta en marcha de la instalación, la tecnología de captación utilizada y la potencia térmica en kW_t de cada una de las instalaciones y su suma total. La potencia térmica es un dato disponible para todas las instalaciones registradas ya que de forma automática y por defecto, las instalaciones que no cuenten con este dato se le proporciona multiplicando el área bruta de la instalación por un factor de rendimiento de 0,7 kW_t/m² obteniendo así la potencia térmica de la instalación.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Cronología del tipo de captador frente a la potencia térmica instalada.

Tipo Captador	1980	1987	1991	1993	1994	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Captador solar plano		308,00		618,80	373,80	937,80	182,00	1.995,70	2.443,00	635,60	1.223,60
Cilindro-Parabólico											
Colector de aire	515,90				420,00					89,74	289,80
Discos parabólicos											
Fresnel											
Plano sin cubierta											
Tubos de vacío			151,20					17,50	6,30		
Varios										0,00	
Total general	515,90	308,00	151,20	618,80	793,80	937,80	182,00	2.013,20	2.449,30	725,34	1.513,40
Tipo Captador	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Captador solar plano	225,78	1.197,56	498,30		1.042,30	10.678,32	3.718,30	3.366,20	1.429,70	737,40	10.388,35
Cilindro-Parabólico		1.456,00					3.767,60			613,00	506,00
Colector de aire	245,28	604,80	707,00	602,00	562,10	112,00			7,00		497,00
Discos parabólicos					345,10	134,40		224,00	507,20	141,40	560,00
Fresnel					74,00		247,50	74,00	790,00		1.814,00
Plano sin cubierta											
Tubos de vacío		70,00			114,00	0,70	1.067,50	1.955,30	4.940,68	12.924,10	2.782,64
Varios											
Total general	471,06	3.328,36	1.205,30	602,00	2.137,50	10.925,42	8.800,90	5.619,50	7.674,58	14.415,90	16.547,99
Tipo Captador	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Total
Captador solar plano	31.435,60	2.484,90	19.674,50	10.966,20	740,26	26.800,83	15.629,25	380,00	11.909,80	98,00	162.119,85
Cilindro-Parabólico	1.650,10	1.646,89	993,00	1.136,99	301.304,02	632,48	1.370,00	3.000,00			318.076,08
Colector de aire	14,07				84,00	1.112,42	442,04		28,00		6.333,15
Discos parabólicos	336,00	130,20	378,00	1.638,00			974,40				5.368,70
Fresnel	302,80	272,00	754,30		780,60		445,34				5.554,54
Plano sin cubierta							234,50		49,00		283,50
Tubos de vacío	7.821,10	399,80	9.886,30		509,00	1.320,34	4.435,48	1.753,25	4.001,42		54.156,61
Varios		36.836,60	17,50			307,80	588,00				37.749,90
Total general	41.559,67	41.770,39	31.703,60	13.741,19	303.417,88	30.173,87	24.119,01	5.133,25	15.988,22	98,00	589.642,33

Se puede observar como desde los inicios los captadores solares planos eran la única tecnología más desarrollada y, por tanto, la tecnología más utilizada en las instalaciones térmicas. Es en 2006 cuando otras tecnologías entran en escena y la distribución de la potencia instalada amplía el abanico de tecnologías de captación. El grueso de las instalaciones se lleva a cabo a partir del 2010 y tiene su máximo en 2017 debido al fenómeno explicado anteriormente de la puesta en marcha de la Planta de Miraah y es el de mayor potencia térmica instalada, pero es un dato engañoso. Este dato de potencia proporcionado por la Planta de Miraah eleva al 2017 por encima de cualquier año, pero si se omitiera el dato, observamos como el año 2017 sería el año con menor potencia instalada desde 2006 con un total de 2.100 kW_t. Pero la realidad es otra y la Planta de Miraah con tecnología cilindro-parabólica en el año 2017 tiene la mayor potencia térmica instalada con el 51% del total registrado.

Los años 2013 y 2014 son los siguientes con mayor potencia térmica instalada, ambos cuenta con una potencia instalada superior a los 41.500 kW_t, pero repartidos de diferente forma entre las tecnologías de captación. En el 2013 destacan los captadores solares planos con 31.400 kW_t de los cuales, la empresa minera Codelco Gabriela Mistral es la principal aportadora con 27.500 kW_t junto con numerosas instalaciones de menor potencia. Por su parte, el 2014 destaca la planta australiana dedicada a la agricultura con 36.600 kW_t.

De manera general, con el paso de los años la directriz es creciente tanto en potencia instalada como en la variedad de tecnologías utilizada para la captación. Se puede afirmar que los captadores solares plano se utilizan desde las primeras instalaciones, que, en 2006, se consigue afianzar las diferentes tecnologías de captación y se ponen en marchas plantas con captadores de aire, discos parabólicos, captadores Fresnel o tubos de vacío. En 2016 la tendencia creciente tiene un parón, pero vuelve a crecer en 2017. Y en este análisis se puede observar los efectos de la pandemia del Covid-19 en los últimos años y como en 2020 y 2021 la potencia instalada es menor de lo esperado al igual que la apuesta por otras tecnologías como se hizo en 2019 en el que todas las tecnologías de captación están en uso.

Para finalizar el análisis se ha graficado en las Figura 56 y Figura 57 la evolución de la potencia térmica instalada de todas las instalaciones registradas y omitiendo el registro de la Planta de Miraah para poder observar con más detalle el desarrollo de las demás tecnologías.

