

Trabajo de Fin de Máster  
Máster universitario en Ingeniería Industrial

Simulación de un sistema de energía solar térmica  
para la producción de vapor en un proceso industrial

Autor: Francisco Javier Benjumea Trigueros

Tutor: José Julio Guerra Macho

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

Sevilla, 2018





Trabajo de Fin de Máster  
Máster universitario en Ingeniería Industrial

# **Simulación de un sistema de energía solar térmica para la producción de vapor en un proceso industrial**

Autor:

Francisco Javier Benjumea Trigueros

Tutor:

José Julio Guerra Macho

Catedrático de Universidad

Dep. Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo de fin de Máster: Simulación de un sistema de energía solar térmica para la  
producción de vapor en un proceso industrial

Autor: Francisco Javier Benjumea Trigueros

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, 2018

El Secretario del Tribunal



## Resumen

El presente trabajo de fin de máster tiene fines académicos por lo que no tiene propósitos comerciales, en concreto para la obtención del Máster universitario en ingeniería industrial por la Universidad de Sevilla. En él se estudia las instalaciones de energía solar usadas en procesos industriales, las cuales pueden permitir un ahorro de combustible.

En la primera parte, la cual es descriptiva, se hace un análisis de las tecnologías que se utilizan actualmente en el mercado y que están instaladas, se clasifican por su configuración e integración en el proceso industrial. También se comenta los sectores en los que se utilizan y el rango de temperaturas de cada sector. Para finalizar esta parte se muestran las principales características de las mayores plantas del mundo y de España.

Por otro lado está la parte de simulación, donde se ha modelado un sistema de energía solar y su integración solar, de forma que se pueda realizar un estudio analítico y comparar resultados según las variables que se introducen en dicho sistema, como puede ser la ciudad en la que se encuentra dicha instalación.



## Índice

|  |      |
|--|------|
| Resumen.....   | vi   |
| Índice.....  | viii |
| Tabla de figuras.....  | x    |
| Tabla de tablas.....   | xii  |
| 1. Introducción.....   | 1    |
| 1.1 Objeto.....  | 1    |
| 1.2 Consumo energético en España.....  | 1    |
| 1.3 Energía solar térmica.....   | 2    |
| 2. Sistemas solares en la Industria.....   | 4    |
| 2.1 Introducción.....  | 4    |
| 2.2 Procesos térmicos industriales.....  | 4    |
| 2.3 Situación actual de la tecnología.....   | 7    |
| 2.4 Clasificación.....   | 10   |
| 2.4.1 Sistemas con un líquido o vapor como fluido caloportador.....                | 11   |
| 2.4.2 Sistemas con aire como fluido caloportador.....                              | 16   |
| 2.5 Tipologías e integración en la industria.....                                  | 17   |
| 2.6 Sectores industriales y aplicaciones.....                                      | 28   |
| 2.7 Proyectos más importantes.....   | 31   |
| 2.7.1 Proyectos más importantes en España.....                                     | 36   |
| 2.8 Estadísticas de instalaciones solares térmicas para procesos industriales..... | 39   |
| 3. Simulación.....   | 43   |
| 3.1 Introducción.....  | 43   |
| 3.2 Engineering equation solver (EES).....   | 43   |
| 3.3 Modelado del proceso en el EES.....  | 44   |
| 3.4 Descripción del caso base objeto de estudio.....                               | 49   |
| 3.5 Resultados.....  | 51   |
| 4. Análisis paramétrico.....   | 56   |
| 4.1 Introducción.....  | 56   |
| 4.2 Área de captación.....   | 56   |
| 4.3 Agrupación de captadores en serie.....   | 57   |
| 4.4 Caudal de aceite en serie.....   | 59   |
| 4.5 Efectividad del intercambiador con cambio de fase.....                         | 60   |



|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.6 | Efectividad del intercambiador sin cambio de fase. .... | 62 |
| 4.7 | Temperatura de consigna. ....                           | 63 |
| 4.8 | Perfil demanda de vapor .....                           | 64 |
| 5.  | Resumen y Conclusiones.....                             | 69 |
| 6.  | Bibliografía .....                                      | 72 |

## Tabla de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Consumo de energía final en 2015 .....  | 1  |
| Figura 2 Consumo de energía primaria .....   | 2  |
| Figura 3 Mapa del mundo de potencial solar.....  | 3  |
| Figura 4 Esquema de instalación térmica industrial.....  | 4  |
| Figura 5 Esquemas de generador, cogeneración, bomba de calor y calentamiento directo de aire .....   | 5  |
| Figura 6 Intercambiadores externos.....  | 6  |
| Figura 7 Intercambiadores internos .....   | 6  |
| Figura 8 Calentamiento con inyección de vapor vivo .....   | 7  |
| Figura 9 Potencia instalada y número de instalaciones en función del área de captación. ....   | 10 |
| Figura 10 Sistema sin recirculación. ....  | 12 |
| Figura 11 Sistemas con sistema auxiliar en serie y en paralelo. ....   | 12 |
| Figura 12 Generación de vapor en un tanque flash.....  | 13 |
| Figura 13 Generación de vapor en captadores solares .....  | 13 |
| Figura 14 Generación de vapor en un recuperador.....   | 14 |
| Figura 15 Instalación solar térmica con calentamiento indirecto de agua y acumulación de calor.....  | 15 |
| Figura 16 Instalación solar térmica con generación directa de vapor y acumulación en el circuito del agua de alimentación .....                | 15 |
| Figura 17 Instalación solar térmica con generación indirecta de vapor y acumulación en el circuito del agua de alimentación. ....              | 15 |
| Figura 18 Sistema solar que utiliza aire como fluido caloportador. ....  | 16 |
| Figura 19 Secadero solar activo.....   | 17 |
| Figura 20 Secadero solar pasivo .....  | 17 |
| Figura 21 Opciones de integración en la industria .....  | 18 |
| Figura 22 Niveles de integración. ....   | 19 |
| Figura 23 Secciones en un sistema con almacenamiento.....  | 20 |
| Figura 24 Generación indirecta de vapor .....  | 20 |
| Figura 25 Generación directa de vapor .....  | 20 |
| Figura 26 Calentamiento directo de agua .....  | 21 |
| Figura 27 Precaentamiento de aire .....  | 21 |
| Figura 28 Calentamiento indirecto de un baño o depósito .....  | 21 |
| Figura 29 Calentamiento de un fluido de proceso en un depósito de precalentamiento .....   | 22 |
| Figura 30 Sistema de calentamiento directo en el sistema de generación de vapor.....   | 22 |
| Figura 31 Sistema de calentamiento directo en paralelo en el sistema de generación de vapor.....   | 23 |
| Figura 32 Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de generación de vapor.....   | 23 |
| Figura 33 Sistema de calentamiento indirecto para precalentar el agua de alimentación .....  | 24 |
| Figura 34 Sistema de calentamiento indirecto para precalentar el agua de reposición .....  | 24 |
| Figura 35 Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de distribución.....  | 25 |
| Figura 36 Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de distribución con una instalación solar de baja temperatura y bomba de calor..... | 25 |
| Figura 37 Sistema de calentamiento indirecto con HEX externo al proceso industrial.....  | 26 |
| Figura 38 Sistema de calentamiento indirecto con HEX externo en el circuito del agua de calentamiento del proceso industrial .....             | 26 |
| Figura 39 Sistema de calentamiento indirecto con HEX externo en el circuito del producto .....   | 27 |
| Figura 40 Sistema de calentamiento indirecto con HEX interno en el proceso.....  | 27 |
| Figura 41 Codelco Gabriela Mistral .....   | 32 |
| Figura 42 Daly Textile .....   | 33 |
| Figura 43 Ruyi Textile .....   | 33 |
| Figura 44 Jiangsu Printing and Dyeing .....  | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 45 Prestage Foods .....  | 35 |
| Figura 46 La Parrena copper mine.....   | 35 |
| Figura 47 Procter & Gamble (Tianjin).....   | 36 |
| Figura 48 Acuinova Andalucía S.A. ....  | 37 |
| Figura 49 Nissan Avila. ....  | 38 |
| Figura 50 Parkings Service S.A.....   | 38 |
| Figura 51 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por capacidad y área de captadores a finales de 2016..... | 39 |
| Figura 52 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por tipo de captador a finales de 2016.....               | 40 |
| Figura 53 Porcentaje de tecnologías de captadores.....  | 40 |
| Figura 54 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por industria a finales de 2016 .....                     | 41 |
| Figura 55 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por país a finales de 2016.....                           | 41 |
| Figura 56 Suministro de calor útil específico de plantas de calor de proceso solar.....   | 42 |
| Figura 57 Icono EES .....   | 43 |
| Figura 58 Tabla paramétrica de resultados.....  | 44 |
| Figura 59 Diagrama de temperaturas en el intercambiador.....  | 46 |
| Figura 60 Esquema del proceso identificando $T^{\circ}$ de cada corriente. ....   | 47 |
| Figura 61 Esquema del proceso resaltando el proceso cuando la radiación no es suficiente. ....  | 47 |
| Figura 62 Esquema del proceso resaltando el proceso cuando la radiación es suficiente. ....   | 48 |
| Figura 63 Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de generación de vapor.....  | 49 |
| Figura 64 Resultados mensuales del caso base.....   | 52 |
| Figura 65 Evolución de $T^{\circ}$ de salida del intercambiador y captador en un día soleado .....  | 54 |
| Figura 66 Evolución de $T^{\circ}$ de salida del intercambiador y captador en un día nublado.....   | 54 |
| Figura 67 Resultados análisis paramétrico del área de captación .....   | 56 |
| Figura 68 Resultados análisis paramétrico de captadores en serie.....   | 58 |
| Figura 69 Parámetro de corrección por caudal. ....  | 59 |
| Figura 70 Resultados análisis paramétrico del caudal de aceite.....   | 60 |
| Figura 71 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador con cambio de fase.....  | 61 |
| Figura 72 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador sin cambio de fase.....  | 62 |
| Figura 73 Resultados análisis paramétrico temperatura de consigna .....   | 64 |
| Figura 74 Curva demanda de vapor en variación 1 .....   | 64 |
| Figura 75 Resultados mensuales variación demanda 1.....   | 65 |
| Figura 76 Curva demanda de vapor en variación 2 .....   | 66 |
| Figura 77 Resultados mensuales variación demanda 2.....   | 67 |
| Figura 78 Curva demanda de vapor en variación 3.....  | 67 |
| Figura 79 Resultados mensuales variación demanda 3.....   | 68 |

## Tabla de tablas

|   |    |
|---|----|
| <i>Tabla 1 Tecnologías de generación térmica</i> .....  | 5  |
| <i>Tabla 2 Criterios de clasificación</i> .....   | 11 |
| <i>Tabla 3 Aplicaciones de procesos industriales</i> .....  | 28 |
| <i>Tabla 4 Características Codelco Gabriela Mistral</i> .....                                       | 31 |
| <i>Tabla 5 Características Daly Textile</i> .....   | 32 |
| <i>Tabla 6 Carasterísticas Ruyi Textile</i> .....   | 33 |
| <i>Tabla 7 Características Jiangsu Printing And Dyeing</i> .....                                    | 34 |
| <i>Tabla 8 Características Prestage Foods</i> .....   | 34 |
| <i>Tabla 9 Características La Parrena copper mine</i> .....   | 35 |
| <i>Tabla 10 Características Procter &amp; Gamble (Tianjin)</i> .....                                | 36 |
| <i>Tabla 11 Características Acuinova Andalucía S.A.</i> .....                                       | 37 |
| <i>Tabla 12 Características Nissan Avila</i> .....  | 37 |
| <i>Tabla 13 Características Parkings Service S.A.</i> .....   | 38 |
| <i>Tabla 14 Datos generales.</i> .....  | 50 |
| <i>Tabla 15 Datos del proceso industrial</i> .....  | 50 |
| <i>Tabla 16 Coeficientes para el cálculo del rendimiento del captador.</i> .....                    | 51 |
| <i>Tabla 17 Datos generador de vapor.</i> .....   | 51 |
| <i>Tabla 18 Resultados mensuales y anuales del caso base</i> .....                                  | 52 |
| <i>Tabla 19 Evolución de Tª de salida del intercambiador y captador en un día soleado</i> .....     | 53 |
| <i>Tabla 20 Evolución de Tª de salida del intercambiador y captador en un día nublado</i> .....     | 55 |
| <i>Tabla 21 Resultados análisis paramétrico del área de captación</i> .....                         | 57 |
| <i>Tabla 22 Resultados análisis paramétrico de captadores en serie</i> .....                        | 58 |
| <i>Tabla 23 Parámetro de corrección por caudal.</i> .....   | 59 |
| <i>Tabla 24 Resultados análisis paramétrico caudal de aceite térmico</i> .....                      | 60 |
| <i>Tabla 25 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador con cambio de fase</i> ..... | 61 |
| <i>Tabla 26 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador sin cambio de fase</i> ..... | 62 |
| <i>Tabla 27 Resultados análisis paramétrico temperatura de consigna</i> .....                       | 63 |
| <i>Tabla 28 Resultados mensuales y anuales de la variación demanda 1</i> .....                      | 65 |
| <i>Tabla 29 Resultados mensuales y anuales de la variación demanda 2</i> .....                      | 66 |
| <i>Tabla 30 Resultados mensuales y anuales de la variación demanda 3</i> .....                      | 68 |

## 1. Introducción

### 1.1 Objeto

El objeto del presente trabajo es analizar el funcionamiento de un apoyo solar para una demanda de energía térmica en forma de vapor saturado, para ello se utiliza un sistema de captación a partir de captadores con concentración. El propósito de simular, mediante el modelado del sistema mediante sus ecuaciones en el programa EES. A partir de las simulaciones se realiza una comparativa entre distintas situaciones. Además, se realiza un estudio de la situación actual de la energía solar, aplicada a procesos de calentamiento industrial, en todos los ámbitos. Para ello se analizará los aspectos más importantes, identificando los diferentes campos y el rango de temperatura que se tienen en estos.

### 1.2 Consumo energético en España

El consumo de energía final en España durante 2016 fue de 85.874 kilotoneladas equivalentes de petróleo (ktep), un 1,5% superior al de 2015, esta cifra incluye el consumo para usos no energéticos, como por ejemplo la obtención de asfaltos. Esta variación viene motivada fundamentalmente por el crecimiento económico tras un periodo de fuerte contracción de la economía, medido en un aumento del 3,2% del PIB. Además, se han sumado a ello el efecto de la laboralidad, y un leve incremento por las condiciones climáticas, caracterizadas por un invierno más frío que el de 2015. No obstante, el dato del consumo de energía final debe ponerse en relación con la continua tendencia de reducción de la intensidad energética de la economía lo cual muestra una ganancia global de eficiencia, tal y como se refleja en la figura 1 y 2.

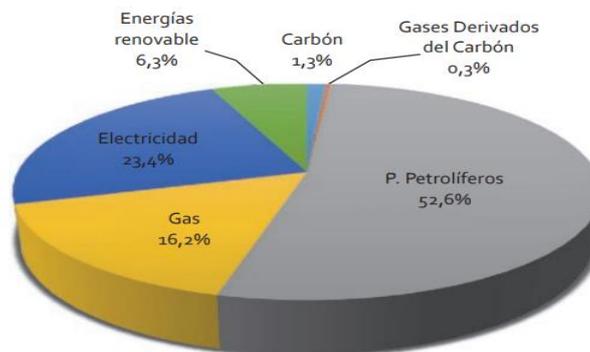


Figura 1 Consumo de energía final en 2015

Según datos provisionales, si atendemos a la desagregación por sectores, en el sector industrial continúa la tendencia de descenso en el consumo de energía final iniciada en 2010, experimentándose una disminución de la demanda del 5,2% respecto a los datos de 2015. Esta disminución del consumo energético viene dada por la implementación de medidas de eficiencia energética, ya que el índice de producción industrial, que mide la evolución mensual de la actividad productiva de las ramas industriales, aumentó un 1,9% durante 2016 respecto a 2015. En los sectores residencial y terciario también se ha reducido la demanda un 4,1% en referencia al año anterior. Sin embargo, la demanda energética del sector de transporte ha aumentado, 11,1%, confirmando el cambio de tendencia que se dio en 2014, lo que conculca

con el incremento en el consumo de productos petrolíferos tanto en energía final como en primaria, así como el cambio del ciclo económico.

El sector industrial representa en la actualidad del orden del 24% de la demanda energética total, alcanzando en 2015 un consumo de 18.888 ktep, un 5,4% inferior al del año precedente. El 75% de este consumo se concentra en cinco ramas— metalurgia, minerales no metálicos, química, alimentación, bebidas y tabaco y pasta y papel—, cuya aportación conjunta al Valor Añadido Bruto (VAB) de la industria es, sin embargo, menor al 30%. Este contraste entre las participaciones en términos de la demanda y del VAB, resulta especialmente acusado en la industria de los minerales no metálicos, donde la contribución al VAB es casi siete veces inferior a la de la demanda energética correspondiente

En EEUU el sector industrial supone el 40% del consumo del país y casi el 50% del mismo podría ser suministrado con energía solar térmica. En España, el 50% del consumo total corresponde al sector industrial y en el 35% de esta demanda, entre 80 y 300 C, se podría incorporar la energía solar térmica a baja y media temperatura.

El consumo de energía primaria en España durante 2016 fue de 123.484 ktep, lo que supuso un aumento del 0,2% respecto al año anterior. Por tanto, el incremento en energía primaria es inferior porcentualmente al de energía final. Este hecho muestra una mejora de la eficiencia del sistema energético español, pues un pequeño aumento en el consumo de energía primaria supone un incremento muy superior de la energía final. Pese a que el incremento de electricidad importada influye en esta conversión, dicho aumento no es determinante en la mejora de eficiencia indicada, puesto que la importación de electricidad tan sólo supone un 0,5% de la energía primaria total.

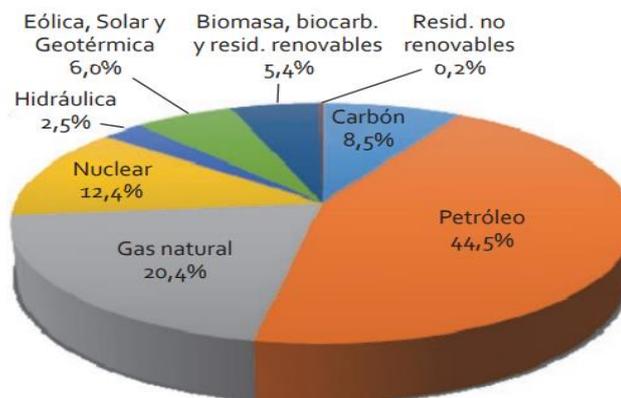


Figura 2 Consumo de energía primaria

### 1.3 Energía solar térmica

Los sistemas de energía solar térmica utilizan la radiación solar para generar calor. Esta energía en forma de calor se utiliza en aplicaciones industriales, comerciales y residenciales a través de diferentes tecnologías, que incluyen la producción de vapor, los sistemas de calefacción, los sistemas de refrigeración, etc.

Los procesos industriales que consumen energía térmica son muy diversos tanto en tecnologías como en niveles de temperatura. El fluido caloportador que se utiliza para transportar la energía desde la sala de calderas hasta el proceso puede ser vapor saturado o

recalentado, aceite térmico, agua saturada, agua sobrecalentada, gases calientes o aire, condicionando en parte la incorporación de los sistemas de energía solar.

Se puede obtener un fluido a diferentes temperaturas, que van desde los 40°C hasta más de 300°C, por tanto, resulta muy útil en una gran variedad de sectores. Dependiendo de la temperatura que se quiera conseguir, hay diferentes tipos de sistemas de energía solar térmica, dependiendo de las características necesidad de seguimiento del Sol y la relación de concentración, entendiéndola como la relación entre el área de captación total y el área de pérdidas energéticas del receptor o elemento en donde se transforma la radiación solar, concentrada o no, en energía térmica.

La radiación solar que incide en la superficie terrestre es suficiente para suministrar las necesidades de energía primaria en el mundo. La radiación solar interceptada por la atmósfera terrestre es aproximadamente en valores promedios del orden de 1,3 kW/m<sup>2</sup>. Debido a los fenómenos de reflexión hacia el espacio, la radiación máxima que incide en la superficie terrestre es de 1 kW/m<sup>2</sup> aproximadamente, ver Figura 3 Mapa del mundo de potencial solar.. Con estos valores, el ratio entre la energía solar útil y el consumo de energía primaria mundial es del orden de de 9.000 a 1

El problema de usar la radiación solar es que está limitada por variaciones estacionales, diurnas, geográficas y condiciones atmosféricas. La radiación solar como recurso energético es por tanto una energía de baja densidad, no controlable, generalmente desacoplada del consumo.

Sin embargo, es una energía gratuita (no la tecnología para su utilización), descentralizada, a “libre” disposición de los potenciales usuarios y que no da lugar a un calentamiento adicional de la atmósfera terrestre. La conversión de la energía solar en energía útil, como energía térmica o energía eléctrica, tiene limitaciones técnicas (rendimiento y nivel térmico necesario), económicas frente a las tecnologías convencionales y espaciales relacionadas con la superficie necesaria. En cualquier caso, el potencial de la energía solar es mucho mayor que el de otras fuentes de energías renovables como la eólica, biomasa, geotérmica o mareomotriz.