En las figuras se observa, claramente, como la potenciación de uso de tecnologías renovables y las políticas para hacer frente al cambio climático comenzaron entorno al año 2010 y el efecto de la pandemia en la que está inmersa la sociedad en la actualidad y de la que, parece, comenzamos a dejar atrás.

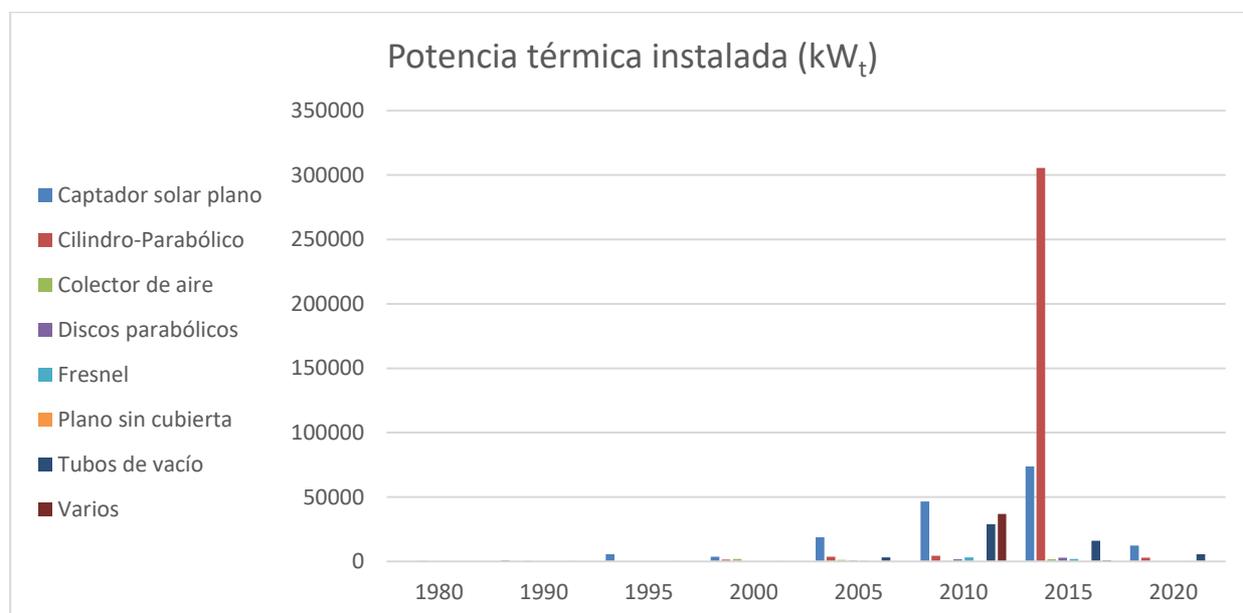


Figura 56. Cronología de la potencia térmica instalada por lustrós.

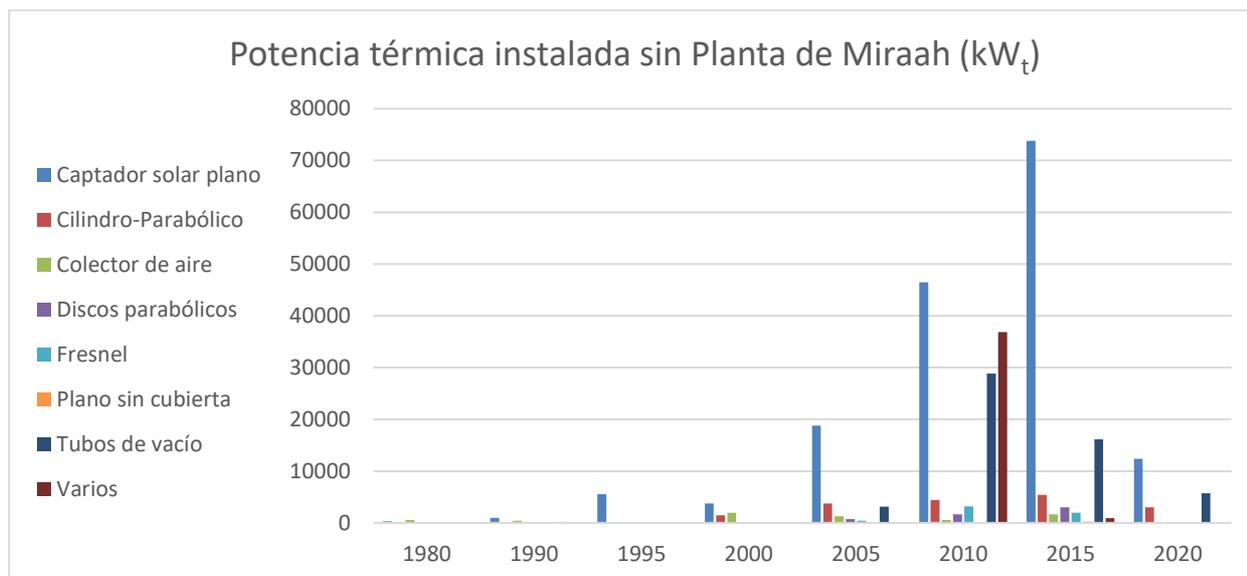


Figura 57. Cronología de la potencia térmica instalada por lustros sin Planta de Miraah.

4.3.2.4 Tipo de captador-Sector industrial/Proceso térmico-Potencia térmica (kW_t)

Este análisis se centra en los sectores industriales en los que está presente la energía térmica y que han realizado la integración de sistemas de producción de energía térmica en el proceso productivo de cada sector y para qué tipo de proceso unidad ha sido utilizada la energía térmica. El análisis se divide en dos, un primer análisis que tiene en cuenta el tipo de captador solar utilizado, el sector industrial en el que está presente y la potencia térmica instalada en cada sector por tipo de captador. Y un segundo análisis en el que se intercambia el sector industrial por el proceso unidad para el que se utiliza la energía térmica generada.