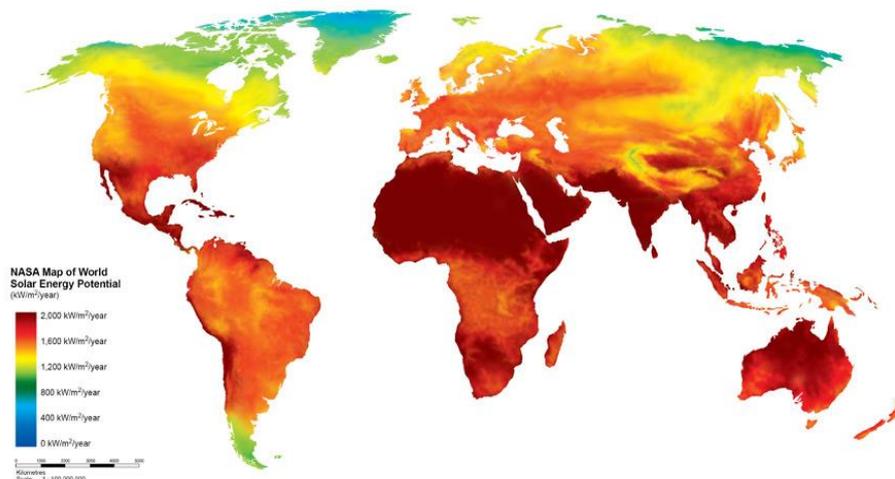


Figura 3 Mapa del mundo de potencial solar.



| Tecnología                 | Fluido caloportador                             | Combustible  |
|----------------------------|---|--|
| Generador                  | Vapor, agua caliente,<br>aceite térmico         | Gas natural, GLP,<br>fueloil, carbón,<br>biomasa, biogas |
| Cogeneración               |   |  |
| Generador<br>aire caliente | Aire caliente                                   |  |
| Bomba de<br>calor          | Agua caliente, aire<br>caliente, aceite térmico | Electricidad   |
| Solar                      | Vapor, agua caliente,<br>aceite térmico         | -  |

Tabla 1 Tecnologías de generación térmica

En la Figura 5 Esquemas de generador, cogeneración, bomba de calor y calentamiento directo de aire se muestra un esquema de las cuatro primeras tecnologías, la solar se verá detalladamente más adelante ya que es objeto de este trabajo.

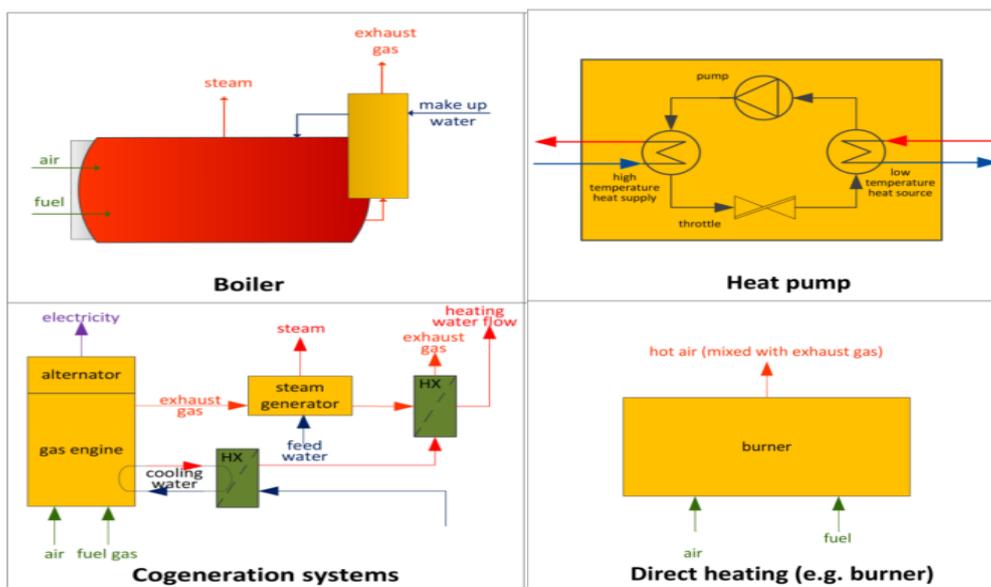


Figura 5 Esquemas de generador, cogeneración, bomba de calor y calentamiento directo de aire

El sistema de distribución depende fundamentalmente del fluido caloportador utilizando, siendo especialmente compleja la red de vapor y de condensado de una instalación de vapor, que ha de garantizar que el vapor llegue saturado y seco al proceso y el condensado vuelva al sistema de generación limpio y con la máxima energía posible.

El almacenamiento de energía es muy importante en algunas instalaciones industriales. El almacenamiento se puede encontrar en el sistema de generación, en la red de distribución o en el proceso industrial. El almacenamiento en el sistema de generación o en la red de transporte tiene como objetivo mejorar el rendimiento en instalaciones donde la inercia del generador es importante (utilizan carbón o biomasa como combustible) o donde la demanda

de la instalación es muy variable con el tiempo con objeto de mejorar el rendimiento a carga parcial del generador.

El medio de almacenamiento suele ser en depósitos de agua caliente a presión o en acumuladores de vapor.

El sistema de transferencia de calor en los procesos industriales se basa en tres estrategias básicas de calentamiento: intercambiadores de calor (HEX) externos al proceso, intercambiadores de calor incorporados en el proceso o sistemas de calentamiento directo. Además de estas tecnologías, los procesos de evaporación y de secado son frecuentes en muchos sectores industriales, y suelen incorporar intercambiadores internos o externos al equipo.

Los intercambiadores externos, ver esquemas en figura 6, más utilizados son los intercambiadores de carcasa y tubos, los intercambiadores compactos (de placas o en espiral) y los intercambiadores de flujo cruzado con aletas cuando uno de los fluidos es aire. Los HEX externos pueden calentar directamente el proceso o un fluido intermedio.

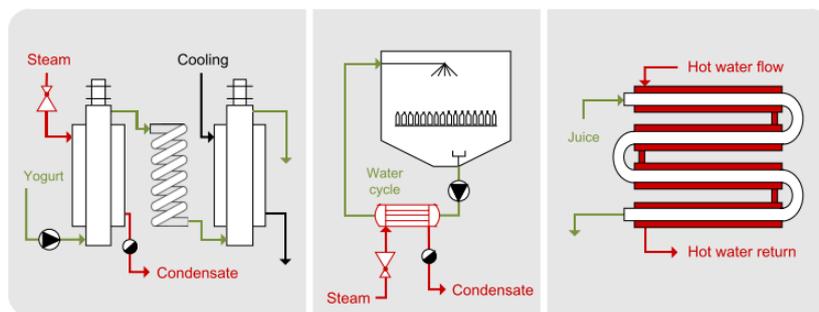


Figura 6 Intercambiadores externos

Diversos equipos, depósitos o baños pueden calentarse con HEX internos, ver esquemas en figura 7. Los más importantes son camisas (doble envolvente), serpentines o banco de tubos. También se utilizan HEX de placas y resistencias eléctricas. El uso de camisas está limitado a presiones máximas de 6 bar y depósitos de hasta 10 m<sup>3</sup> aproximadamente. Para mayores presiones y tamaños se utilizan serpentines soldados, perfiles o media tubería soldada.

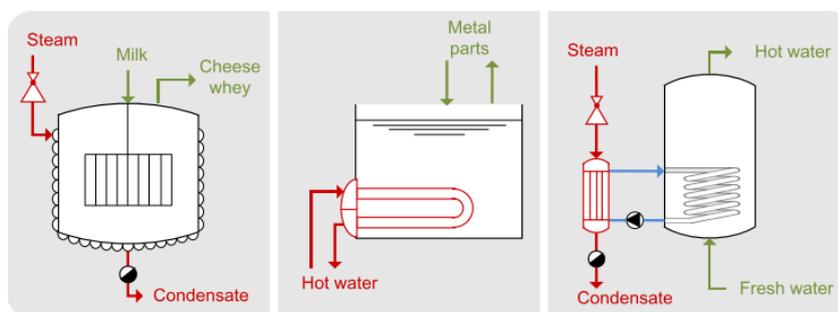


Figura 7 Intercambiadores internos

Los principales sistemas de calentamiento directo son combustión directa, utilizando los gases de combustión como fluido caloportador, e inyección de vapor vivo en baños, depósitos o corrientes de fluidos. Se pueden ver algunos esquemas de vapor vivo en la figura 8.

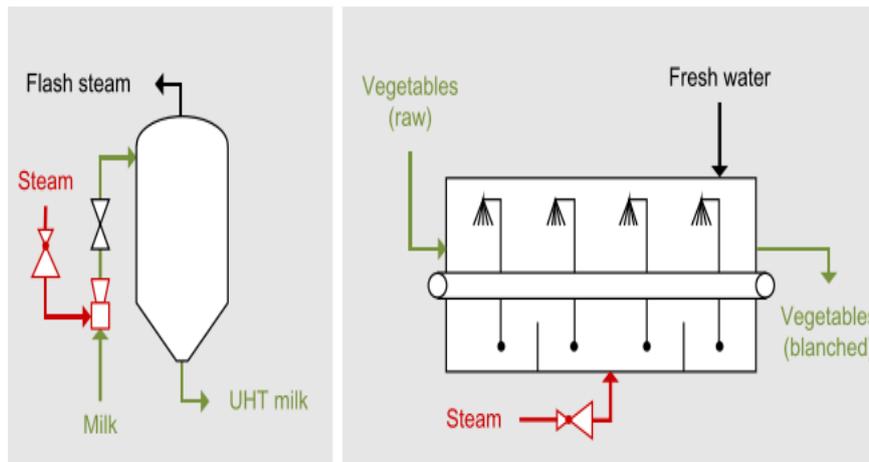


Figura 8 Calentamiento con inyección de vapor vivo

### 2.3 Situación actual de la tecnología

Las tecnologías de calefacción y refrigeración solar recogen la energía térmica del sol y la transfieren a un fluido de transferencia de calor. El fluido de transferencia de calor puede ser agua o aire. El agua o aire caliente puede ser utilizado directamente o canalizado a un tanque de almacenamiento. En los sistemas indirectos, el fluido de transferencia de calor pasa a través de un intercambiador de calor para calentar el fluido de proceso.

En el caso del enfriamiento solar, el fluido calentado se utiliza en un dispositivo denominado absorción para enfriar los fluidos de proceso en el 99% de los casos de calefacción y refrigeración solar. Esta energía térmica también se utiliza para proporcionar agua caliente o calefacción de espacios en hogares residenciales (IEA-SHC, 2013), pero también puede utilizarse para proporcionar calor de proceso para procesos industriales.

En este último caso, las tecnologías son similares a las utilizadas en aplicaciones residenciales con tres excepciones:

- 1) La cantidad de calor y refrigeración requerida en procesos industriales es mucho mayor.
- 2) Las necesidades de calor y enfriamiento son a menudo continuas por lo que se necesitan sistemas de control complejos adicionales.
- 3) Los niveles de temperatura requeridos para el calor del proceso son a menudo más altos para que los concentradores y otras tecnologías avanzadas son necesarias para elevar la temperatura.

El uso de la energía solar en procesos industriales ha sido estudiada desde los años setenta (SERI, 1980, Fuller, 2011), pero debido a los altos costos de capital y los bajos costos del carbón

y el gas para la industria, sólo se ha realizado un despliegue limitado durante los últimos treinta años.

Las tecnologías de calor de proceso solar se pueden subdividir en dos amplias áreas.

- Los secadores solares a gran escala se aplican principalmente en la industria de procesamiento de alimentos y utilizar equipos de circulación natural o convección forzada para recolectar la radiación solar para aplicaciones de secado.
- Los captadores solares de proceso se utilizan para proporcionar agua caliente o calefacción de espacio en una variedad de sectores industriales diferentes.

Con tecnologías avanzadas de calor de proceso solar, se pueden proporcionar temperaturas de hasta 400°C, potencialmente cumpliendo casi el 50% de la demanda de calor en el sector industrial (IRENA). El calor en el rango de temperaturas más bajo (<80 ° C) puede proporcionarse fácilmente con sistemas disponibles comercialmente, tales como captadores planos (FPC) y captadores de tubos de vacío (ETC). Para procesos de temperatura media, se han desarrollado con éxito nuevos diseños avanzados de captadores. El FPC o ETC de ultra alto vacío con concentradores también puede generar temperaturas de hasta 200 °C. Los concentradores solares como captadores parabólicos, captadores cilindro-parabólicos y captadores Fresnel lineales pueden generar vapor comprimido con temperaturas de hasta 400 ° C. La mayoría de los sistemas solares térmicos para el calor del proceso industrial son plantas piloto a pequeña escala. Sólo un tercio de los 140 proyectos tiene áreas de captadores > 500 m<sup>2</sup>, y los cuatro proyectos más grandes (todos FPC) representan el 49% de la capacidad térmica instalada. La planta termosolar inaugurada en una mina de cobre en Chile en 2013 representa ahora el 28% de la capacidad instalada. Además, casi 80 captadores de platos parabólicos se utilizan para la cocina comunitaria en la India, alrededor de 40 MWth en total. Los países con altas horas de sol (por ejemplo, India, México y países de Medio Oriente / la península Arábiga) son vistos como mercados de crecimiento.

Los costos del calor solar para energía térmica de procesos industriales dependen fuertemente del nivel de temperatura del proceso, la continuidad de la demanda, el tamaño del proyecto y el nivel de radiación solar del sitio. En el caso de los sistemas FPC y ETC convencionales, los costes del sistema de inversión oscilan entre 250 y 1 000 EUR / kW en Europa y entre 200 y 300 EUR / kW en la India, Turquía, Sudáfrica y México. Los costes energéticos de los sistemas solares térmicos viables oscilan entre los 2,5 y los 8 céntimos de euro / kWh, y una hoja de ruta europea apunta a los costes del calor solar de 3-6 céntimos de euro / kWh (ESTIF, 2014). En el caso de los sistemas concentrados, los costes de calefacción se sitúan en el rango de 6 a 9 euros / kWh con un objetivo de 4 a 7 euros / kWh para los sistemas de concentración en 2020 (ESTIF, 2014). Los sistemas concentrados incluyen captadores parabólicos (desarrollados y usados en la India) con costos que oscilan entre 400-1 800 USD / kW, captadores de captadores parabólicos con costes que oscilan entre los USD 600-2 000 / kW y captadores lineales Fresnel en el rango de USD 1 200-1 800 / kW. En comparación, la misma tecnología se utiliza en plantas de energía solar concentrada (CSP) con costes de alrededor de USD 34 000-6 000 / kW (IRENA, 2015). Se están llevando a cabo una serie de desarrollos para reducir los costos de los sistemas de calefacción por proceso solar. Para el FPC y el ETC convencionales, el uso de polímeros para reemplazar componentes de acero y cobre se consideran para futuras reducciones de costos, así como diseños más modulares que permitan una integración más

fácil en tejados industriales. Para la concentración de sistemas, la integración y optimización de la calefacción de procesos solares en plantas industriales existentes y recién construidas será una mejora esencial de la tecnología.

A escala mundial, la energía térmica del proceso industrial representa más de dos tercios del consumo total de energía en la industria, y la mitad de este proceso demanda calor en temperaturas bajas a medias (<400 ° C). Actualmente, aproximadamente el 40% del consumo industrial de energía primaria está cubierto por gas natural y aproximadamente el 41% por petróleo. Esto significa que existe un potencial técnico para suministrar alrededor de 15 EJ de calor solar térmico para el año 2030 (alrededor del 10% de la demanda de energía industrial), mientras que la participación de la energía solar térmica en el sector industrial podría alcanzar el 33% (IRENA, 2014a). Las principales áreas de aplicación para sistemas solares térmicos se encuentran en los sectores de alimentos, bebidas, transporte.

El uso de tecnologías de calentamiento de procesos solares sigue siendo apoyado por fondos de investigación y demostración, así como subsidios gubernamentales. Sin embargo, aparecen los primeros proyectos llave en mano que aprovechan los bajos costes de la calefacción solar. Una barrera importante para el despliegue del calor del proceso solar es la estructura del sector industrial. Las industrias de uso intensivo de energía representan el 75% de la demanda de calor, pero consisten en sólo 30 000 a 60 000 plantas. Para las plantas industriales más grandes, la integración en flujos de calefacción de procesos existentes y optimizados, así como la falta de familiaridad con la tecnología, constituyen cuellos de botella críticos. El otro 95% de las plantas industriales son pequeñas y medianas empresas. Esto significa que las tecnologías de calor del proceso solar necesitan ser adaptadas para satisfacer las necesidades específicas de demanda de energía en ubicaciones individuales. Dos áreas de aplicación más pequeñas son el uso de sistemas solares térmicos para impulsar las máquinas de enfriamiento por absorción / adsorción u otros enfriadores térmicos y el uso activo del calentamiento solar para el secado de productos agrícolas. Para las industrias más pequeñas, la viabilidad económica del calor solar para los sistemas de procesos industriales se ve obstaculizada por los altos costos iniciales, incluso si el costo total de la vida útil sería menor. Sin embargo, la creciente gama de temperaturas cubiertas por la calefacción de proceso solar y el aumento de los costos y la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles están mejorando la economía.

La energía térmica solar para procesos industriales (SHIP) es un mercado prometedor para aplicaciones térmicas solares a gran escala. En la actualidad hay más de 190 sistemas termosolares operativos para el calor del proceso que se reportan en todo el mundo, con una capacidad total de más de 111 MWth (159 000 m<sup>2</sup>).

La Figura 9 Potencia instalada y número de instalaciones en función del área de captación. muestra la importancia de las aplicaciones térmicas solares a gran escala. Las 20 plantas más grandes tienen un total de 106 418 m<sup>2</sup>, lo que representa más del 70% de la superficie bruta total instalada. En total, más del 60% de la superficie bruta se instaló desde 2011. El tamaño medio de la planta (de plantas > 100 m<sup>2</sup>) ha aumentado en los últimos años. Entre 2000 y 2007 el tamaño promedio de la planta fue de 585 m<sup>2</sup> de superficie bruta. Desde entonces, este valor se ha multiplicado por cuatro.

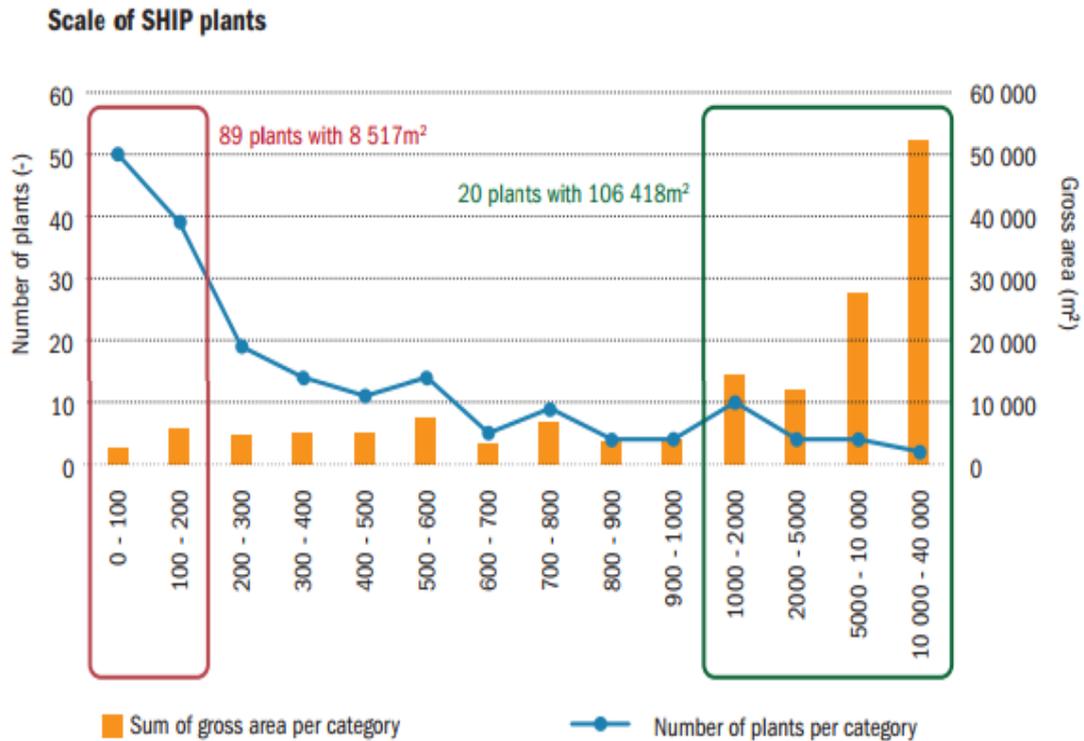


Figura 9 Potencia instalada y número de instalaciones en función del área de captación.