En la Tabla 8 se recogen los datos obtenidos de la primera parte del análisis. En ella observamos los diferentes sectores industriales registrados que se comentaron en el apartado anterior con la potencia térmica de cada tecnología y su total en la parte derecha. En la última columna se ha aplicado un formato condicional para facilitar la visualización de los datos, erigiéndose como sector con mayor potencia térmica instalado el sector minero ya que cuenta con la Planta de Miraah y la instalación de la empresa minera Codelco Gabriela Mistral. En total el sector minero cuenta con 18 instalaciones registradas por lo se puede afirmar que las instalaciones para este sector y su uso en el proceso requiere de una elevada cantidad de energía y, por ello, es el principal sector en cuanto a potencia.

El siguiente sector con mayor potencia instalada en el mundo es el sector de la agricultura, silvicultura y pesca que cuenta con la instalación australiana de Sundrop Farms la tercera instalación de mayor tamaño registrada entre otras muchas ya que se tienen registros de 40 instalaciones diferentes en este sector. Para cerrar los tres mayores sectores en cuanto a potencia, nos encontramos con el sector de la fabricación de alimentos en el que no destaca ninguna instalación en especial debido a que el requerimiento energético en esta industria es menor debido al proceso productivo. En total cuenta con 59 instalaciones diferentes que lo elevan a este tercer puesto y que sea el sector con más número de instalaciones registradas.

En cuanto al número de instalaciones por sector queda por destacar que en el segundo escalón tras la fabricación de alimentos se encuentran el sector agrícola y pesquero, la fabricación de bebidas, la fabricación de lácteos y otros servicios con unas 40 instalaciones cada uno. En un tercer escalón encontramos sectores como la minería, el procesado de productos cárnicos y la fabricación de sustancias y productos químicos con unas 20 instalaciones cada uno. La potencia instalada en los sectores mencionados son muy dispares debido que el requerimiento de calor es muy diferente en cada proceso de producción.

Para finalizar esta primera parte del análisis es necesario comentar el tipo de captador presente en los sectores industriales. El captador solar plano está presente en, prácticamente, la totalidad de sectores y, por ello, su uso es el más extendido. Los captadores de tubos de vacío siguen una tendencia semejante al captador solar plano, aunque se encuentra ausente en los sectores relacionados con la fabricación de diferentes productos alimentarios. La tecnología cilindro-parabólica aglutina diferentes sectores, pero con instalaciones dispares en cuanto a la

potencia térmica instalada. Y los captadores de aire, discos parabólicos o Fresnel se encuentran presentes en los sectores en los que el requerimiento energético no es muy elevado.

Tabla 8. Potencia térmica instalada por sector industrial y tipo de captador.

Tipo Captador	Captador solar plano	Cilindro-Parabólico	Colector de aire	Discos parabólicos	Fresnel	Plano sin cubierta	Tubos de vacío	Varios	Total general
A-Agricultura, silvicultura y pesca	16.499	256	1.853				286	36.600	55.494
B-Minería	39.076	300.000			123		2.453		341.651
C10.1-Procesado y preservación productos cárnicos	1.826	130			1.625		601		4.183
C10.2-Procesado y conservación pescados	31								31
C10.3-Procesado y preservación de frutas y vegetales	11.835	339		65			473		12.711
C10.4-Fabricación de aceites y grasas vegetales				29					29
C10.5-Fabricación lácteos	4.904	2.237		1.400	554		183	237	9.514
C10.6-Fabricación productos de molindas y almidón	88								88
C10.7-Fabricación de pan y dulces	71								71
C10.8-Fabricación otros productos alimentarios	287								287
C10.9-Fabricación de alimentos animales	227	722	52		113				1.113
C10-Fabricación de alimentos	33.751	7.054	2.936	175			828	0	44.744
C11-Fabricación de bebidas	17.195	370	51		50		2.610	2.450	22.725
C12-Fabricación de tabaco			516		705		38		1.259
C13-Fabricación textil	10.694	234	336	672	324		19.240		31.500
C14-Confección prendas vestir	660						494	1.225	2.379
C15-Fabricación de cueros y pieles	4.407						3.249		7.655
C16-Fabricación productos de madera y corcho					105				105
C17-Fabricación pulpa y papel	2.940	800		112					3.852
C20-Fabricación de sustancias y productos químicos	694	2.050	14	399	74	284	3.800		7.314
C21-Fabricación productos farmacéuticos	2.754	1.362		508	222		286		5.131
C22-Fabricación productos de cauchos o plásticos			56				32	130	218
C23-Fabricación productos minerales no metálicos	1.271								1.271
C24-Fabricación metales	599						719		1.318
C25-Fabricación productos metálicos	44	334			272		570		1.220
C26-Fabricación componentes electrónicos		40							40
C27-Fabricación equipamiento eléctrico	17	104		224			3.399		3.744
C28-Fabricación de maquinaria y equipos	640				74		1.617		2.331
C29-Fabricación de motores	3.103			1.099	66		140		4.408
C30-Fabricación equipamiento transportes	18						360		378
C31-Fabricación de muebles	62								62
C32-Otros productos manufacturados	361				49		38		447
C33-Reparación e instalación de maquinaria							30		30
C-Fabrilación	4.875	952					10.665	588	17.079
D-Suministro de electricidad, gas, vapor o aire acondicionado	1.146						28		1.174
E-Suministro de agua; alcantarillado; gestión de residuos	306	578	520		175				1.579
F-Construcción	133				790		146		1.069
H-Transporte y almacenamiento							389		389
I-Alojamiento y restauración	234			382					616
J-Información y comunicación				134	272		352		759
M-Actividades científicas, técnicas y profesionales	446	527			173		21		1.167
P-Educación					198			178	376
Q-Salud y trabajo social	178	35					671		884
S-Otros servicios	2.505	126		168	1.300		1.648	18	5.764
Total general	163.871	318.249	6.333	5.369	7.263	284	55.365	41.425	598.157