## 2.4 Clasificación

Como se ha comentado anteriormente, las instalaciones de energía solar en el sector industrial tienen dos características:

- El tamaño de la instalación debido a la magnitud de la energía consumida.
- La necesidad de integrar la instalación solar con el sistema convencional y el proceso industrial.

Al diseñar la instalación hay que tener en cuenta fundamentalmente el fluido caloportador utilizado en el proceso y la temperatura del proceso. No obstante, en una instalación industrial convencional la temperatura del proceso no influye significativamente en el rendimiento del sistema de generación y se trabaja con temperaturas superiores a las necesarias con objeto de aumentar la diferencia de temperatura en el proceso, reduciendo el tamaño de los HEX.

En un proceso industrial se necesita grandes cantidades de energía en un espacio reducido por lo que la superficie necesaria para la instalación del sistema de captación puede llegar a ser un serio problema

El coste de una instalación solar en la industria es elevado por lo que el dimensionado de la instalación hay que hacerlo simulando el sistema en base horaria durante un periodo de tiempo representativo, generalmente un año. Para predimensionar la instalación se puede utilizar los métodos generales desarrollados para otras aplicaciones.

Las instalaciones solares en la industria se pueden clasificar siguiendo diferentes criterios, según se muestra en la Tabla 2 Criterios de clasificación.

| Criterio                 | Opciones               |
|--------------------------|------------------------|
| Fluido caloportador      | Vapor                  |
|                          | Líquido (agua, aceite) |
|                          | Aire                   |
| Circuito de captación    | Con recirculación      |
|                          | Sin recirculación      |
| Sistema de calentamiento | Directo                |
|                          | Indirecto              |
| Sistema auxiliar         | Sin sistema auxiliar   |
|                          | Serie                  |
|                          | Paralelo               |
| Acumulación              | Con acumulación        |
|                          | Sin acumulación        |

Tabla 2 Criterios de clasificación

La principal clasificación es dependiendo del fluido que se caliente mediante el sistema solar, dentro de esta clasificación, se dividen en dos grupos, los que usan líquido o vapor o los que usa aire como fluido caloportador. Dentro de esta división se pueden dar las demás clasificaciones, como se verá a continuación.

La instalación de energía solar se puede incorporar en diferentes subsistemas de la instalación convencional. En una instalación industrial donde el fluido caloportador es agua o vapor, la instalación solar puede por ejemplo precalentar el agua bruta de renovación, calentar directamente el fluido caloportador o calentar directamente el proceso industrial o una combinación de ambas.

Desde el punto de vista del rendimiento del sistema de captación, el precalentamiento del agua de renovación permite trabajar a los captadores a una menor temperatura, aumentando su rendimiento

#### 2.4.1 Sistemas con un líquido o vapor como fluido caloportador

En las instalaciones con captadores solares de líquido conectados directamente al proceso industrial, el circuito del sistema de captación puede ser con recirculación o sin recirculación, un ejemplo sin recirculación se muestra en la figura 10. Los sistemas sin recirculación se utilizan en procesos donde el agua se contamina en el proceso de calentamiento, por ejemplo en un tren de lavado de botellas, y no es posible reintroducirla en el circuito. Se puede tener sistema auxiliar conectado y acumulación.

Los sistemas con recirculación son los más frecuentes en la industria y son similares a los sistemas de calentamiento de agua en la edificación. Si existe el sistema auxiliar, se puede conectar en serie o en paralelo, de la forma que se puede observar en la Figura 11 Sistemas con sistema auxiliar en serie y en paralelo. La conexión en serie permite trabajar a los captadores a menor temperatura y por tanto con mayor rendimiento.

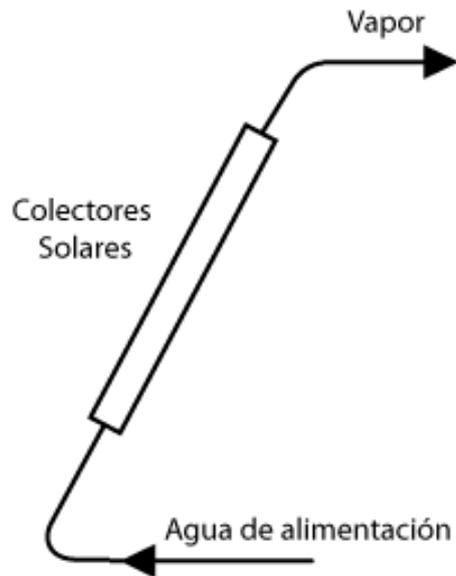


Figura 10 Sistema sin recirculación.

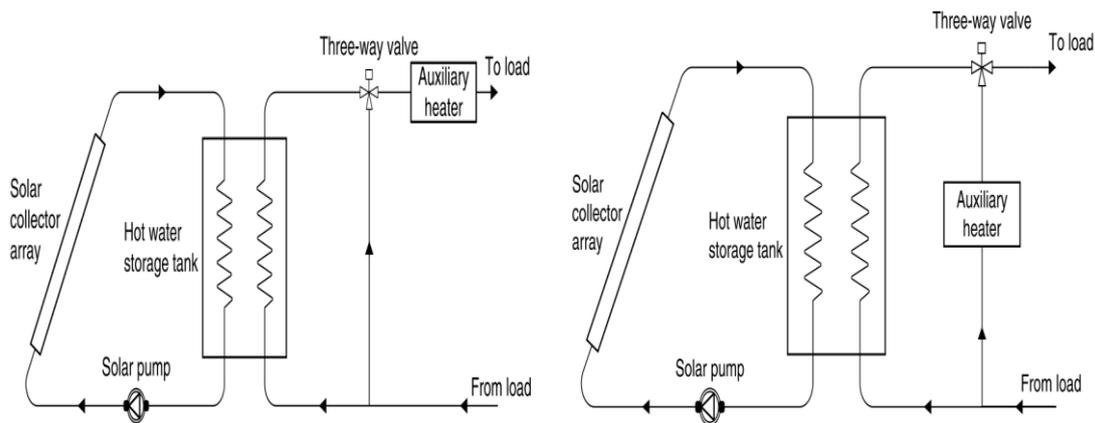


Figura 11 Sistemas con sistema auxiliar en serie y en paralelo.

Dentro de esta clasificación se puede hacer otra, dependiendo si el fluido caloportador es agua o es un aceite térmico.

Si el fluido caloportador de la instalación industrial es vapor (o agua), se utilizan captadores de concentración para generar vapor por alguno de los tres procedimientos siguientes:

- Calentamiento de agua a presión y generación de vapor en un tanque flash
- Generación directa de vapor en el sistema de captación
- Calentamiento de un aceite térmico y generación de vapor en un recuperador

En la generación de vapor en un tanque flash, se muestra un esquema en la Figura 12 Generación de vapor en un tanque flash, agua a presión se calienta en los captadores y se introduce en un tanque flash a la salida de una válvula reductora de presión. Un caudal de agua nueva tratada igual al caudal de vapor generado, se introduce en la aspiración de la bomba. La presión de trabajo en los captadores se establece de forma que no se genere vapor

en los captadores y se optimice el funcionamiento del tanque flash (aproximadamente un 10% del caudal de entrada se convierte en vapor).

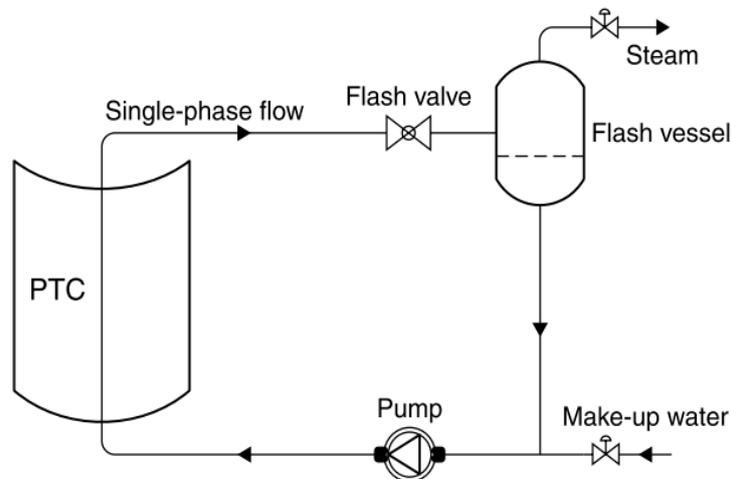


Figura 12 Generación de vapor en un tanque flash

Si el vapor se genera directamente en los captadores, la temperatura de trabajo es menor, aumentando el rendimiento, los caudales son menores y la presión de trabajo también es menor, reduciéndose el coste del sistema de transporte. Los principales inconvenientes de estos sistemas son los problemas termo-hidráulicos asociados al flujo bifásico en los tubos del receptor que pueden dar lugar a inestabilidades y a más incrustaciones en el interior de los tubos debido a la calidad del agua. Su esquema se muestra en la Figura 13 Generación de vapor en captadores solares.

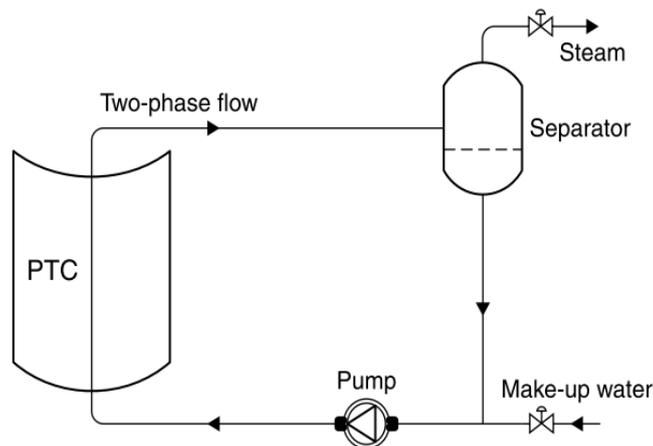


Figura 13 Generación de vapor en captadores solares

La tercera opción, se muestra un esquema en Figura 14 Generación de vapor en un recuperador, es calentar un aceite térmico en captadores sin cambio de fase, generándose el vapor en un recuperador de calor que se alimenta con el aceite térmico. El uso de este fluido caloportador permite trabajar a mayor temperatura sin aumentar la presión del circuito en el sistema de captación.

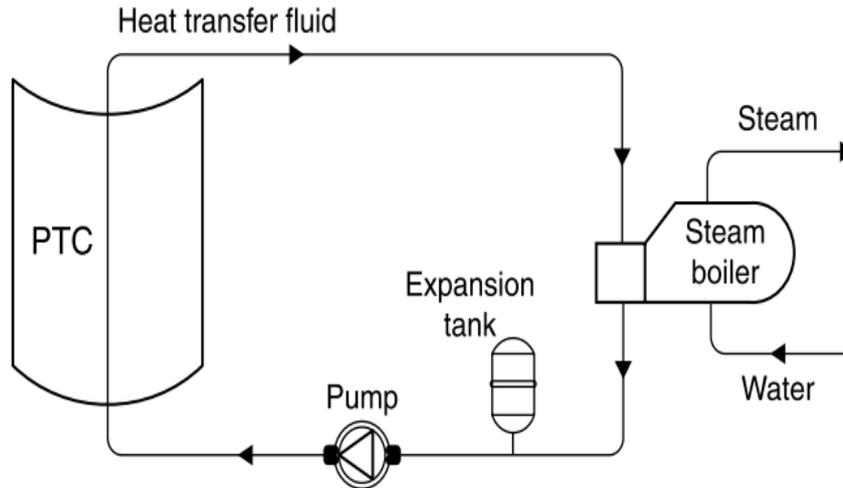


Figura 14 Generación de vapor en un recuperador

Por otro lado, hay sistemas que utilizan aceite térmico, de diferentes características, como fluido caloportador. El aceite térmico es un fluido no corrosivo, no presenta problemas de congelación, las presiones de saturación son inferiores a las del agua y el sistema de control es más simple. Estos factores hacen que actualmente, el aceite térmico sea el fluido caloportador más utilizado en las instalaciones industriales de energía solar.

Los principales inconvenientes del aceite térmico se derivan de la naturaleza del propio fluido, que se descompone cuando entra en contacto con el aire (necesitan una instalación auxiliar de nitrógeno), son inflamables, su coste es elevado y son contaminantes lo que dificulta su utilización en el sector agroalimentario. Su densidad, viscosidad, calor específico y conductividad térmica son inferiores a la del agua, lo que supone menores coeficientes de película tanto en el captador como en el recuperador, mayores caudales para la misma potencia y mayores costes de bombeo que en el caso del agua.

Como en los sistemas de generación de vapor en un tanque flash, las diferencias de temperatura son mayores en los captadores, disminuyendo el rendimiento de captación. La temperatura en captadores suele ser 20 C mayor que la de saturación del vapor. La temperatura de salida de captadores se puede controlar actuando sobre el caudal del aceite térmico.

Podemos encontrar de nuevo tres procedimientos:

- Instalación solar térmica con calentamiento indirecto de agua y acumulación de calor.
- Instalación solar térmica con generación directa de vapor y acumulación en el circuito del agua de alimentación.
- Instalación solar térmica con generación indirecta de vapor y acumulación en el circuito del agua de alimentación.

En las figuras 15, 16 y 17 se muestran los esquemas de los tres procedimientos nombrados.

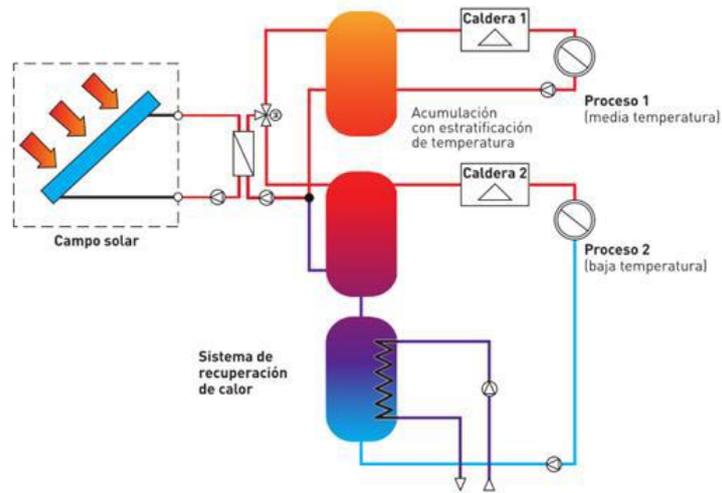


Figura 15 Instalación solar térmica con calentamiento indirecto de agua y acumulación de calor

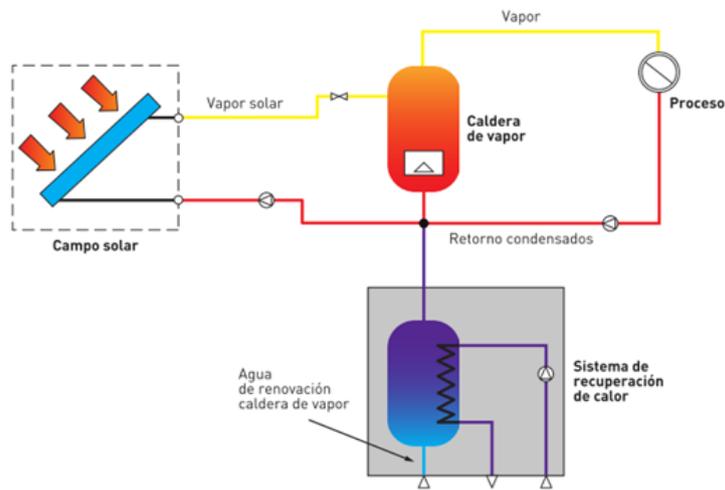


Figura 16 Instalación solar térmica con generación directa de vapor y acumulación en el circuito del agua de alimentación

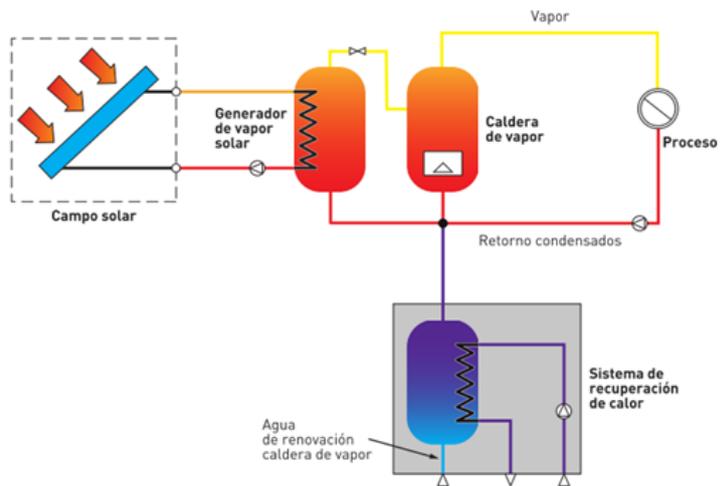


Figura 17 Instalación solar térmica con generación indirecta de vapor y acumulación en el circuito del agua de alimentación.

### 2.4.2 Sistemas con aire como fluido caloportador.

En las instalaciones con captadores solares de aire, ver figura 18, el circuito del sistema de captación puede ser con recirculación o sin recirculación. Los sistemas sin recirculación se utilizan en procesos donde el aire se contamina en el proceso (secaderos, cabinas de pulverización de pintura, etc). El aire ambiente exterior entra directamente en el captador o después de un recuperador de calor del aire de salida del proceso. El rendimiento del sistema de captación aumenta al trabajar a temperaturas próximas al ambiente.

En los sistemas con recirculación, una mezcla de aire de salida del proceso y aire ambiente se calienta en el sistema de captación. El aire caliente se suministra al proceso (calefacción de naves, procesos de secado que no contaminan el aire, etc). En un secadero, el proceso de secado se puede controlar actuando sobre la mezcla del aire exterior y el aire recirculado, controlando la temperatura y humedad del aire de entrada al secadero.

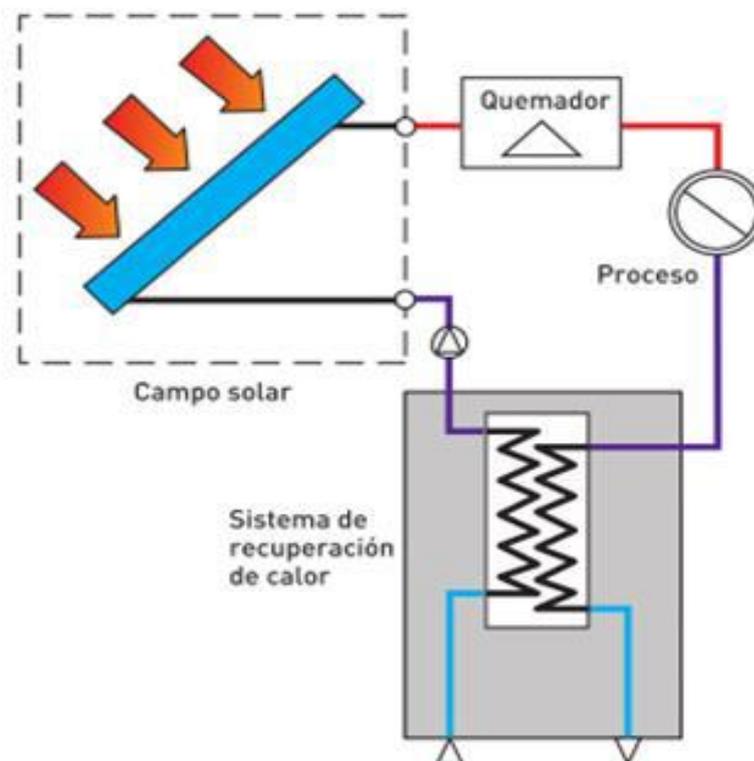


Figura 18 Sistema solar que utiliza aire como fluido caloportador.

El secado solar es una de las aplicaciones más extendidas de la energía solar en el sector agroalimentario. El secadero solar puede funcionar con o sin sistema auxiliar y el aire puede circular por convección natural (sistema pasivo) o por la acción de un ventilador (sistema activo). En las figuras 19 y 20 se muestra los esquemas de secadero solar activo y Secadero solar pasivo respectivamente.

En el proceso de secado el producto se calienta por el aire caliente que circula a través del producto, por la radiación solar que incide directamente sobre el producto o por una combinación de ambos.

En las figuras 19 y 20 se muestra los esquemas de secadero solar activo y Secadero solar pasivo respectivamente.