La segunda parte del análisis se centra en el proceso térmico en el que es utilizada la energía generada con el sistema de captación solar. Los resultados se encuentran recogidos en la Tabla 9. Es obvio que el proceso de extracción de mineral u otro producto como petróleo o gas es el de mayor potencia térmica. Seguidamente, pero con la mitad de potencia térmica instalada, se encuentra el proceso de calentamiento, utilizado en infinidad de instalaciones de cualquier sector para diferentes fines como pueden ser el acondicionamiento del producto, del medio o del fluido de trabajo, la preparación de tanques o depósitos entre otros. Para finalizar, la calefacción de espacios es el tercer proceso con mayor potencia térmica instalada de las que se tiene registro. Comentar que los procesos de limpieza y secado son los siguientes en la clasificación con una potencia térmica muy pareja. A partir de estos procesos, la potencia térmica de los procesos restantes disminuye su a valores por debajo de 11.000 kW.

Tabla 9. Potencia térmica instalada por proceso térmico y tipo de captador.

Proceso térmico	Captador solar plano	Cilindro-Parabólico	Colector de aire	Discos parabólicos	Fresnel	Plano sin cubierta	Tubos de vacío	Varios	Total general
Blanqueamiento	10.414						657		11.071
Calefacción espacios	43.834	36					752		44.622
Calentamiento agua alimentaci	8.897	1.616		195			642	178	11.528
Cocción	1.464	533		175	31				2.203
Curtido	894						3.249		4.143
Esterilización	31	330					277		637
Evaporación	3.513								3.513
Evaporación y destilación	27	1.761							1.789
Extracción	1.456	300.000					6		301.462
Fundición							96		96
Limpieza	15.225	301		1.575	1.300	284	4.378	18	23.080
Limpieza y agua alimentación								0	0
Pasteurización	1.210	1.074		365			473		3.122
Pintura	33		14		66		7.104		7.217
Procesos calentamiento	61.534	10.353	1.890	2.659	3.828		35.508	38.360	154.133
Refrigeración	2.075	693			1.863		172		4.802
Secado	12.077	1.439	4.429	399	175		1.299	2.870	22.687
Tratamiento superficial	1.157	112					753		2.022
Total general	163.871	318.249	6.333	5.369	7.263	284	55.365	41.425	598.125

4.3.2.5 Temperatura operación (°C)-Proceso térmico-Volumen almacenamiento (m³)

En este análisis se apartan las tecnologías de captación para centrarse en la temperatura de operación de los diferentes procesos térmicos y su volumen de almacenamiento. Este análisis cuenta con 237 instalaciones debido a que la temperatura de operación es un parámetro que el resto de instalaciones no tiene registrado. La temperatura de operación se ha dividido en rangos con 30 °C de temperatura desde los 0° hasta los 270 °C.

En un primer análisis para conocer el volumen de almacenamiento se observa en la Tabla 10 como el proceso con mayor volumen de almacenaje es el calentamiento del agua de alimentación de calderas y equipos con el 40% del total y un volumen superior a 5.200 m³. Este es un proceso crucial para el rendimiento del proceso productivo completo ya que tiene un impacto directo sobre la cantidad de combustible consumido para alcanzar la temperatura y la energía térmica necesaria para la operación.

En segundo lugar, el secado, proceso continuo que no puede detenerse salvo incidencia operativa o mantenimiento programado y está presente en numerosos sectores alimentarios y agrícolas, cuenta con el 24% del almacenamiento total y una cifra superior a los 3.100 m³. Por último, la limpieza cuenta con un 12% del total con 1.600 m³, este proceso es muy amplio y engloba desde la limpieza de alimentos o preparación de espacios para el trabajo hasta la limpieza de equipamiento electrónico.

La segunda parte de este análisis se centra en los tipos de almacenamiento existentes y el número que hay de cada uno de ellos. Para ello, la Tabla 11 muestra los diferentes tipos de almacenamiento según los rangos de temperaturas de operación. Hay instalaciones que en su registro afirman que no tienen almacenamiento por ello el tipo "Sin almacenamiento" y están incluidas 65 instalaciones de las que no se tienen datos de almacenamiento clasificadas como "- "pero si cuentan con datos de temperaturas de operación y por ello se añaden en el análisis.

Hay que destacar que el 60% del almacenamiento térmico se realiza con agua a corto plazo y que los procesos con mayores instalaciones para almacenar energía operan a una temperatura de entre 60-90 °C y están desglosados en la Tabla 11, estos representan el 40% si restamos el 9% de las instalaciones que no tienen registro de datos de almacenaje. Los siguientes rangos de temperatura son entre 90-120 °C y entre 30-60 °C con 20% y 5%, respectivamente. Es necesario resaltar que tan solo 18 instalaciones cuenta con el registro de que no tienen sistema de almacenamiento y sería necesario saber si los que no tienen datos son instalaciones sin almacenamiento o con falta de datos en su registro en la web.