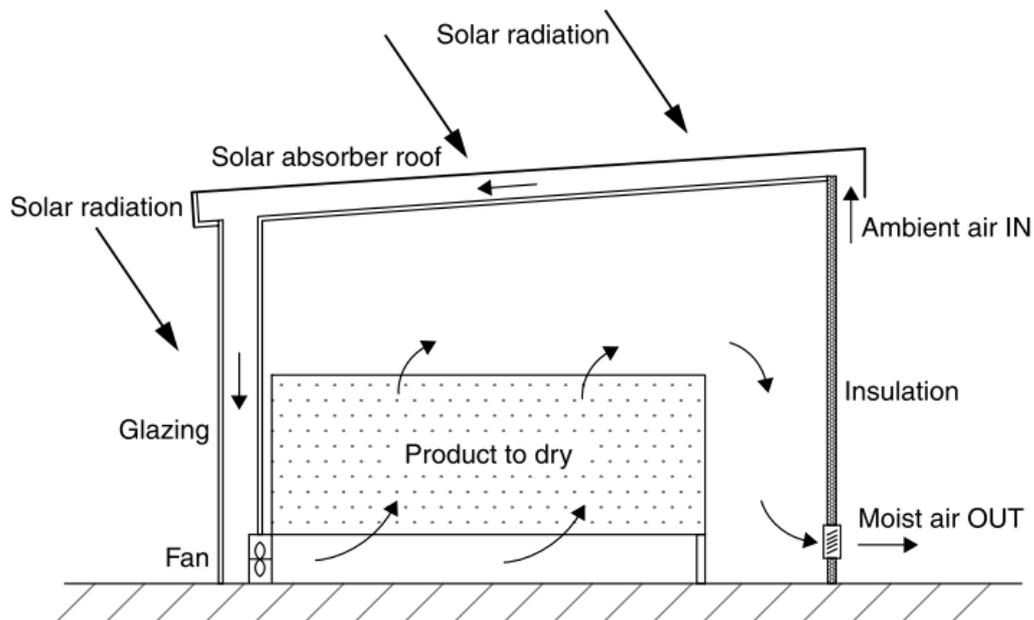


Figura 19 Secadero solar activo

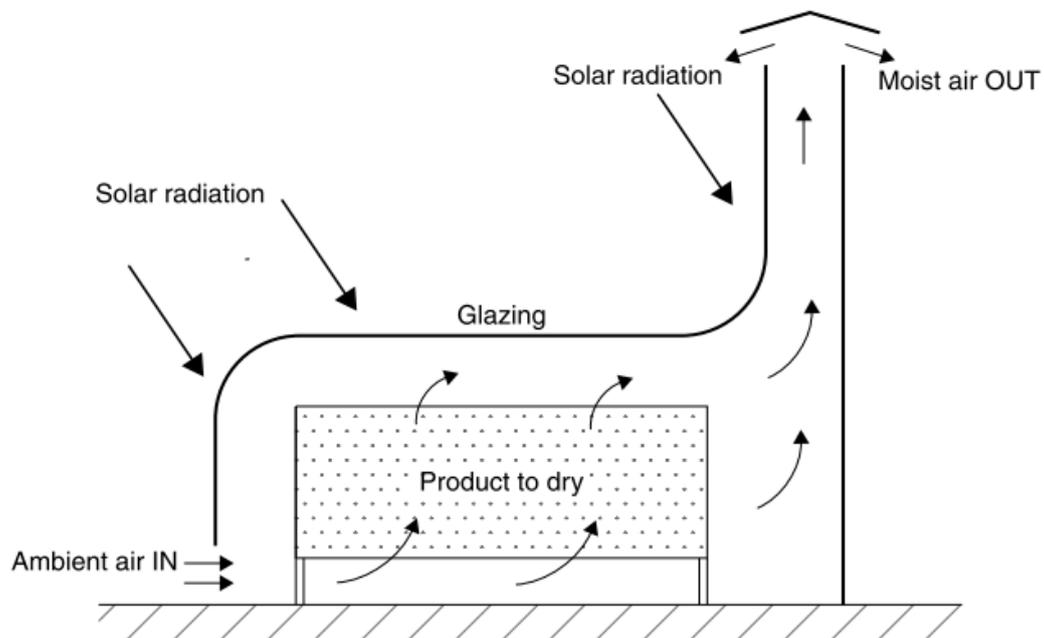


Figura 20 Secadero solar pasivo

## 2.5 Tipologías e integración en la industria.

El objetivo de la integración es identificar el nivel de integración más favorable de la energía solar en la industria y el concepto de integración más eficaz. Debido a la complejidad de los procesos industriales, tanto en la generación como en la distribución y consumo, la integración no es una tarea trivial.



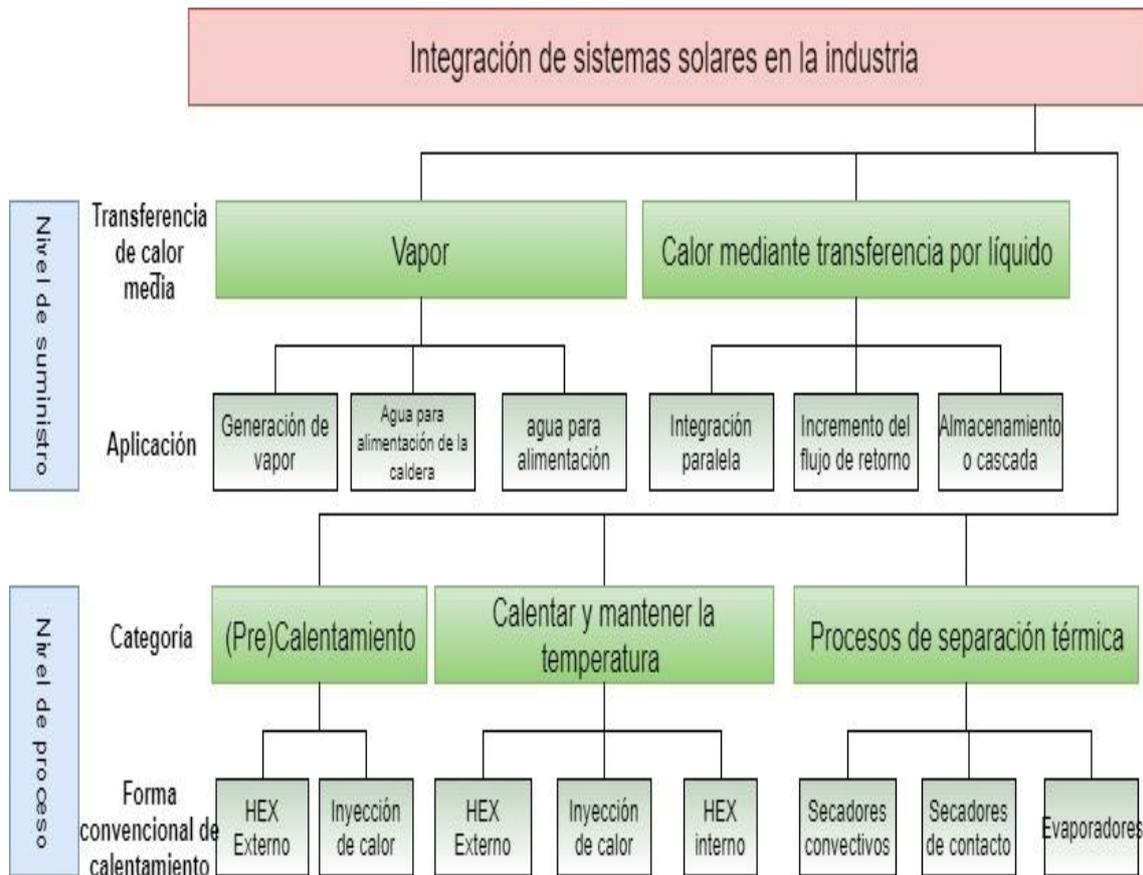


Figura 22 Niveles de integración.

A nivel de proceso se establece una primera clasificación en función del tipo de proceso; precalentamiento de una corriente de fluido, calentamiento de un baño, maquinaria o depósito y procesos térmicos de separación. Una segunda clasificación se realiza en función del modo de calentamiento; HEX externo o interno, inyección de vapor, secado convectivo o por contacto y evaporación.

En general, el concepto de integración en el proceso industrial debe cumplir los requerimientos del punto de integración a nivel de temperatura, potencia térmica, etc. Al mismo tiempo el sistema solar se debe diseñar con un coste reducido y máximo rendimiento.

El punto de integración de la instalación solar con la instalación convencional puede ser un HEX, una válvula o simplemente una tubería en T. En las instalaciones de baja temperatura con almacenamiento se distinguen cuatro secciones que se conectan a través del punto de integración con el sistema convencional. En el caso de instalaciones sin acumulación, como la generación directa de vapor, solo existen la sección de captación y el punto de integración. En la figura 23 están cada una de las secciones de una instalación.

En el punto de integración hay que fijar la temperatura de retorno del punto de integración (integration return temperature), la temperatura de entrada al punto de integración (integration flow temperature) y la temperatura de entrada al proceso (process flow temperature) o temperatura del proceso (process temperature).

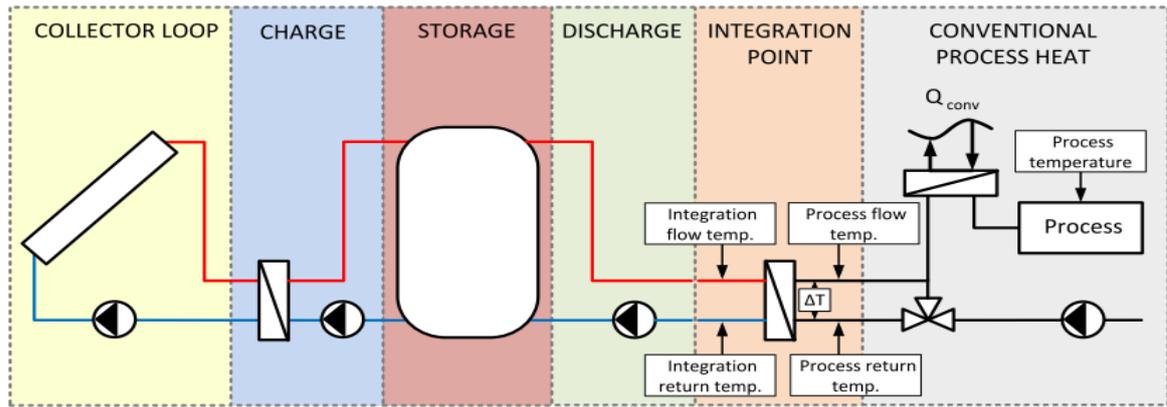


Figura 23 Secciones en un sistema con almacenamiento

Ejemplos de conceptos de integración a diferentes niveles de integración se muestran de la figura 24 a la 29.

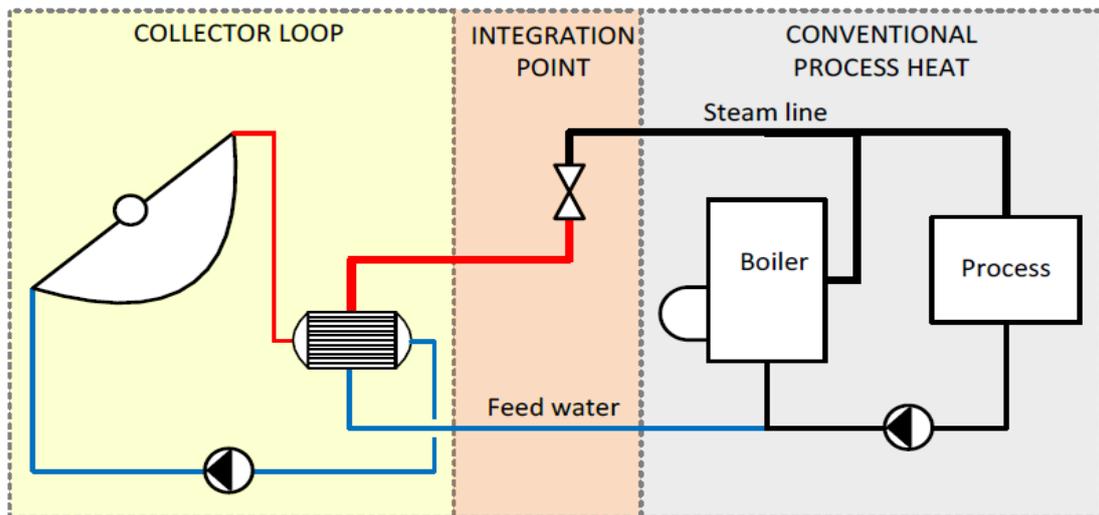


Figura 24 Generación indirecta de vapor

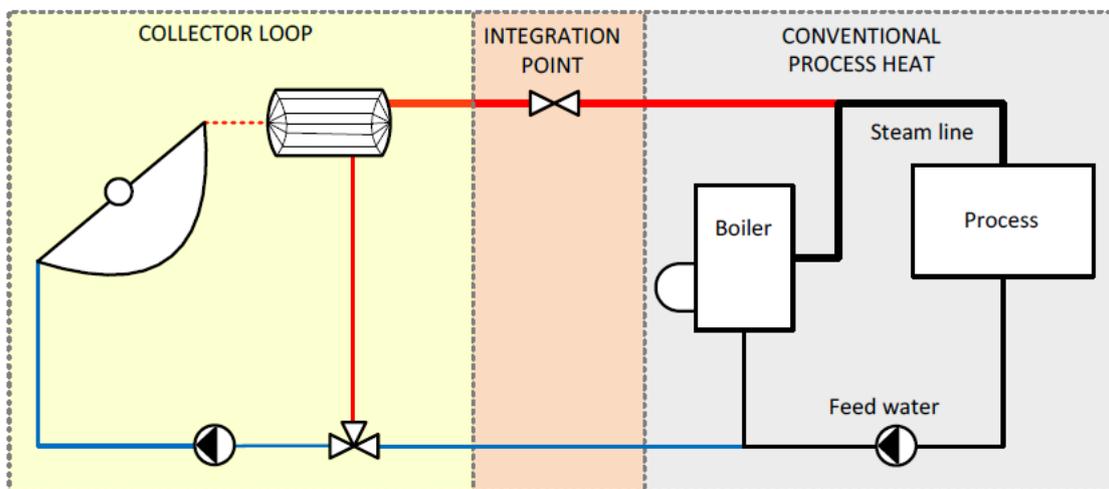


Figura 25 Generación directa de vapor

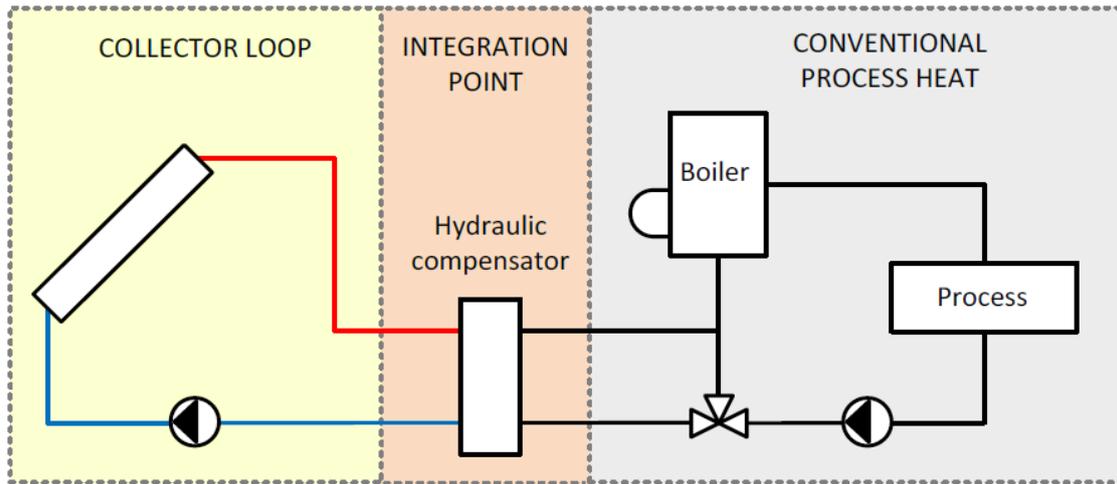


Figura 26 Calentamiento directo de agua

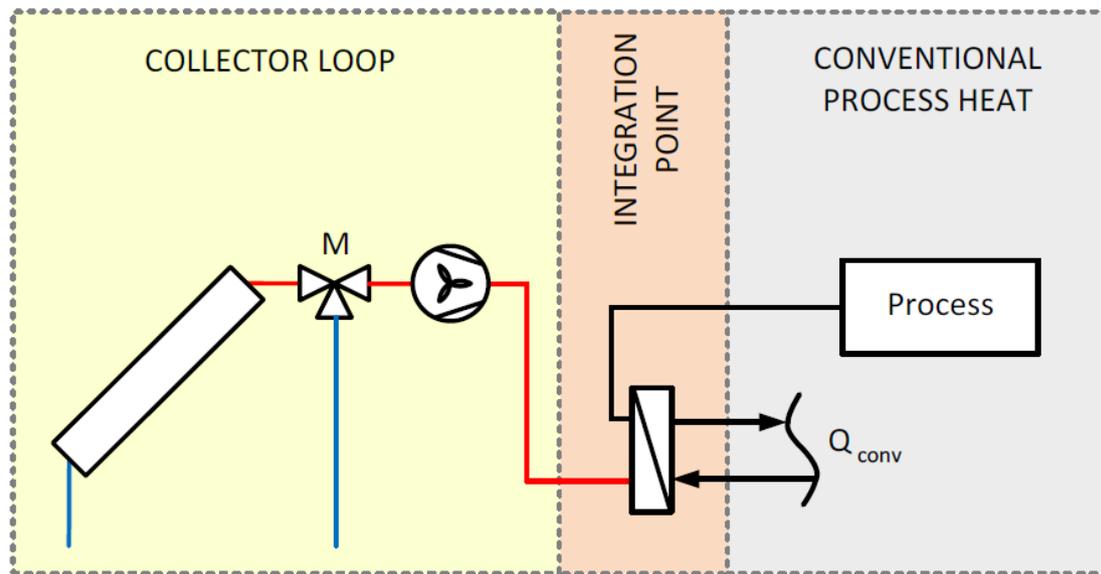


Figura 27 Pre calentamiento de aire

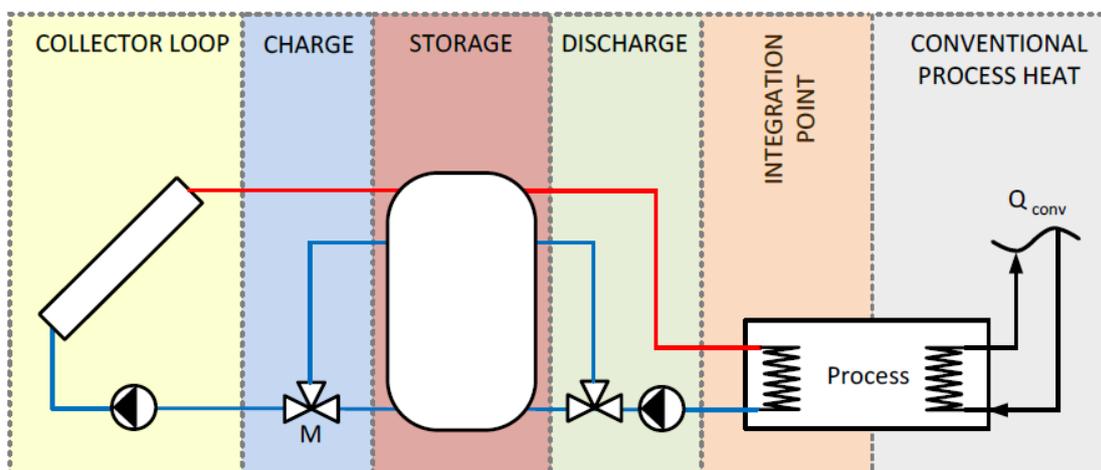


Figura 28 Calentamiento indirecto de un baño o depósito

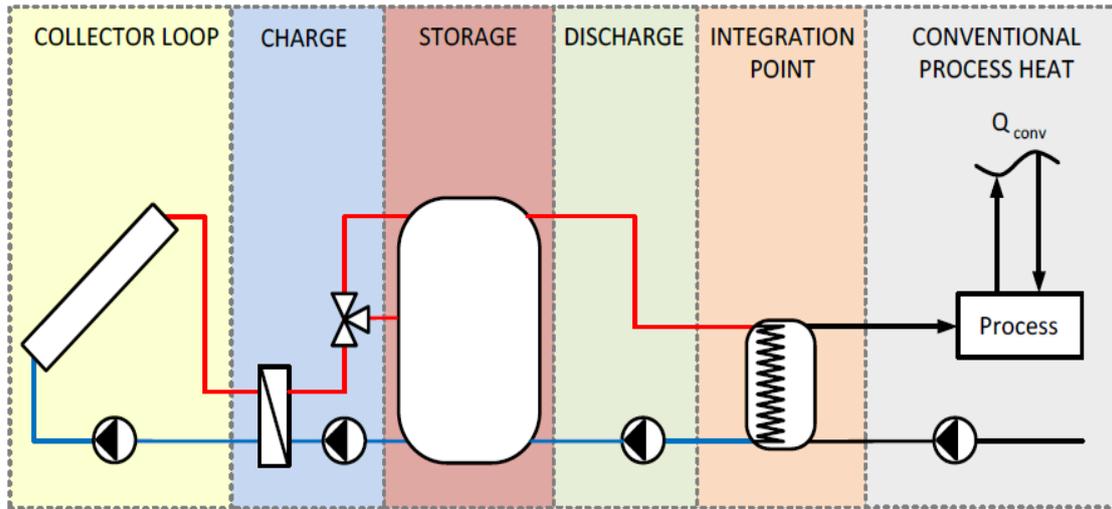


Figura 29 Calentamiento de un fluido de proceso en un depósito de precalentamiento

Los conceptos de integración anteriores en los dos niveles de integración (generación y proceso) se pueden desarrollar en diferentes esquemas de principio de las instalaciones correspondientes con el resto de equipos de la instalación, los cuales están detallados en las figura de la 30 a la 40.