Tabla 10. Volumen de almacenamiento según temperatura de operación y proceso térmico.

Proceso térmico	0-29	30-59	60-89	90-119	120-149	150-179	180-209	210-239	240-269	Total general
Blanqueamiento			953	18						971
Calefacción espacios			80							80
Calentamiento agua alimentación		500	144,4	4597,4						5241,8
Cocción			19,5	21,75		0,15			0	41,4
Curtido			315							315
Esterilización			2			0				2
Evaporación y destilación				18,4						18,4
Extracción		100								100
Fundición				90						90
Limpieza	4	93	1434,3	47,35	20					1598,65
Pasteurización			70	40,45	0					110,45
Pintura								0		0
Procesos calentamiento	75	116	337,5	513,65	115	22	16			1195,15
Refrigeración	40	42	68	1			16			167
Secado	80	44	31	3001	0	0	0			3156
Tratamiento superficial		15	24,5	0		0				39,5
Total general	199	910	3479,2	8349	135	22,15	32	0	0	13126,35

Tabla 11. Número de instalaciones y porcentaje según tipo de almacenamiento térmico.

Tipo de almacenamiento	0-29	30-59	60-89	90-119	120-149	150-179	180-209	210-239	240-269	Total general
-	4	9	22	18	8	1	2	1		65
Acumulación vapor				1		2	1			4
Agua corto plazo		7	91	41	2		1			142
Otros	3	2		1		1	1			8
Sin almacenamiento		2	4	4	3	2	2		1	18
Total general	7	20	117	65	13	6	7	1	1	237
Tipo de almacenamiento	0-29	30-59	60-89	90-119	120-149	150-179	180-209	210-239	240-269	Total general
-	1,69%	3,80%	9,28%	7,59%	3,38%	0,42%	0,84%	0,42%	0,00%	27,43%
Acumulación vapor	0,00%	0,00%	0,00%	0,42%	0,00%	0,84%	0,42%	0,00%	0,00%	1,69%
Agua corto plazo	0,00%	2,95%	38,40%	17,30%	0,84%	0,00%	0,42%	0,00%	0,00%	59,92%
Otros	1,27%	0,84%	0,00%	0,42%	0,00%	0,42%	0,42%	0,00%	0,00%	3,38%
Sin almacenamiento	0,00%	0,84%	1,69%	1,69%	1,27%	0,84%	0,84%	0,00%	0,42%	7,59%
Total general	2,95%	8,44%	49,37%	27,43%	5,49%	2,53%	2,95%	0,42%	0,42%	100,00%

4.3.2.6 Sector industrial-Punto de integración-Número instalaciones

En este análisis están incluidas las 483 instalaciones de la que consta la base de datos debido a que el punto de integración del proceso industrial térmico es un dato existente para todas las instalaciones. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 12.

Comenzando el análisis por los diferentes sectores, es obvio que el sector fabricación que agrupa a toda la industria manufacturera y alimentaria sea con 338 instalaciones el mayor sector en cuanto a número de instalaciones térmicas, las cuales representan el 70% del total registrado. El sector agrícola y pesquero y otros servicios son los siguientes con tan solo 40 instalaciones cada uno, sumando un 8% cada sector. La minería cuenta con 18 instalaciones, pero de gran capacidad térmica como se comentó en análisis anteriores. En el lado contrario, es decir, los sectores con menos instalaciones térmicas, encontramos la educación con tan solo 2 instalaciones registradas y también, el sector de la información y comunicación y el sector transporte que cuentan con 3 instalaciones cada uno.

En cuanto al punto de integración, como se describió en el capítulo 3. Integración de energía solar en procesos industriales, existen dos niveles de integración con diferentes puntos para ello. En la base de datos se han tenido en cuenta los mencionados en el apartado anterior de este capítulo.

Destaca como el apartado de "Otros" puntos de integración es el de mayor número de instalaciones con aproximadamente el 30% del total, este apartado engloba a instalaciones sin datos del punto de integración ya que se ha buscado información sobre varias plantas y no existen datos sobre el proceso de integración e instalaciones con puntos de integración que difieren de los mostrados.

El 20% de las instalaciones integran la energía térmica para aumentar la temperatura del agua de reposición o el agua de alimentación de calderas y equipos, coincidiendo que es el proceso térmico que cuenta más número de instalaciones. Por último, con un 13%, el calentamiento del proceso productivo o del medio en el que se realizará el proceso es el encargado de cerrar los tres primeros escalones. Muy seguidos, con el 10 % cada uno se encuentran los otros puntos de integración salvo el calentamiento de las líneas de retornos y el calentamiento de la instalación de almacenaje que apenas cuentan con un 2% y 3%, respectivamente.

4.3.2.7 Temperatura operación (°C)-Fluido caloportador-Número instalaciones

El último análisis establece la relación entre la temperatura de operación dividida en rangos iguales que anteriores análisis y el fluido caloportador utilizado en la instalación.

En la base de datos se tiene en cuenta los siguientes fluidos caloportadores: aceite térmico, agua, aire, glicol o vapor o alguna combinación entre ellas. Como muestran los resultados de la Tabla 13, el agua se utiliza en 136 instalaciones como único fluido caloportador y hay que añadirle las instalaciones en las que aparece combinada con glicol, 42 instalaciones; y con aire y con vapor, una por cada combinación. En total, el agua está presente en 180 instalaciones o lo que es lo mismo en el 76% de ellas. Cabe destacar que se utiliza en proceso de baja o media temperatura, no superior a los 150 °C.

Para procesos térmicos de media-alta temperatura se utilizan como fluidos caloportadores el aceite térmico, aire o el vapor cuyas propiedades permiten que no se deterioren o evaporen con la facilidad del agua a esas temperaturas. En el rango de temperaturas superior a los 150 °C se encuentran 12 instalaciones de aceite térmico, 9 de aire y 3 de vapor, en conjunto representan el 10% del total.

Tabla 12. Número de instalaciones según punto de integración.

Sector industrial	A1-Calentamiento agua reposición	A2a-Calentamiento línea retorno	A2b-Calentamiento línea suministro	A3-Calentamiento almacenamiento	B1-Calentamiento proceso o equipo
A-Agricultura, silvicultura y pesca	3		7	6	1
B-Minería	4		1		4
C-Fabricación	79	6	38	31	47
D-Suministro de electricidad, gas, vapor o aire acondicionado	1	2			2
E-Suministro de agua; alcantarillado; gestión de residuos y actividades de saneamiento			2		2
F-Construcción				1	1
H-Transporte y almacenamiento					
I-Alojamiento y restauración			1		
J-Información y comunicación					1
M-Actividades científicas, técnicas y profesionales	2			1	2
P-Educación	1				1
Q-Salud y trabajo social	1		1	4	1
S-Otros servicios	2		2	1	2
Total general	93	8	52	44	64

Sector industrial	B2-Calentamiento del medio de proceso	B3-Calentamiento almacenamiento proceso	C-Otros	Varios	Total general
A-Agricultura, silvicultura y pesca	9	2	12		40
B-Minería	3	2	1	3	18
C-Fabricación	30	9	88	10	338
D-Suministro de electricidad, gas, vapor o aire acondicionado			1		6
E-Suministro de agua; alcantarillado; gestión de residuos y actividades de saneamiento	1		2		7
F-Construcción	1	1			4
H-Transporte y almacenamiento	1		1	1	3
I-Alojamiento y restauración		1	3		5
J-Información y comunicación	1		1		3
M-Actividades científicas, técnicas y profesionales	1	1	1	1	9
P-Educación					2
Q-Salud y trabajo social				1	8
S-Otros servicios	3	1	29		40
Total general	50	17	139	16	483

Tabla 13. Número de instalaciones según fluido caloportador y temperatura de operación.

Fluido caloportador	0-29	30-59	60-89	90-119	120-149	150-179	180-209	210-239	240-269	Total general
-	1	3	14	8	6	1				33
Aceite térmico				4	2	2	3		1	12
Agua	5	8	77	39	2	2	2	1		136
Agua-Aire			1							1
Agua-Glicol	1	3	24	13	1					42
Agua-Vapor					1					1
Aire		6	1	1	1					9
Vapor						1	2			3
Total general	7	20	117	65	13	6	7	1	1	237

5 CONCLUSIONES Y RESUMEN

Se procede a extraer las conclusiones obtenidas, comentar el impacto de la energía solar térmica en los procesos industriales, caracterizar los diferentes procesos térmicos y establecer que tienen en común entre ellos.

Del primer análisis que relacionan los tipos de captadores solares con el año de la puesta en marcha de la instalación térmica se extrae como principal conclusión que los captadores solares planos son los más utilizados a lo largo de historia con 223 instalaciones industriales de las 456 registradas y el 49% del total de instalaciones, y que el comienzo de su uso se establece en 1987 en la fábrica de alimentos portuguesa Knorr Best Foods. La utilización de esta tecnología tiene un auge a partir de 2007, desde entonces, 180 plantas industriales utilizan captadores solares planos. Las otras dos tecnologías de captación con mayor uso son los captadores de tubos de vacío y cilindro-parabólico con 88 y 63 instalaciones, respectivamente. A destacar de los captadores de tubos de vacío que la instalación se mantiene constante desde 2007 en torno a 6 plantas por año de media. Por su parte, la tecnología cilindro-parabólica es más reciente y no se proyectan plantas con este tipo de captador solar hasta 2011, a partir de entonces cuenta con 59 instalaciones de las 63 registradas.

Tras conocer el número de instalaciones por tecnología de captación se procede a estudiar la superficie bruta de cada tipo de captador para tener una noción de la extensión de los captadores. A pesar de que sería lógico pensar que el captador solar con mayor número de instalaciones será el captador con mayor superficie bruta destinada a la captación, se produce un hecho que elimina el pensamiento descrito. La tecnología de captación con mayor superficie bruta es la cilindro-parabólica con el 60% de la superficie bruta registrada en la base de datos. Esto sucede debido a que en 2017 se pone en marcha la Planta de Miraah en Omán, destinada a la extracción de petróleo y que cuenta con una superficie bruta de 630.000 m². Los captadores solares plano cuenta con un tercio de la superficie de la captación cilindro-parabólica, unos 230.000 m² y los tubos de vacío se establecen por debajo de los 80.000 m² que representan el 22% y 7%, respectivamente.

En el análisis de la potencia térmica instalada se extraen varias conclusiones en relación los dos análisis anteriores. En primer lugar y centrandolo en el análisis en la potencia térmica, vuelve a destacar la Planta de Miraah que le otorga a la tecnología de captación cilindro-parabólica ser la que cuenta con una mayor potencia térmica instalada. Sin embargo, si este hecho no se hubiera dado, el 2017 sería una de los años más pobre en cuanto a potencia térmica instalada, relegándose al peor puesto desde 2006. En cuanto a la tecnología de captación, pasaría a ser la tercera por detrás del captador solar plano y los tubos de vacío que cuentan con el 28% y 10% del total de potencia instalada. Mientras que la tecnología con mayor potencia térmica instalada con 318.000 kWt agrupa al 54% del total. Tras estos análisis realizados hay que establecer una relación entre la cronología y la puesta en marcha de las instalaciones. De este modo, se observa con bastante claridad en los tres análisis como a partir de 2010 la puesta en marcha de instalaciones, la superficie bruta instalada y la potencia térmica tienden al alza hasta nuestros días donde, solo la pandemia del Covid-19, frenó el desarrollo y evolución establecida años atrás.