- **Sistema de calentamiento directo en el sistema de generación de vapor**

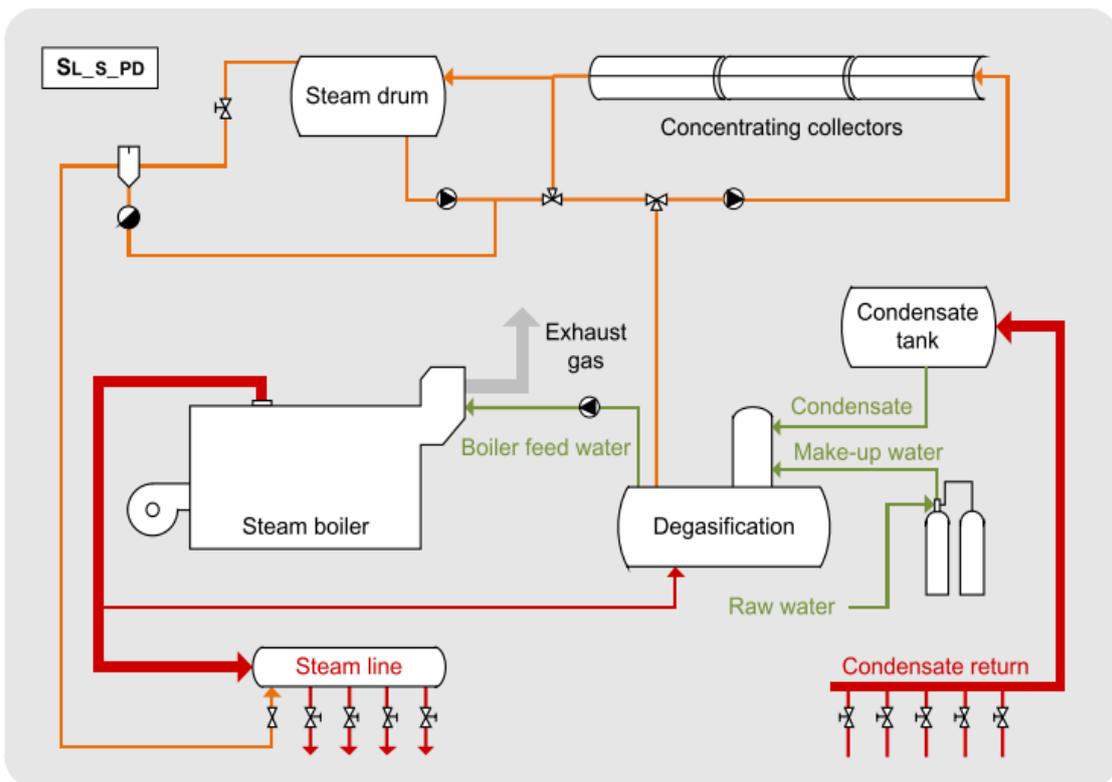


Figura 30 Sistema de calentamiento directo en el sistema de generación de vapor

- Sistema de calentamiento directo en paralelo en el sistema de generación de vapor

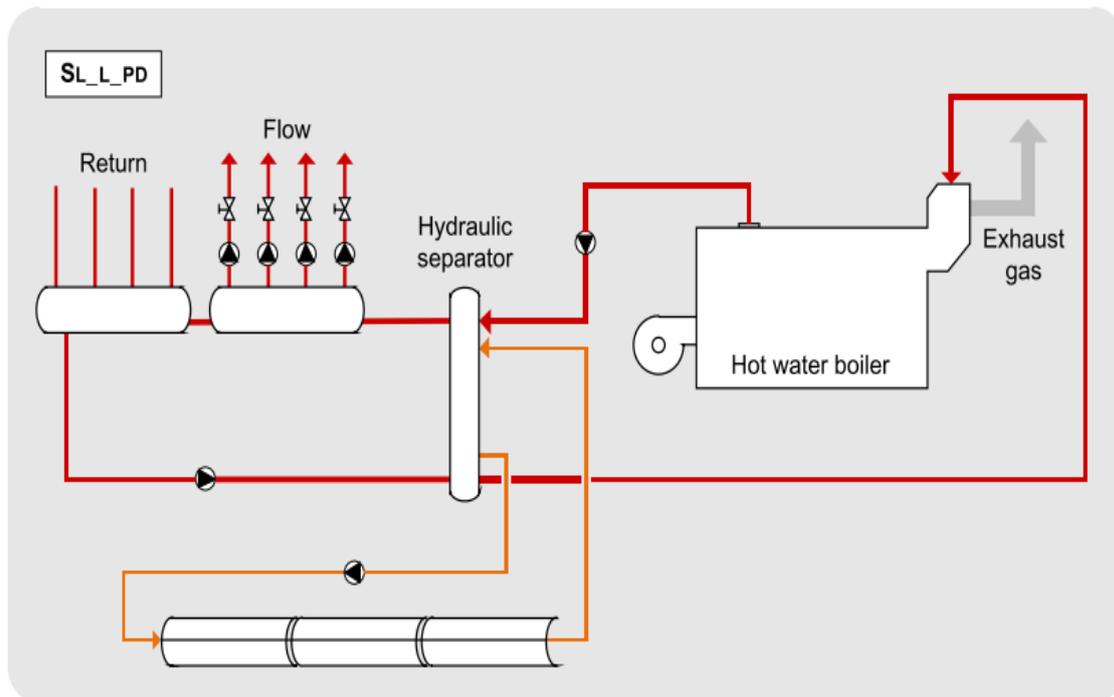


Figura 31 Sistema de calentamiento directo en paralelo en el sistema de generación de vapor

- Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de generación de vapor

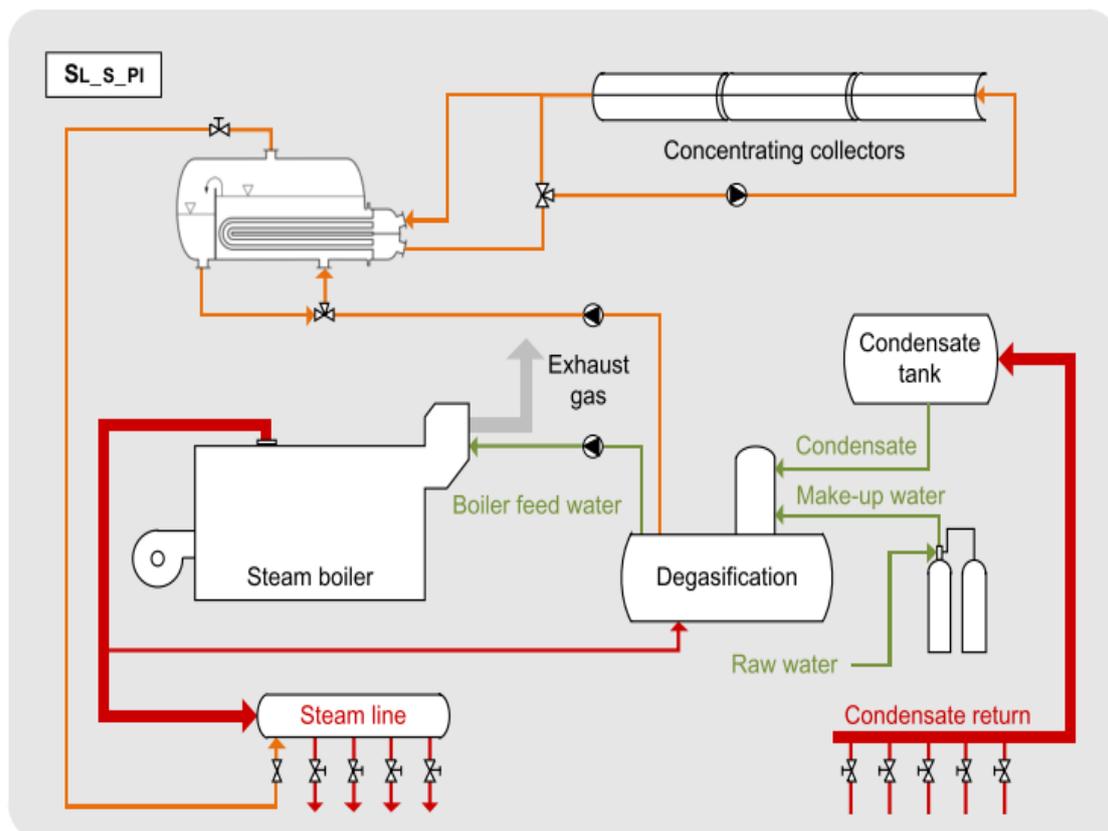


Figura 32 Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de generación de vapor

- Sistema de calentamiento indirecto para precalentar el agua de alimentación

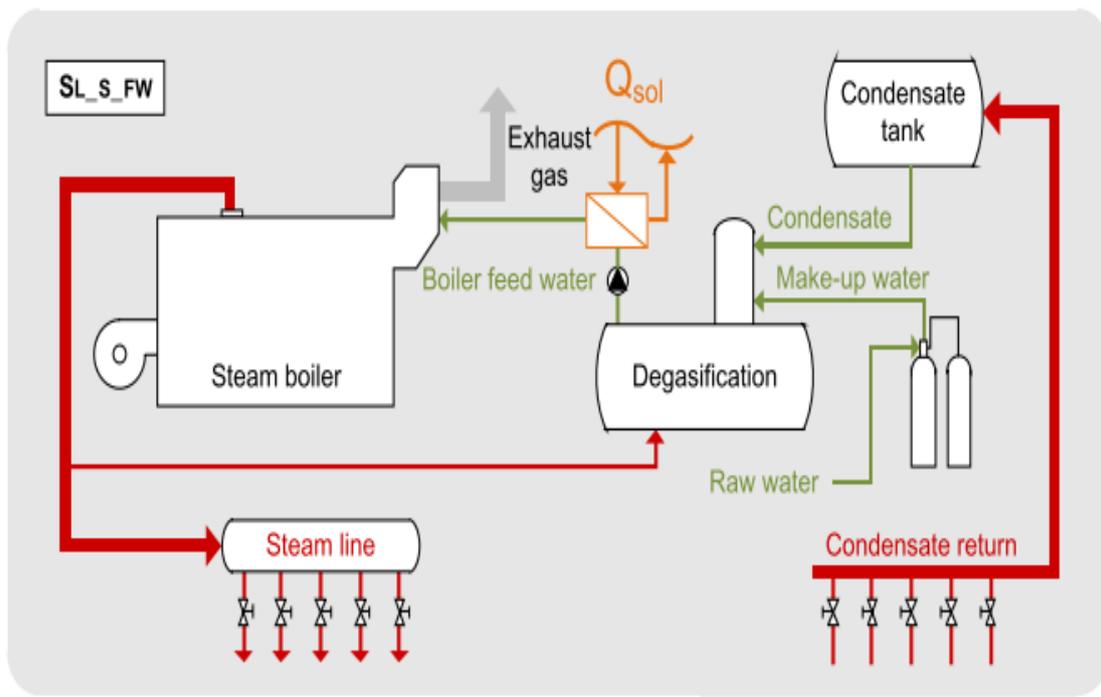


Figura 33 Sistema de calentamiento indirecto para precalentar el agua de alimentación

- Sistema de calentamiento indirecto para precalentar el agua de reposición

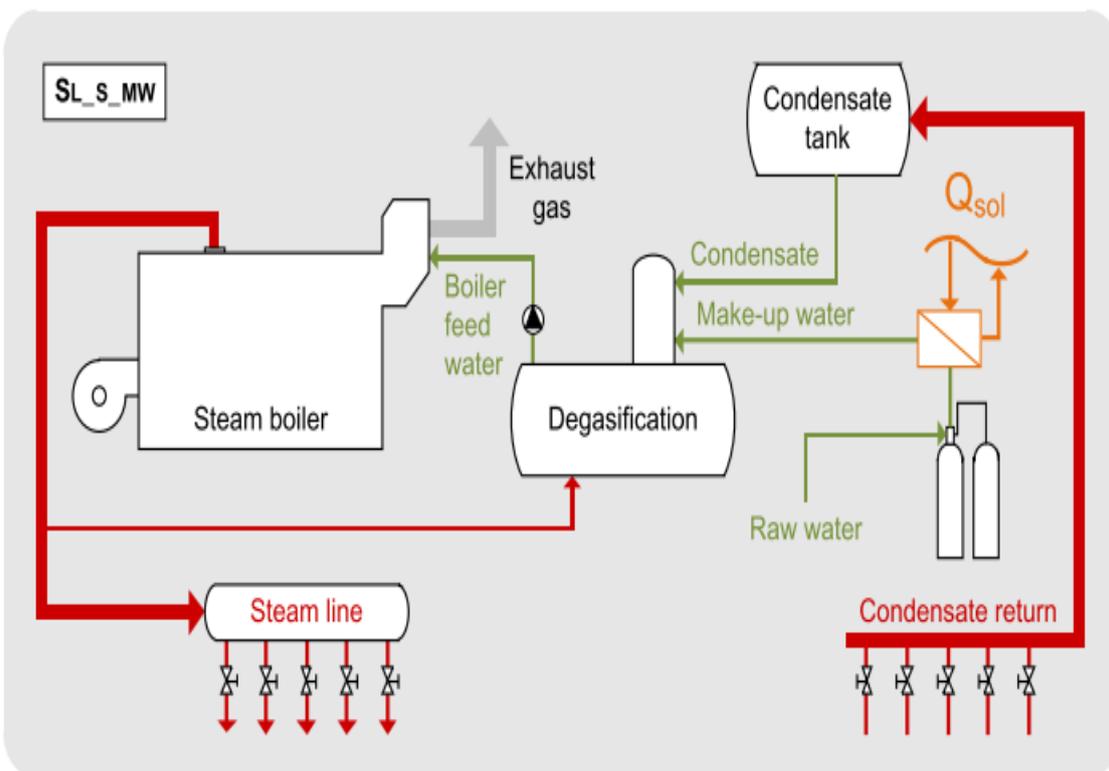


Figura 34 Sistema de calentamiento indirecto para precalentar el agua de reposición

- Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de distribución

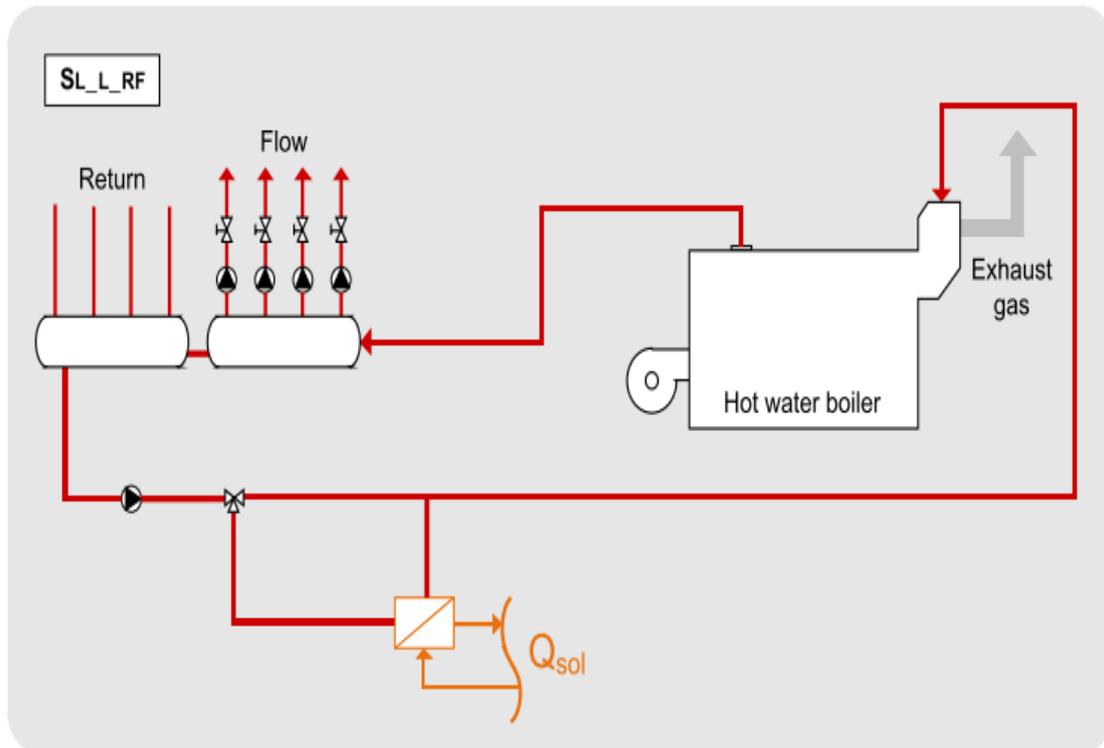


Figura 35 Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de distribución

- Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de distribución con una instalación solar de baja temperatura y bomba de calor

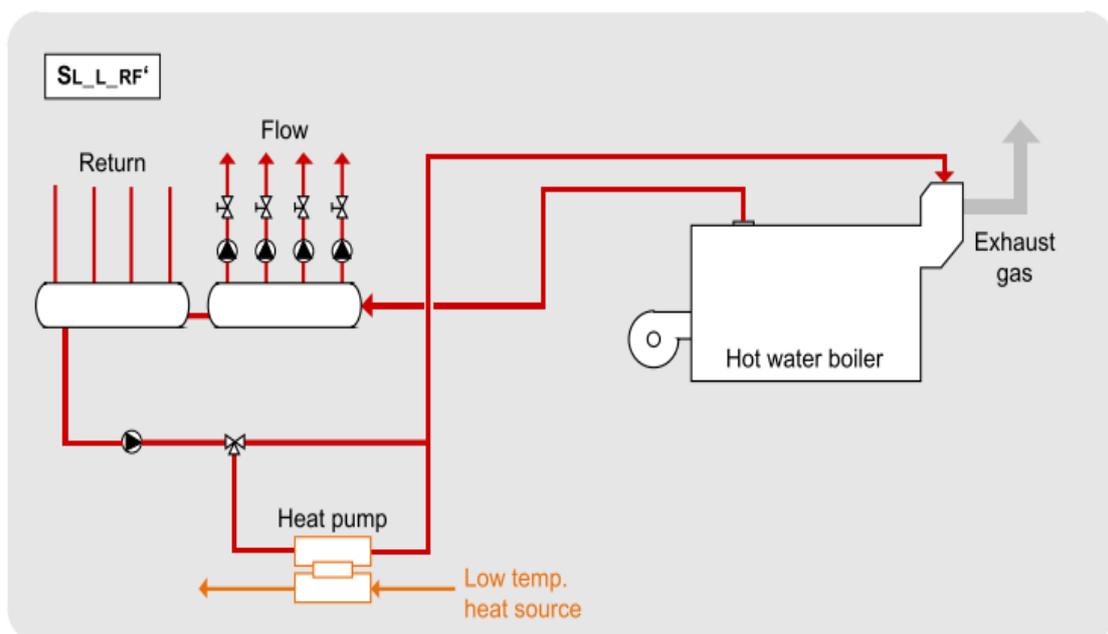


Figura 36 Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de distribución con una instalación solar de baja temperatura y bomba de calor

- Sistema de calentamiento indirecto con HEX externo al proceso industrial

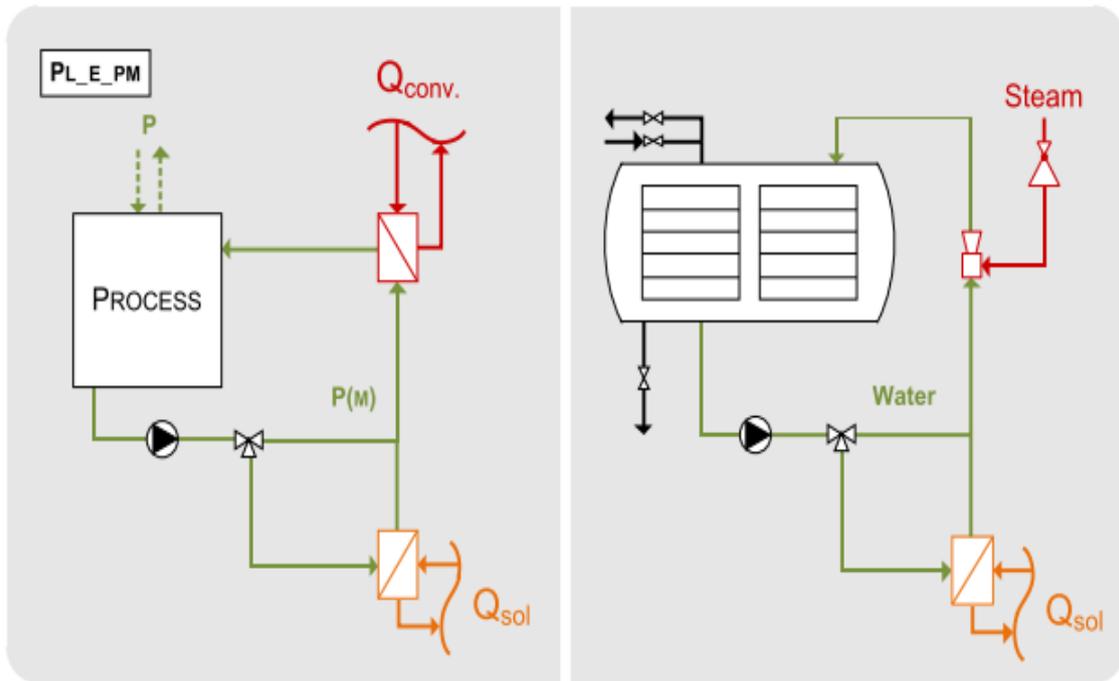


Figura 37 Sistema de calentamiento indirecto con HEX externo al proceso industrial

- Sistema de calentamiento indirecto con HEX externo en el circuito del agua de calentamiento del proceso industrial

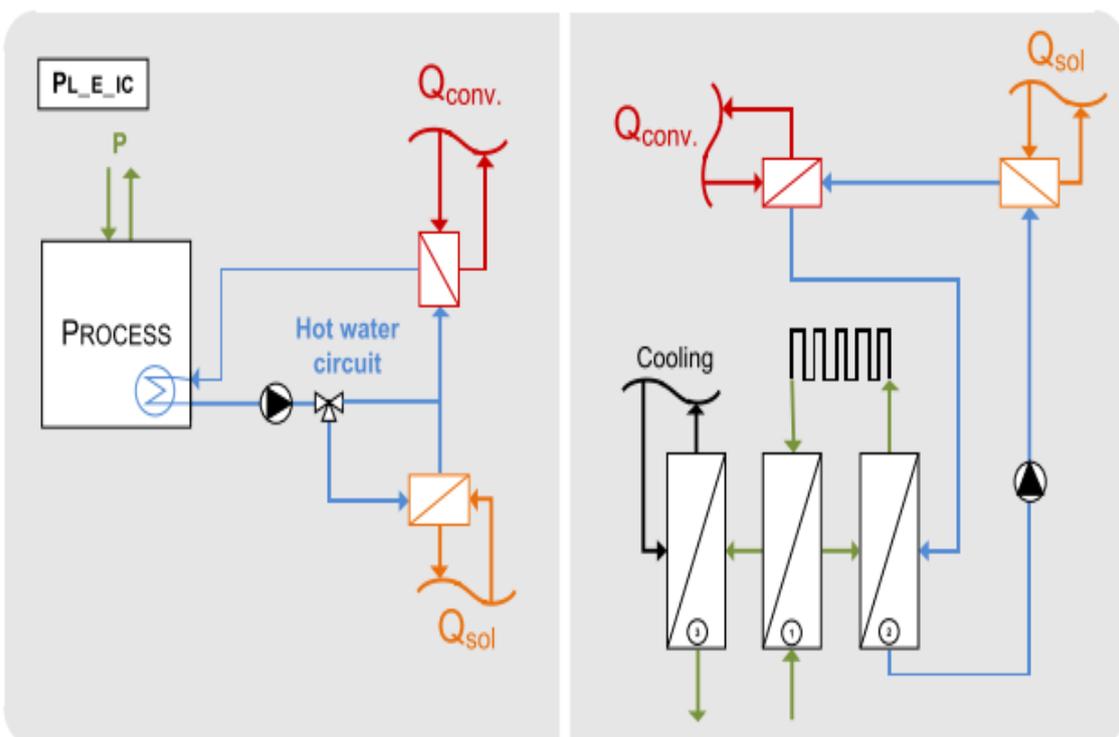


Figura 38 Sistema de calentamiento indirecto con HEX externo en el circuito del agua de calentamiento del proceso industrial

- Sistema de calentamiento indirecto con HEX externo en el circuito del producto**

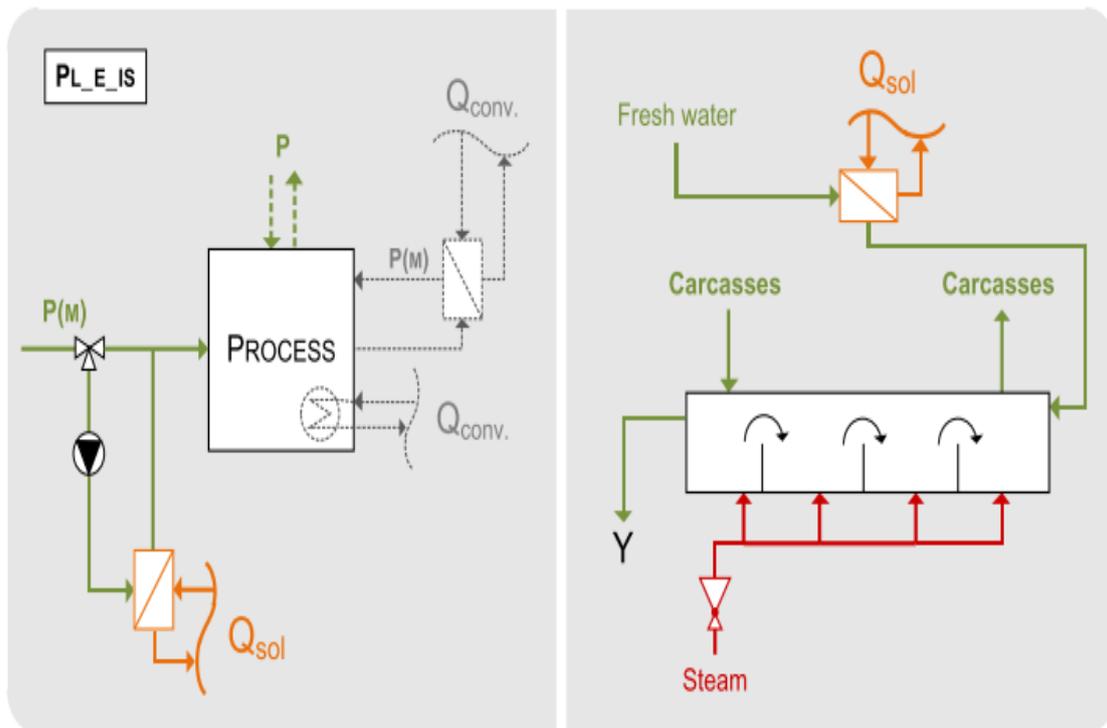


Figura 39 Sistema de calentamiento indirecto con HEX externo en el circuito del producto

- Sistema de calentamiento indirecto con HEX interno en el proceso**

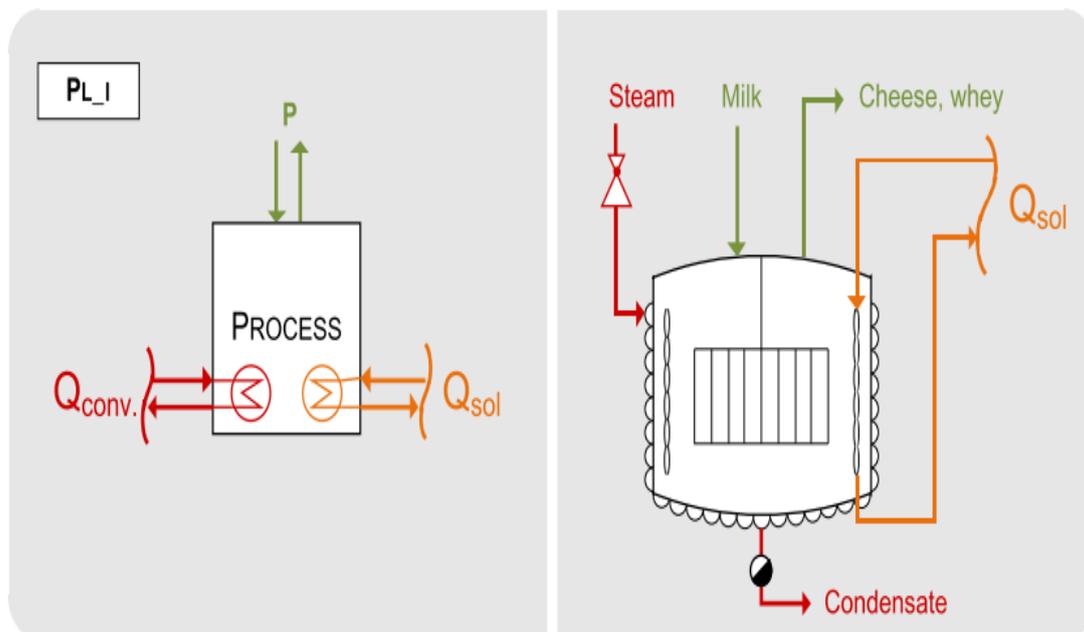


Figura 40 Sistema de calentamiento indirecto con HEX interno en el proceso

## 2.6 Sectores industriales y aplicaciones.

Con un calor de baja y media temperatura que representa el 45% del uso total del calor del proceso industrial, los sistemas solares térmicos tienen un gran potencial (IRENA, 2014b). La tecnología solar térmica también puede proporcionar una alternativa a los procesos de enfriamiento en sectores, como el sector de alimentos y tabaco, donde la mayoría del enfriamiento de productos se hace actualmente por enfriadores eléctricos (IEA, 2007a; Taibi et al., 2012).

Casi toda la demanda de calor del proceso industrial requiere calor en rangos de temperatura que pueden ser proporcionados por un sistema solar térmico. Las aplicaciones típicas y los sectores más prometedores de la industria adecuados para sistemas solares térmicos para aplicaciones industriales se enumeran en la Tabla 3 Aplicaciones de procesos industriales. La mayoría de las aplicaciones se encuentran en los rangos de temperatura baja a media.

| Sector industrial  | Proceso                        | Nivel térmico (°C) |
|--------------------|--------------------------------|--------------------|
| Alimentación       | Secado                         | 30 - 90            |
|                    | Lavado                         | 40 - 80            |
|                    | Pasteurización                 | 80 - 110           |
|                    | Evaporación                    | 95 - 105           |
|                    | Esterilización                 | 140 - 150          |
|                    | Tratamiento térmico            | 40 - 60            |
| Textil             | Lavado                         | 40 - 80            |
|                    | Blanqueo                       | 60 - 100           |
|                    | Tintura                        | 100 - 160          |
| Papel              | Blanqueo                       | 130 - 150          |
| Químico            | Evaporación                    | 95 - 105           |
|                    | Destilación                    | 110 - 300          |
|                    | Calentamiento de procesos      | 120 - 180          |
|                    | Petroquímica                   | 100 - 150          |
| Madera             | Preparación de pulpa           | 120 - 170          |
| Minero             | Secado                         | 100-400            |
|                    | Fundición del concentrado      |                    |
|                    | Calentamiento de soluciones    |                    |
|                    | Lavado                         |                    |
| Plástico           | Preparación                    | 120 - 140          |
|                    | Mezclado                       | 120 - 140          |
|                    | Destilación                    | 140 - 150          |
|                    | Extensión                      | 140 - 160          |
|                    | Secado                         | 180 - 200          |
|                    | Separación                     | 200 - 220          |
| Todos los sectores | Precalentamiento agua          | 30 - 100           |
|                    | Calefacción de naves y locales | 30 - 80            |

Tabla 3 Aplicaciones de procesos industriales

Un porcentaje extremadamente alto de demanda de calor en el rango de baja temperatura se encuentra en alimentos, bebidas, papel y textiles con rangos de temperatura media en las

industrias de plásticos y productos químicos. Estas industrias requieren más del 50% de su calor de proceso total en el rango de temperatura de hasta 250 ° C para aplicaciones tan diversas

Como el secado, la cocción, la limpieza, la extracción y muchos otros. Como el secado, la cocción, la limpieza, la extracción y muchos otros.

Las industrias de papel y alimentos tienen la mayor demanda de calor. Existe también una demanda considerable de calor en las industrias textil y química.

Los mercados y los sectores geográficos para de procesos solares térmicos están cambiando rápidamente. Una visión general: en 2007 se identificaron alrededor de 80 proyectos de FPC y ETC convencionales, principalmente en los sectores de alimentos y bebidas (por ejemplo, secado, lavado, pasteurización) y textil (por ejemplo, lavado y blanqueado) (Vannoni, 2007, Hess y Oliva, 2010, Weiss, 2010, Hennecke, 2012). Austria, con aproximadamente 20 proyectos, seguida por Alemania, Grecia, Italia, España y Estados Unidos (con alrededor de 10 proyectos cada uno) fueron los países con el mayor número de instalaciones en 2007.

Siete años más tarde, se abandonaron algunos proyectos (por ejemplo, dos sistemas de por procesos solares térmicos en una planta de procesamiento de aves y textiles en Egipto) (UNEP, 2010), mientras que el despliegue en China (diez proyectos), Francia (18 proyectos), México (Proyectos) y, lo que es más importante, la India (86 proyectos) ha aumentado. A finales de 2012, la India tenía 7 967 m<sup>2</sup> de sistemas de concentradores solares para la refrigeración solar y un total de 27 972 m<sup>2</sup> de sistemas basados en concentradores solares para aplicaciones industriales térmicas (REN21, 2014). La planta solar térmica más grandes de hoy en día son la planta termosolar de 32 MW<sub>th</sub> en una mina de cobre en Chile (inaugurada en octubre de 2013), que abastece alrededor del 85% de la demanda de calor, seguida de un sistema de 9 MW<sub>th</sub> para una planta textil desarrollada en 2008 en China, seguido por una planta de procesamiento de alimentos de 5,5 MW<sub>th</sub> desarrollada en 2012 en los Estados Unidos.

En 2013, la India fue el país líder y el 61% de su capacidad solar térmica se utilizó para procesos industriales (incluida la cocina comunitaria); En total, se instalaron 78 aplicaciones comerciales de concentradores solares (todos los captadores parabólicos) (88% para la cocción solar) (Sun & Wind Energy, 2014). Además, en la actualidad hay alrededor de ocho proyectos que utilizan captadores FPC, ETC y Fresnel lineal para calefacción por proceso solar (AEE INTEC & PSE, 2014). Como el productor de leche más grande del mundo, el sector lácteo de la India es también una de las áreas de aplicación más interesantes, donde hasta el 13% del calor del proceso podría ser suministrado por energía solar térmica (GIZ, 2011). De las diez primeras empresas que suministran plantas de calefacción de proceso solar, cuatro son proveedores de platos parabólicos de la India. Un importante motor para el despliegue de concentradores solares en la India son las subvenciones de capital (hasta un 60%) proporcionadas por el Gobierno de la India y un proyecto UNDP-GEF (Sun Focus, 2014). Además, Oriente Medio y la Península Arábiga son vistos como mercados de crecimiento potencial (Sun & Wind Energy, 2014). Por ejemplo, una aplicación interesante es el uso del calor solar térmico en la recuperación de petróleo (GlassPoint, 2013; Scheuerer, 2013).

Basándose en una evaluación global de los requisitos de calefacción de procesos, IRENA ha estimado un potencial total de energía solar térmica de 15 EJ (de 160 EJ de demanda total de energía de proceso en 2030) (IRENA, 2014b). Las nuevas inversiones en capacidad que se producen entre 2010 y 2030 ofrecen un importante potencial para el despliegue de las tecnologías de energía renovable.

El sector químico representa la mitad de este potencial debido al hecho de que dos tercios de la capacidad existente llegarán al final de su vida útil antes de 2030, lo que proporcionará la oportunidad de integrar la capacidad térmica del proceso solar térmico junto con la nueva construcción. Además, el sector químico tiene una alta participación en la demanda de calor de baja y media temperatura en sus procesos de producción (> 50%). La pulpa y el papel, los alimentos y el tabaco y otros sectores pequeños representan el resto del potencial térmico solar (es decir, sectores con altas proporciones de demanda de calor de baja y media temperatura en sus procesos de producción). En términos de capacidad, esto significa un crecimiento de 93 MW<sub>th</sub> en 2014 a alrededor de 850 GW<sub>th</sub> en 2030 (casi 10 000 veces más capacidad) para cumplir este potencial. 700 GW<sub>th</sub> de los 850 GW<sub>th</sub> estarían ubicados en países no pertenecientes a la OCDE (IRENA, 2014b). Sin reducciones de costos considerables y continuos subsidios a combustibles fósiles para la industria, el potencial global se aproxima a 470 GW<sub>th</sub>.

El potencial económicamente realizable, sin embargo, es mucho menor. Considerando los precios de los combustibles fósiles y las curvas de aprendizaje de la tecnología para el calor del proceso solar, IRENA estima que 3.3 EJ (~ 180 GW<sub>th</sub>) de este potencial se puede desplegar de manera rentable si los costos de tecnología para las tecnologías de calentamiento solar continúan disminuyendo, 30 GW<sub>th</sub>) si los precios se mantienen en niveles actuales. Esto equivale a un 3-20% de la demanda de temperatura baja y media de calor de las plantas adicionales construidas entre 2010 y 2030 (IRENA, 2014b). Para 2050, se ha estimado un potencial de 5,6 EJ (~ 300 GW<sub>th</sub>) (ONUUDI, 2011).

El potencial de calentamiento del aire solar se limita principalmente a la industria alimentaria y de tabaco, aunque también se utiliza en la producción de ladrillos. Sin embargo, todavía puede proporcionar ahorros de energía suficientes si los combustibles fósiles son reemplazados. Típicamente, se usan alrededor de 5-25 GJ por tonelada métrica (GJ/t) de producto seco en procesos de secado convencionales. Las necesidades energéticas para el secado de carne o pescado primario son más altas; En el intervalo de 17-25 GJ por tonelada de producto seco debido a pérdidas de calor. Si se utiliza energía fósil, ésta puede ascender como mínimo a 100 USD por tonelada métrica de producto.

Se estima que el potencial de enfriamiento solar estará en el rango de 0,1 EJ para 2030, reemplazando principalmente la refrigeración eléctrica en los sectores de alimentos y tabaco (IRENA, 2014b). El enfriamiento térmico solar en las islas, por ejemplo, podría proporcionar el almacenamiento de refrigeración térmica necesario para el sector agrícola y la industria pesquera (IRENA, 2012b). Para el año 2050, la AIE estima que el enfriamiento solar podría alcanzar una contribución de 1,5 EJ por año desde una capacidad instalada de más de 1 000 GW<sub>th</sub> para refrigeración, representando casi el 17% del uso de energía para el enfriamiento en 2050 (IEA, 2012).

## 2.7 Proyectos más importantes

En junio de 2013 se puso en marcha la aplicación de calor de proceso solar más grande del mundo. La instalación tiene una capacidad de pico térmico de 27,5 MWth y un área total de 39,300 m<sup>2</sup> de captadores de placa plana conectados a un almacenamiento térmico de 4,000 m<sup>3</sup>. El sistema solar térmico está diseñado para cubrir el 85% de la demanda de calor del proceso necesaria para refinar el cobre en la mina de cobre Gaby de la empresa minera estatal Codelco<sup>11</sup>.

Hay otras dos grandes plantas solares para uso industrial, un sistema en los Estados Unidos y el otro en China. Probablemente la aplicación de calor de proceso solar más grande en los EE. UU. Se encuentre en la instalación de proceso de Prestage Foods en Carolina del Norte. El sistema solar térmico de 5,5 MWth (7,804 m<sup>2</sup>), instalado en abril de 2012, está equipado con captadores de placa plana que suministran agua caliente a una planta de procesamiento de pavo, lo que reduce el uso de gas propano. En China, la mayor aplicación de calor del proceso solar está conectada a una fábrica de molinos de tejer y morir. El sistema, con una capacidad máxima térmica de 9.1 MWth (13,000 m<sup>2</sup>), se construyó en 2008 en la ciudad de Hangzhou, provincia de Zhejiang.

En las tablas 4 a la 10 y la figuras de la 41 a la 47 se muestran algunos de los proyectos más importantes que actualmente están operando en el mundo junto con sus principales características (País, sector, año de inicio de operación, tecnología de captación, área de captación (m<sup>2</sup>), potencia térmica instalada (kW<sub>th</sub>), uso, punto de integración y rango de temperatura).