Por sector industrial, de los trece que conforma la base de datos, sobresalen especialmente tres de ellos. Estos son, la minería y el proceso de extracción que cuentan con la mayor potencia térmica instalada debido a la instalación de Miraah y a la minera chilena de Codelco; el sector agrícola y pesquero que poseen 40 instalaciones con una potencia superior a los 55.000 kWt; y, por último, el sector del procesado de alimentos con 59 instalaciones y una potencia de 44.000 kWt. Entre los sectores de menor potencia instalada pero no con menor importancia se encuentran la industria textil, la fabricación de bebidas y el procesado de frutas y vegetales, todos con una potencia entre los 10.000 y 30.000 kWt. Destacar que los procesos térmicos que siguen a la minería son los procesos de calentamiento de diferentes zonas del proceso productivo y la calefacción de espacios en cuanto a potencia térmica instalada.

En los siguientes análisis se tienen en cuenta la temperatura de operación del proceso térmico y el volumen de almacenamiento de las instalaciones. De un primer análisis en base al volumen de almacenamiento y el proceso térmico se extrae que el calentamiento de agua de alimentación de equipos y/o calderas cuenta con la mayor capacidad muy por encima de sus perseguidores, en este caso, el volumen de almacenamiento es superior a los 5.000 m³. En un segundo escalón se encuentran los procesos de secado, limpieza y procesos de calentamientos de diferentes partes del proceso con un volumen inferior a los 3.000 m³. Si se centra el estudio en el rango de temperaturas de operación, se obtiene de forma clara que la mayor cantidad de procesos industriales de energía solar térmica trabajan a temperaturas medias-bajas, es decir, por debajo de los 150 °C. La mayor concentración

de potencia térmica se produce en el rango de operación entre los 90-120 °C y los 60-90 °C. A este análisis se le puede añadir que los captadores solares planos y los tubos de vacío son los más utilizados para estas temperaturas de operación. Por su parte, los cilindro-parabólicos se centran en instalaciones de alta temperatura y mayor potencia térmica.

En cuanto al tipo de almacenamiento se destaca el almacenamiento en con agua a corto plazo con un total de 142 instalaciones y con procesos con un rango temperatura de operación entre los 60-90 °C. Por otro lado, en rango de temperaturas de operación más elevados, las instalaciones con almacenamiento, utilizan la acumulación de vapor, aunque es bastante escaso, pero es una tecnología reciente siendo la primera instalación del año 2015.

El análisis referente a los puntos de integración sería de bastante ayuda si este parámetro estuviese presente en todas las instalaciones registradas ya que, como ha quedado reflejado en el análisis bibliométrico, es necesario ampliar las investigaciones y proyectos entre la tecnología solar térmica y la integración en los procesos industriales. Se parte con 139 instalaciones con el punto de integración desconocido. No obstante, con los datos recogidos se puede afirmar que la mayoría de instalaciones integran el sistema térmico para el calentamiento del agua de reposición por encima de calentamiento del equipo donde se desarrolla el proceso o el calentamiento del medio en el que tendrá lugar el proceso.

Y para finalizar, el estudio de los fluidos caloportadores arroja la diferenciación entre las instalaciones que operan a media-baja temperatura, las cuales trabajan con agua, aire, glicol o alguna combinación entre el agua y los otros fluidos, y las instalaciones que operan a media-alta temperatura, las cuales trabajan con vapor o aceite térmico. Por separado, destacan el agua y el aceite térmico ya que se usan en la mayoría de instalaciones de sus respectivos rangos de temperatura.

Tras comentar todos los análisis realizados y para tener de forma concisa y con un golpe de vista los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 14 un resumen con los principales datos y conclusiones extraídos del análisis paramétrico realizado en este documento sobre las instalaciones de energía térmica y su integración en los procesos industriales actuales.

Tabla 14. Resumen de conclusiones sobre análisis paramétrico.

Captador solar	Plano	Tecnología con mayor nº de instalaciones y más longeva en cuanto a uso Segundo con mayor superficie bruta instalada, 230.000 m ² Elevado uso en proceso de media-baja T ^a , entre 30-120 °C.
	Cilindro-parabólico	Tecnología con mayor potencia instalada gracias a Planta de Miraah Mayor superficie bruta instalada, 675.000 m ² Elevado uso en proceso de media-alta T ^a >150 °C
Sector industrial	Minería	Sector con mayor potencia térmica instalada, 341.600 kWt
	Fab. Prod. alimentarios	Sector con mayor nº de instalaciones, 59, 12% del total.
Proceso térmico	Extracción	Petróleo en Miraah (Omán) y mineral en Codelco (Chile).
	Proc. calentamiento	Presente en 38% de instalaciones.
Almacenamiento	Agua a corto plazo	Sistema más empleado, 60% del total.
	Acum. De vapor	Sistema más moderno y para altas temperaturas.
Integración	Nivel C	Otros puntos de integración no identificados en 139 instalaciones
	Nivel A1	Integración para calentar agua de reposición, uso en 93 instalaciones
Fluido caloportador	T ^a media-baja	Agua-Aire-Glicol. Fluido más utilizado de todas las instalaciones: agua.
	T ^a media-alta	Aceite térmico-Vapor. Fluido más utilizado rango T ^a : aceite térmico