- **Codelco Gabriela Mistral**

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| País   | Chile                            |
| Sector   | Minería                          |
| Año de inicio de operación                                 | 2013                             |
| Tecnología de captación                                    | Captador plano                   |
| Área de captación (m <sup>2</sup> )                        | 39300                            |
| Potencia térmica instalada(estimación) (kW <sub>th</sub> ) | 27510                            |
| Uso  | Proceso de electroinyección      |
| Punto de integración (Figura 21)                           | B1 Directamente a proceso        |
| Rango de temperatura del proceso (°C)                      | Mantener el electrolito a 50 ° C |

Tabla 4 Características Codelco Gabriela Mistral



Figura 41 Codelco Gabriela Mistral

- **Daly Textile**

|  |   |
|--|---|
| País   | China   |
| Sector   | Textil  |
| Año de inicio de operación                                 | 2007  |
| Tecnología de captación                                    | Captador plano                                  |
| Área de captación (m <sup>2</sup> )                        | 13000   |
| Potencia térmica instalada(estimación) (kW <sub>th</sub> ) | 9000  |
| Uso  | Calentamiento de agua para el proceso de teñido |
| Punto de integración (Figura 21)                           | C) otro punto de integración                    |
| Rango de temperatura del proceso (°C)                      | 20-60 (La mayoría del tiempo a 55 °C)           |

Tabla 5 Características Daly Textile



Figura 42 Daly Textile

- **Ruyi Textile**

|  |  |
|--|--|
| País   | China                                  |
| Sector   | Textil                                 |
| Año de inicio de operación                                 | 2015                                   |
| Tecnología de captación                                    | Tubo de vacío                          |
| Área de captación (m <sup>2</sup> )                        | 9903                                   |
| Potencia térmica instalada(estimación) (kW <sub>th</sub> ) | 6932.1                                 |
| Uso  | Proceso de teñido y ducha trabajadores |
| Punto de integración (Figura 21)                           | B2) Proceso medio                      |
| Rango de temperatura del proceso (°C)                      | 60 °C                                  |

Tabla 6 Características Ruyi Textile



Figura 43 Ruyi Textile

- **Jiangsu Printing And Dyeing**

|  |   |
|--|---|
| País   | China   |
| Sector   | Textil  |
| Año de inicio de operación                                 | 2011  |
| Tecnología de captación                                    | Tubo de vacío   |
| Área de captación (m <sup>2</sup> )                        | 9000  |
| Potencia térmica instalada(estimación) (kW <sub>th</sub> ) | 6300  |
| Uso  | Pre calentamiento solar para el proceso de impresión y teñido |
| Punto de integración (Figura 21)                           | C) Otros puntos de integración                                |
| Rango de temperatura del proceso (°C)                      | 50 °C   |

Tabla 7 Características Jiangsu Printing And Dyeing



Figura 44 Jiangsu Printing and Dyeing

- **Prestage Foods**

|  |  |
|--|--|
| País   | Estados Unidos   |
| Sector   | Alimentario  |
| Año de inicio de operación                                 | 2012   |
| Tecnología de captación                                    | Captador plano   |
| Área de captación (m <sup>2</sup> )                        | 7804   |
| Potencia térmica instalada(estimación) (kW <sub>th</sub> ) | 5462.7   |
| Uso  | Agua caliente para saneamiento en la industria avícola |
| Punto de integración (Figura 21)                           | B2) Proceso medio                                      |
| Rango de temperatura del proceso (°C)                      | Min 60 °C  |

Tabla 8 Características Prestage Foods



Figura 45 Prestage Foods

- **La Parrena copper mine**

|  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| País   | México                               |
| Sector   | Minería                              |
| Año de inicio de operación                                 | 2016                                 |
| Tecnología de captación                                    | Captador plano                       |
| Área de captación (m <sup>2</sup> )                        | 6270                                 |
| Potencia térmica instalada(estimación) (kW <sub>th</sub> ) | 4400                                 |
| Uso  | Demanda de calor de la mina de cobre |
| Punto de integración (Figura 21)                           | Diferentes puntos de integración     |
| Rango de temperatura del proceso (°C)                      | - °C                                 |

Tabla 9 Características La Parrena copper mine



Figura 46 La Parrena copper mine

- **Procter & Gamble (Tianjin)**

|   |  |
|---|--|
| País  | China                                  |
| Sector  | Químico                                |
| Año de inicio de operación                                    | 2016                                   |
| Tecnología de captación                                       | Cilindro parabólico                    |
| Área de captación (m <sup>2</sup> )                           | 4600                                   |
| Potencia térmica instalada(estimación)<br>(kW <sub>th</sub> ) | 1050                                   |
| Uso   | Demanda de calor de la mina de cobre   |
| Punto de integración (Figura 21)                              | A2b) Calor para la línea de suministro |
| Rango de temperatura del proceso (°C)                         | 130 °C                                 |

Tabla 10 Características Procter & Gamble (Tianjin)



Figura 47 Procter & Gamble (Tianjin)

### 2.7.1 Proyectos más importantes en España

En España actualmente hay 14 instalaciones de energía solar integrados en procesos industriales. Entre los que destacan las instalaciones que se muestran en las tablas 11, 12 y 13 y en las figuras 48,49 y 50:

- **Acuinova Andalucía S.A.**

|  |  |
|--|--|
| País   | España   |
| Ciudad   | Huelva   |
| Sector   | Agricultura, forestal y pesca.                 |
| Año de inicio de operación                                 | 1996   |
| Tecnología de captación                                    | Captador plano                                 |
| Área de captación (m <sup>2</sup> )                        | 1316   |
| Potencia térmica instalada(estimación) (kW <sub>th</sub> ) | 921.2  |
| Uso  | Calentamiento de agua para una granja de peces |
| Punto de integración (Figura 21)                           | C) Otros puntos de integración                 |
| Rango de temperatura del proceso (°C)                      | 23-26  |

Tabla 11 Características Acuinova Andalucía S.A.



Figura 48 Acuinova Andalucía S.A.

- **Nissan Avila**

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| País   | España                            |
| Ciudad   | Ávila                             |
| Sector   | Industria del motor               |
| Año de inicio de operación                                 | 2007                              |
| Tecnología de captación                                    | Captador plano                    |
| Área de captación (m <sup>2</sup> )                        | 530                               |
| Potencia térmica instalada(estimación) (kW <sub>th</sub> ) | 370                               |
| Uso  | Pretratamiento de las carrocerías |
| Punto de integración (Figura 21)                           | C) Otros puntos de integración    |
| Rango de temperatura del proceso (°C)                      | -                                 |

Tabla 12 Características Nissan Avila



Figura 49 Nissan Avila.

- **Parkings Service S.A.**

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| País  | España                              |
| Ciudad  | Castellbisbal                       |
| Sector  | Aparcamiento y limpieza de coches   |
| Año de inicio de operación                                    | 2004                                |
| Tecnología de captación                                       | Captador plano                      |
| Área de captación (m <sup>2</sup> )                           | 510                                 |
| Potencia térmica instalada(estimación)<br>(kW <sub>th</sub> ) | 357                                 |
| Uso   | Agua caliente para lavado de coches |
| Punto de integración (Figura 21)                              | C) Otros puntos de integración      |
| Rango de temperatura del proceso (°C)                         | 20-80                               |

Tabla 13 Características Parkings Service S.A.



Figura 50 Parkings Service S.A.

## 2.8 Estadísticas de instalaciones solares térmicas para procesos industriales

La energía térmica solar para procesos industriales es un mercado en crecimiento. En los últimos años se han implementado varios proyectos prometedores que van desde plantas de demostración a pequeña escala hasta sistemas muy grandes en el sector de varios MW.

Según un estudio publicado por SOLRICO a principios de 2017, los diseñadores de sistemas y los fabricantes de captadores informaron más de 500 plantas con un área de captadores estancada de 416,414 m<sup>2</sup> para el mundo del calor del proceso solar.

Para 238 de estos sistemas, se puede encontrar información más detallada sobre el área del captador, la capacidad instalada, el tipo de aplicación y el tipo de captador en la base de datos SHIP (fuente donde se ha encontrado la información del apartado anterior), que es un operador en línea operado por AEE INTEC en Austria. Las siguientes figuras muestran el análisis de los sistemas en los que se dispone de información detallada, por lo que el número total de sistemas analizados es inferior a 500.

La Figura 51 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por capacidad y área de captadores a finales de 2016 muestra la distribución de 238 sistemas en términos de tamaño. Veintidós sistemas exceden 1,000 m<sup>2</sup> de área de captadores, 26 sistemas tienen áreas de captadores estancadas entre 500 - 1,000 m<sup>2</sup>, y 190 sistemas tienen menos de 500 m<sup>2</sup>.

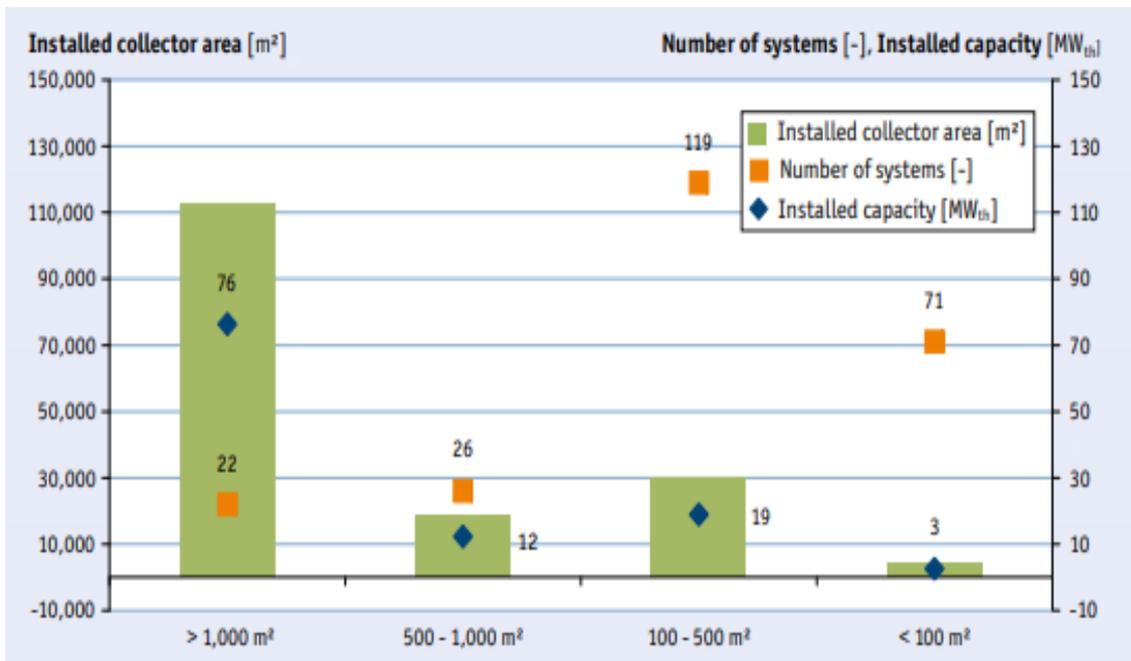


Figura 51 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por capacidad y área de captadores a finales de 2016

Figura 52 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por tipo de captador a finales de 2016 muestra los sistemas de calor de proceso analizados con respecto al tipo de tecnología de captador. La mayoría de los sistemas utilizan captadores

planos seguidos por captadores de tubos de vacío y captadores de captadores cilindroparabólicos.

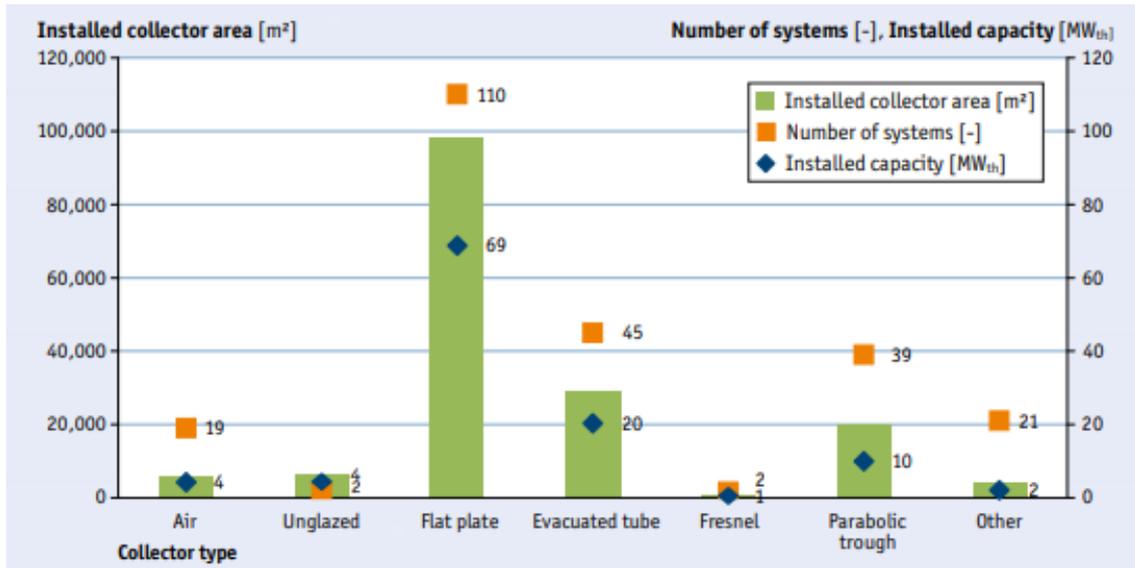


Figura 52 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por tipo de captador a finales de 2016

Con respecto a la participación de las tecnologías de captadores, Figura 53 Porcentaje de tecnologías de captadores muestra que más del 88% de los sistemas instalados no concentran, alrededor del 12% o 13 MW<sub>th</sub> se concentran con captadores cilindroparabólicos con una participación del 79%.

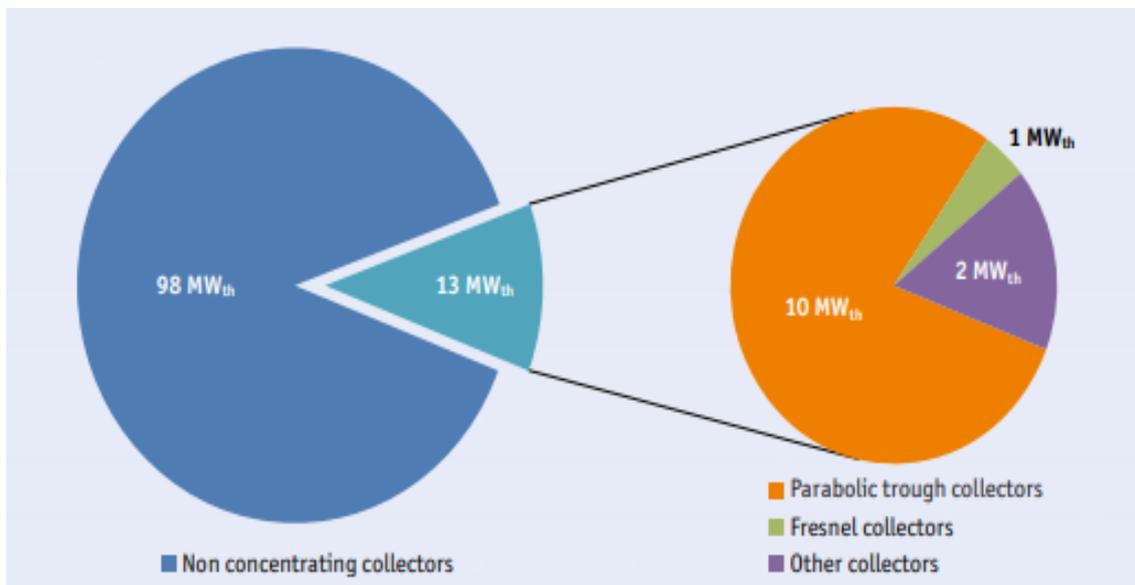


Figura 53 Porcentaje de tecnologías de captadores

Figura 54 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por industria a finales de 2016 muestra los sectores industriales de los 238 sistemas analizados. Los principales sectores son minería, alimentos y textiles. El procesamiento de bebidas, productos químicos y metales también son sectores importantes con 27, 14 y 15 plantas térmicas de proceso solar instaladas, respectivamente.

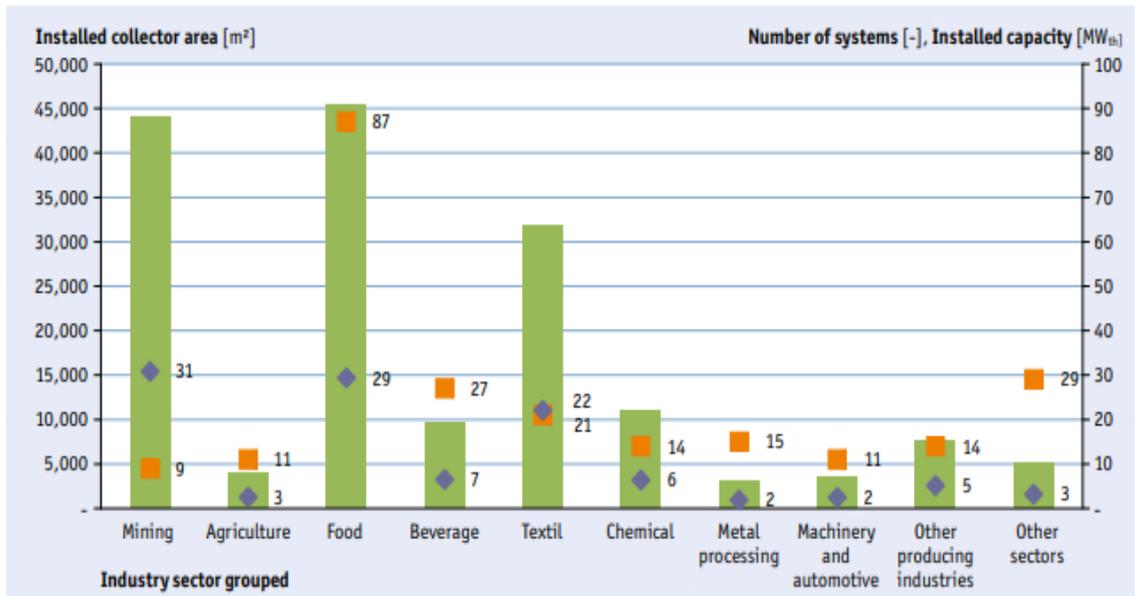


Figura 54 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por industria a finales de 2016

En términos de distribución de plantas de calor de proceso solar por país, el resultado es bastante diferente si se mira la cantidad de sistemas o el tamaño de las plantas instaladas. La Figura 55 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por país a finales de 2016 muestra los 15 principales países del mundo.

En términos del número de sistemas registrados, México lidera con 44 sistemas por delante de India con 36 plantas y Austria con 25 plantas.

En términos de tamaño de los sistemas grabados, Chile con solo dos sistemas lidera con una capacidad instalada total de 25.3 MW<sub>th</sub> y un tamaño promedio por sistema de 12.7 MW<sub>th</sub> por delante de China con una capacidad instalada total de 24.4 MW<sub>th</sub> (tamaño promedio de 2 MW<sub>th</sub>) y los Estados Unidos con 14.6 MW<sub>th</sub> y un tamaño promedio por sistema de 0.8 MW<sub>th</sub>.

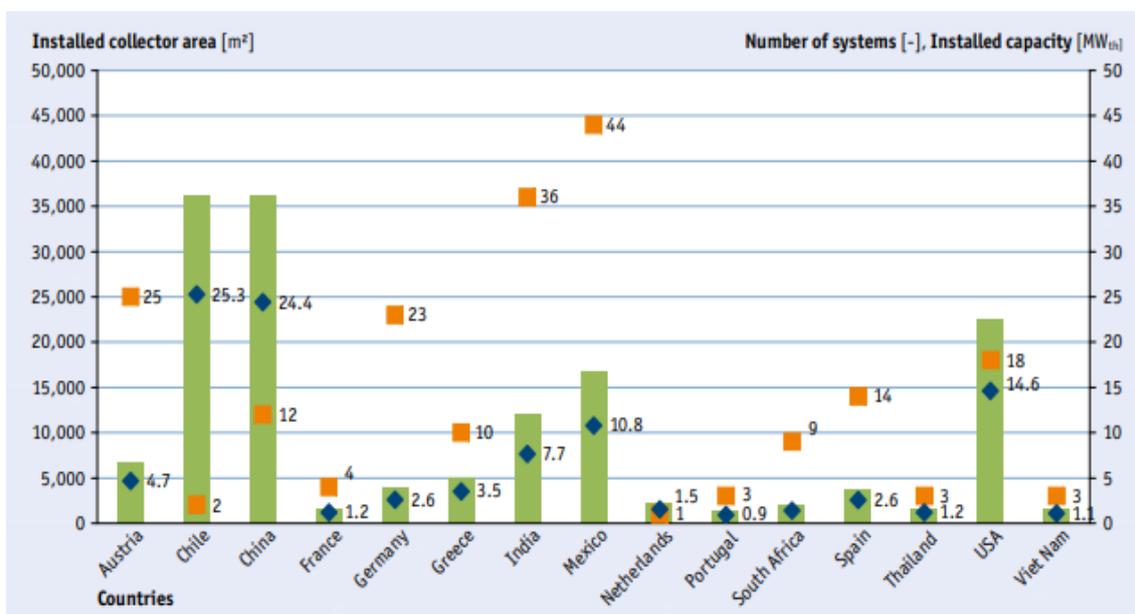


Figura 55 Aplicaciones de energía térmica de procesos solares globales en operación por país a finales de 2016

El diagrama de burbujas en la Figura 56 muestra la entrega de calor útil específico y la operación anual iniciada. El tamaño de las burbujas simboliza el tamaño de los sistemas. En los últimos diez años, se han instalado varios sistemas, especialmente en Europa y Asia. Sin embargo, los sistemas más grandes se instalan en América Latina (Chile).