REFERENCIAS

- [1] K. Hansen, C. Breyer y H. Lund, «Status and perspectives on 100% renewable energy systems,» *Energy*, 2019.
- [2] D. Bogdanov, A. Gulagi, M. Fasihi y C. Breyer, «Full energy sector transition towards 100% renewable energy supply: Integrating power, heat, transport and industry sectors including desalination,» *Applied Energy*, 2020.
- [3] International Energy Agency, «World Energy Outlook 2020,» 2020.
- [4] International Energy Agency, «World Energy Outlook 2021,» 2021.
- [5] R. Adib, «RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT,» París, 2021.
- [6] C. A. Schoeneberger, C. A. McMillan, P. Kurup y S. Akar, «Solar for industrial process heat: A review of technologies, analysis approaches, and potential applications in the United States,» *Energy*, pp. 3-10, 2020.
- [7] Spirax-Sarco S.A., «Guía de referencia técnica: Distribución de vapor».
- [8] A. H. S. H. P. K. B. M. B. S. H. S. Ilyes Ben Hassine, «Solar Process Heat for Production and Advanced Applications,» 2014.
- [9] B. Koçak, A. I. Fernández y H. Paksoy, «Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects,» *Solar Energy*, pp. 135-169, 2020.
- [10] L. Kumar, M. Hasanuzzaman y N. Rahim, «Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review,» *Energy Conversion and Management*, 2019.
- [11] G. Martínez-Rodríguez, A. L. Fuentes-Silva, J. R. Lizárraga-Morazán y M. Picón-Núñez, «Incorporating the Concept of Flexible Operation in the Design of Solar Collector Fields for Industrial Applications,» *Energies*, 2019.
- [12] Energía solar, «Energía Solar. Captador solar térmico,» [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/componentes/colector-solar-termico>. [Último acceso: 21 04 2022].
- [13] U. L. Eskola, «Moodle Usurbilgo Lanbide Eskola,» [En línea]. Available: <https://elearning4.hezkuntza.net/013022/course/view.php?id=57>. [Último acceso: 21 04 2022].
- [14] Universidad de Sevilla. , *Energía solar en procesos térmicos: Sistemas de captación. Caracterización*, 2021.
- [15] R. Kumar, K. Chaitanya y S. Kumar, «Solar thermal energy technologies and its applications for process - A review,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 2-36, 2021.
- [16] IEA SHC - Task 33, «Process Heat Collectors,» Austria, 2008.
- [17] A. Asociación Solar de la Industria Térmica, «Guía Técnica de Energía Solar Térmica,» Madrid, 2020.

- [18] IRENA/IEA-ETSAP Technology Brief, «Solar Heat for Industrial Processes,» 2015.
- [19] N. H. P. M. R. S. Shahjadi Hisan Farjana, «Solar process heat in industrial systems – A global review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
- [20] H. Schnitzer, C. Brunner y G. Gwehenberger, «Minimizing greenhouse gas emissions through the application of solar thermal energy in industrial processes,» *Journal of Cleaner Production*, 2007.
- [21] A. K. Sharma, C. Sharma, S. C. Mullick y T. C. Kandpal, «Potential of solar industrial process heating in dairy industry in India and consequent carbon mitigation,» *Journal of Cleaner Production*, 2017.
- [22] A. K. Sharma, C. Sharma, S. C. Mullick y T. C. Kandpal, «Potential of Solar Energy Utilization for Process Heating in Paper Industry in India: A Preliminary Assessment,» *Energy Procedia*, 2015.
- [23] B. Norton, «Industrial and Agricultural Applications of Solar Heat,» *Comprehensive Renewable Energy*, vol. 3, pp. 568-594, 2012.
- [24] A. Giampieri, J. Ling-Chin, Z. Ma, A. Smallbone y A. Roskilly, «A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective,» *Applied Energy*, 2020.
- [25] H. Passalacqua, J. L. O. Volcan, M. H. A. Einawi, J. M. Kadnaji y F. Karam, «Application of a Multiple Attribute Decision Making Method to Improve Oil and Gas Field Development Projects,» *Society of Petroleum Engineers*, 2017.
- [26] S. H. P. K. B. M. B. S. H. S. Ilyes Ben Hassine Annabell Helmke, «Solar Process Heat for Production and Advanced Applications. Integration Guideline.,» 2015.
- [27] G. Martínez-Rodríguez, A. L. Fuentes-Silva, D. Velázquez-Torres y M. Picón-Núñez, «Comprehensive solar thermal integration for industrial processes,» *Energy*, 2021.
- [28] T. Jia, J. Huang, R. Li, P. He y Y. Dai, «Status and prospect of solar heat for industrial processes in China,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
- [29] Á. d. G. L. F. C. Joan Tarragona, «Bibliometric analysis of smart control applications in thermal energy storage systems. A model predictive control approach,» *Journal of Energy Storage*, 2020.
- [30] Elsevier, «Scopus,» [En línea]. [Último acceso: 2022].
- [31] NREL, «NREL Transforming Energy,» [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/>. [Último acceso: Mayo 2022].
- [32] GlassPoint, «GlassPoint,» [En línea]. Available: <https://www.glasspoint.com/>. [Último acceso: Mayo 2022].
- [33] U. S. Energy Department, «Energy,» [En línea]. Available: <https://www.energy.gov/>. [Último acceso: Mayo 2022].
- [34] ABENGOA, «ABENGOA,» [En línea]. Available: <https://www.abengoa.com/web/es/>. [Último acceso: Mayo 2022].