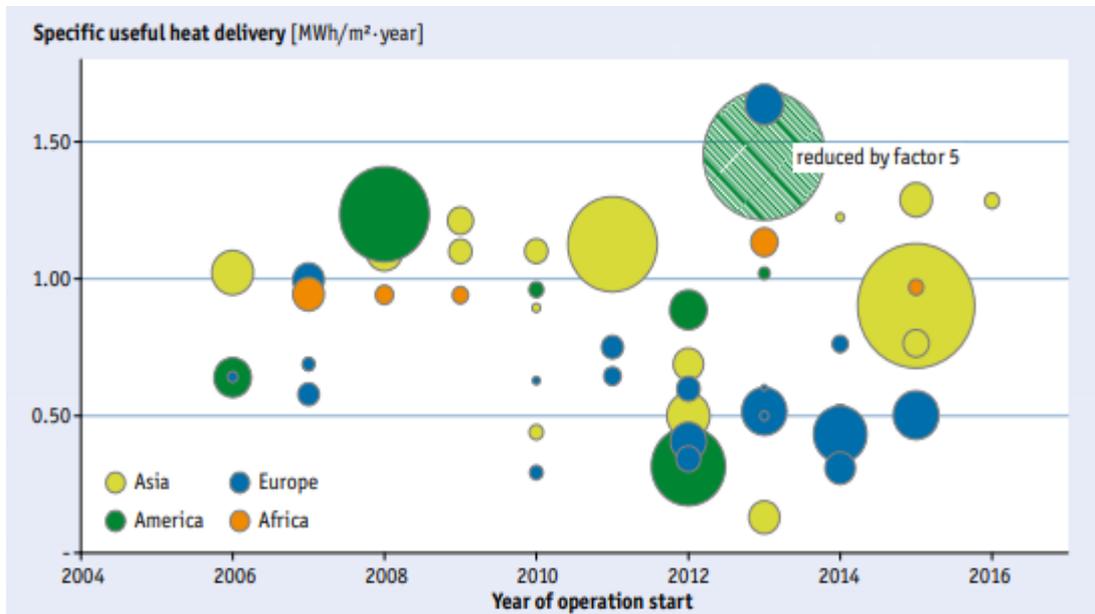


Figura 56 Suministro de calor útil específico de plantas de calor de proceso solar

## 3. Simulación

### 3.1 Introducción

En el presente capítulo del proyecto se va a describir el sistema objeto de estudio y sus características, especificando el proceso que se realiza en él y las diferentes variables que existen. También se va a mostrar el modelado de este, mediante las diferentes ecuaciones necesarias para la implementación y simulación del caso, además se procederá a explicar el funcionamiento del programa utilizado (EES) y su forma de resolver el sistema. Por último, se realizará un análisis de los resultados, simulando diferentes casos y situaciones, además estudios de variación de variables como puede ser el área de captación de la instalación de energía solar.

### 3.2 Engineering equation solver (EES)

El programa que se ha utilizado para el modelado y simulación del proceso ha sido el engineering equation solver (EES), cuyo logo se muestra en la figura 57, muy utilizado en el departamento de ingeniería energética para diferentes asignaturas.



Figura 57 Icono EES

EES es un programa general de resolución de ecuaciones que puede resolver numéricamente miles de ecuaciones algebraicas y diferenciales no lineales acopladas. El programa también se puede usar para resolver ecuaciones diferenciales e integrales, realizar optimización, proporcionar análisis de incertidumbre, realizar regresiones lineales y no lineales, convertir unidades, verificar la coherencia de la unidad y generar gráficos de calidad de publicación. Una característica principal de EES es la base de datos de propiedad de transporte y termodinámica de alta precisión que se proporciona para cientos de sustancias de una manera que permite su uso con la capacidad de resolución de ecuaciones.

EES también incluye tablas paramétricas, se puede ver un ejemplo en la figura 58, que le permiten al usuario comparar varias variables a la vez. Las tablas paramétricas también se pueden usar para generar gráficos. EES también puede integrarse, tanto como un comando en el código y en las tablas. EES también proporciona herramientas de optimización que minimizan o maximizan una variable elegida variando una cantidad de otras variables. Las tablas de búsqueda se pueden crear para almacenar información a la que se puede acceder mediante una llamada en el código. El código EES le permite al usuario ingresar ecuaciones en cualquier orden y obtener una solución, pero también puede contener declaraciones if-then, que también pueden anidarse entre sí para crear declaraciones if-then-else. Los usuarios pueden escribir funciones para su uso en su código, y también procedimientos, que son funciones con múltiples salidas.

| 2.8760 | ROW | G <sub>T</sub><br>[W/m <sup>2</sup> ] | T <sub>amb</sub><br>[C] | T <sub>salidaCP</sub><br>[C] | T <sub>entradaCPI</sub><br>[C] | T <sub>salidaNT</sub><br>[C] | T <sub>vproceso</sub><br>[C] | M <sub>aceite</sub><br>[Kg/s] | M <sub>agua</sub><br>[Kg/s] | Q <sub>intercambiador</sub><br>[W] | Q <sub>CP</sub><br>[W] | Perdidas<br>[W] | Q <sub>proceso</sub><br>[W] | coberturasolar |
|--------|-----|---------------------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|----------------|
| Run 1  | 1   | 0                                     |                         |                              |                                | 148.7                        |                              |                               |                             |                                    |                        |                 |                             |                |
| Run 2  | 2   | 0                                     | 9.7                     | 148.7                        | 148.7                          | 148.7                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0                           | 0                                  | 0                      | -2.217E-11      | 2.403E+06                   | -2.975E-15     |
| Run 3  | 3   | 0                                     | 9                       | 148.7                        | 148.7                          | 148.7                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0                           | 0                                  | 0                      | 0               | 2.403E+06                   | 3.101E-32      |
| Run 4  | 4   | 0                                     | 8.7                     | 148.7                        | 148.7                          | 148.7                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0                           | 0                                  | 0                      | 0               | 2.403E+06                   | 1.870E-46      |
| Run 5  | 5   | 0                                     | 8                       | 148.7                        | 148.7                          | 148.7                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0                           | 0                                  | 0                      | 0               | 2.403E+06                   | -7.904E-61     |
| Run 6  | 6   | 0                                     | 7.4                     | 148.7                        | 148.7                          | 148.7                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0                           | 0                                  | 0                      | 0               | 2.403E+06                   | -3.156E-75     |
| Run 7  | 7   | 0                                     | 6.3                     | 148.7                        | 148.7                          | 148.7                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0                           | 0                                  | 0                      | 0               | 2.403E+06                   | -3.516E-90     |
| Run 8  | 8   | 0                                     | 5.5                     | 148.7                        | 148.7                          | 148.7                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0                           | 0                                  | 0                      | 0               | 2.403E+06                   | -3.300E-105    |
| Run 9  | 9   | 0                                     | 5.7                     | 148.7                        | 148.7                          | 148.7                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0                           | 0                                  | 0                      | 0               | 2.403E+06                   | 0              |
| Run 10 | 10  | 31                                    | 7.1                     | 148.7                        | 148.7                          | 148.7                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0                           | 0                                  | 0                      | 0               | 2.403E+06                   | 0              |
| Run 11 | 11  | 123                                   | 8.5                     | 171                          | 148.7                          | 148.6                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0.01609                     | 38662                              | 38532                  | 1.628E-07       | 2.403E+06                   | 0.01609        |
| Run 12 | 12  | 297                                   | 11                      | 242.3                        | 148.6                          | 160.1                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0.06194                     | 148857                             | 169672                 | -1.551E-10      | 2.403E+06                   | 0.06194        |
| Run 13 | 13  | 400                                   | 13.4                    | 287.3                        | 160.1                          | 166.2                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0.09453                     | 227181                             | 238675                 | -1.741E-09      | 2.403E+06                   | 0.09453        |
| Run 14 | 14  | 400                                   | 15.2                    | 290.9                        | 166.2                          | 166.7                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0.09761                     | 234577                             | 235431                 | -2.970E-12      | 2.403E+06                   | 0.09761        |
| Run 15 | 15  | 276                                   | 16.4                    | 245.8                        | 166.7                          | 160.6                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0.06507                     | 156378                             | 145221                 | 8.825E-11       | 2.403E+06                   | 0.06507        |
| Run 16 | 16  | 121                                   | 16.5                    | 180.4                        | 160.6                          | 150.2                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0.02193                     | 52712                              | 34560                  | 7.932E-10       | 2.403E+06                   | 0.02193        |
| Run 17 | 17  | 51                                    | 15.9                    | 150.2                        | 150.2                          | 144.9                        | 143.6                        | 0.8891                        | 0.003806                    | 9148                               | 0                      | -5.373E-10      | 2.403E+06                   | 0.003806       |

Figura 58 Tabla paramétrica de resultados

Para este caso, se ha utilizado una tabla paramétrica para simular la evolución del sistema, de forma que cada fila de la tabla corresponderá a diez minutos. De esta forma, la simulación es en bloque, dividiendo el año en diez minutos y siendo cada diez minutos un bloque y tomando, para cada bloque, diferentes valores cada una de las variables. Se ha implementado de esta manera ya que la solución para bloque horarios no convergía bien y daban resultados alterados, de esta forma al ser periodos más cortos la evolución sigue la tendencia esperada y dan resultados correctos, aunque las iteraciones se hayan multiplicado por seis y se obtengan 52560 en lugar de las 8760. Para esto, también ha sido necesario pasar los datos climáticos a diezminutales, ya que se disponen en franjas horarias. En la Figura 58 Tabla paramétrica de resultados se observa un ejemplo de tabla paramétrica de resultados.

Al ajustar las preferencias, el usuario puede elegir un sistema de unidad, especificar criterios de detención, incluido el número de iteraciones, y también habilitar / deshabilitar unidades de comprobación y recomendación de unidades, entre otras opciones. Los usuarios también pueden especificar valores de adivinanzas y límites de variables para ayudar al proceso de resolución iterativa y ayudar a EES a encontrar una solución de manera rápida y exitosa.

El programa está desarrollado por F-Chart Software, un spin-off comercial del Prof. Sanford A Klein del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Wisconsin-Madison.

### 3.3 Modelado del proceso en el EES

Lo primero es introducir los datos de entrada propios del proceso que demanda el vapor a unas condiciones y la devuelve a otras:

-----POTENCIA DE CONSUMO DEL PROCESO INDUSTRIAL -----

$$M_{vproceso} \text{ [Kg/s]} = 1$$

$$T_{lproceso} \text{ [C]} = 80$$

$$P_{proceso} \text{ [Bar]} = 4$$

$$Q_{proceso} \text{ [W]} = M_{vproceso} \text{ [Kg/s]} \cdot ( H_{vproceso} \text{ [J/Kg]} - H_{lproceso} \text{ [J/Kg]} )$$

$$H_{v\text{proceso}} \text{ [J/Kg]} = h(\text{Steam}, P = P_{\text{proceso}} \text{ [Bar]}, x = 1)$$

$$H_{l\text{proceso}} \text{ [J/Kg]} = h(\text{water}, P = P_{\text{proceso}} \text{ [Bar]}, T = T_{l\text{proceso}} \text{ [C]})$$

$$T_{v\text{proceso}} \text{ [C]} = T_{\text{sat}}(\text{Steam}, P = P_{\text{proceso}} \text{ [Bar]})$$

El sistema de captación se simula mediante la curva de rendimiento características de captadores con concentración:

$$\eta = a_0 - [a_1 + a_2 (T_{fe} - T_a)] \frac{(T_{fe} - T_a)}{I_D}$$

Para la configuración de los captadores influye de la siguiente forma:

- Al aumentar los captadores en serie se aumenta el salto de temperatura en el sistema, obteniéndose aceite térmico a mayor temperatura.
- Al aumentar los captadores en paralelo se aumenta el caudal de la bomba y por tanto la energía captada.

Los datos de entrada son:

-----CAPTADOR CILINDROPARABÓLICO-----

$$C_0 = 0.754$$

$$C_1 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{C]} = 0.1468$$

$$C_2 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{C}^2] = 0.0017$$

$$A_{\text{bruta}} \text{ [m}^2] = 14.03$$

$$A_{\text{bruta}} \text{ [m}^2] = 14,03$$

$$A_{\text{abs}} \text{ [m}^2] = 3.14 \cdot 0.33^2$$

$$K_{\text{incidencia}} = 0.87$$

$$M_{\text{aceite}}_{\text{serie}} = 2,6 \cdot A_{\text{abs}} \text{ [m}^2]$$

$$N_{\text{Capt}}_{\text{Total}} = 100$$

$$N_{\text{Capt}}_{\text{Lazo}} = 4$$

$$N_{\text{Capt}}_{\text{Paralelo}} = \frac{N_{\text{Capt}}_{\text{Total}}}{N_{\text{Capt}}_{\text{Lazo}}}$$

El generador de vapor se simula como dos intercambiadores en serie a contracorriente, mediante la fórmula de la efectividad:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{real}}}{Q_{\text{max}}}$$

$$Q_{\text{real}} = C_{\text{min}} \Delta T_1 = |C_{\text{max}} \Delta T_2$$

$$Q_{\text{max}} = C_{\text{min}} \Delta T_{\text{max}}$$

En un intercambiador, intercambiador 1, es donde se elevaría la temperatura del agua hasta la de saturación y en el otro, intercambiador 2, se produciría el cambio de fase líquido-vapor. En la figura 59 se muestra una representación de las temperaturas del intercambiador.

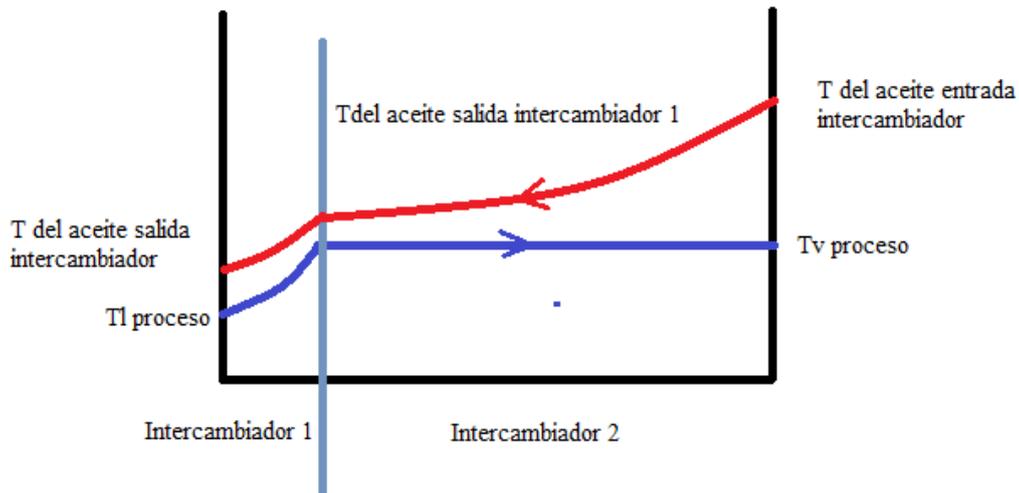


Figura 59 Diagrama de temperaturas en el intercambiador

Para este caso, se consideran efectividades constantes y diferentes para cada uno de los dos intercambiadores, estos datos son:

-----INTERCAMBIADOR-----

$$\varepsilon_{\text{intercambiador1}} = 0.7$$

$$\varepsilon_{\text{intercambiador2}} = 0.8$$

$$T_{\text{sdeseada}} \text{ [C]} = 150$$

Para la simulación del proceso, cuyo esquema se corresponde con el de la figura 60, se ha modelado por bloques de una hora tal como se ha comentado en el apartado anterior, de forma que cada hora el proceso realiza la siguiente secuencia:

1. Para empezar a ejecutar el programa hay que darle una  $T_4(0)$ , la cual se ha calculado previamente simulando un periodo de tiempo suficiente para que el sistema converja, esta temperatura tiene un valor de 148.7 °C. Este valor coincide con el valor de la última hora.
2. Se ha considerado que en cada periodo diezminutal el proceso que se sigue es el siguiente: el aceite térmico entra por el captador solar, en este se puede calentar o no dependiendo de la radiación incidente, dando lugar a dos posibilidades:

$$\text{Rend}_{\text{CP}} = \text{if} \left[ G_T \text{ [W/m}^2\text{]} ; 1 ; 0 ; 0 ; C_0 - \left( (C_1 \text{ [W/m}^2\text{C]} + C_2 \text{ [W/m}^2\text{C}^2] \cdot AT \text{ [C]}) \cdot \left[ \frac{AT \text{ [C]}}{G_T \text{ [W/m}^2\text{]} + 1,0 \times 10^{-42}} \right] \right) \right]$$

$$AT \text{ [C]} = T_{\text{mediaCP}} \text{ [C]} - T_{\text{amb}} \text{ [C]}$$

$$T_{\text{mediaCP}} \text{ [C]} = \frac{T_{\text{salidaCP}} \text{ [C]} + T_{\text{entradaCP1}} \text{ [C]}}{2}$$

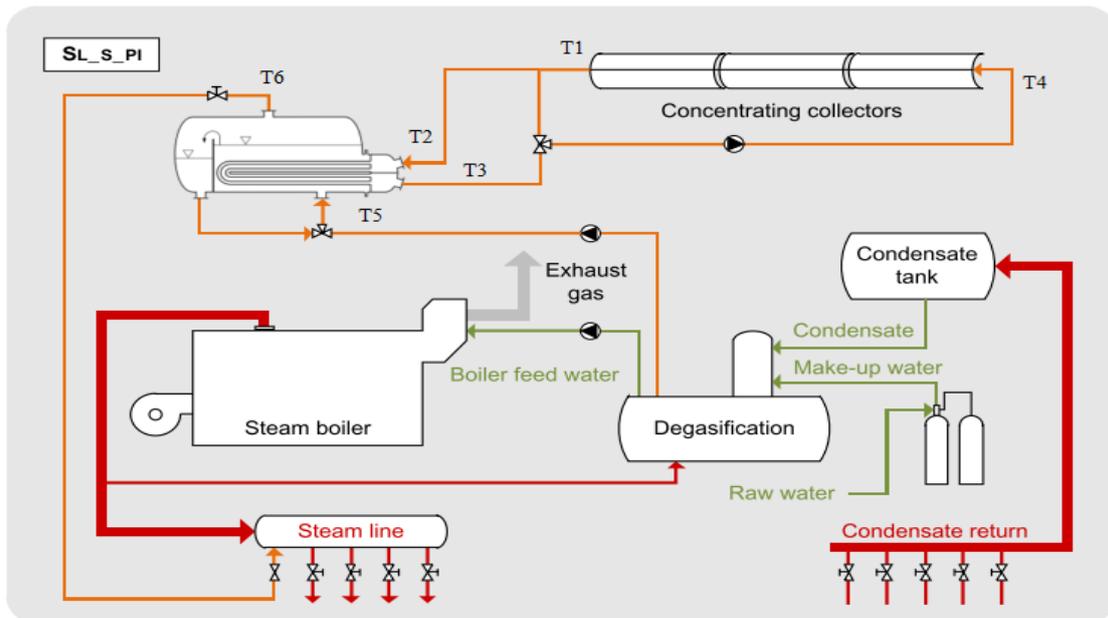


Figura 60 Esquema del proceso identificando Tª de cada corriente.

$$Q_{CP} \text{ [W]} = N_{CaptParalelo} \cdot Q_{CP\text{Iazo}} \text{ [W]}$$

$$Q_{CP\text{Iazo}} \text{ [W]} = \text{If} (\text{Rend}_{CP} > 0; 0; 0; 0; K_{\text{incidencia}} \cdot \text{Rend}_{CP} \cdot A_{\text{apertura}} \text{ [m}^2\text{]} \cdot N_{Capt\text{Lazo}} \cdot G_T \text{ [W/m}^2\text{]})$$

$$Q_{CP\text{Iazo}} \text{ [W]} = M_{\text{aceite}} \text{ [Kg/s]} \cdot C_{p\text{aceite}} \text{ [J/kg}\cdot\text{C]} \cdot (T_{\text{salidaCP}} \text{ [C]} - T_{\text{entradaCP1}} \text{ [C]})$$

a. Si la temperatura de salida del captador (T1) es menor que la de consigna (se ha elegido 150 °C) , ya sea porque no hay radiación o no hay la suficiente radiación para calentar el fluido a la Tª de consigna, entonces la válvula de 3 vías estará abierta y por lo tanto el aceite no pasa por el generador de vapor. De este modo en el siguiente ciclo (hora) la entrada al captador será la que fue a la salida del captador en el ciclo anterior (T4 (t)= T1(t-1)). En la figura 61 se observa marca en amarillo el circuito seguido.

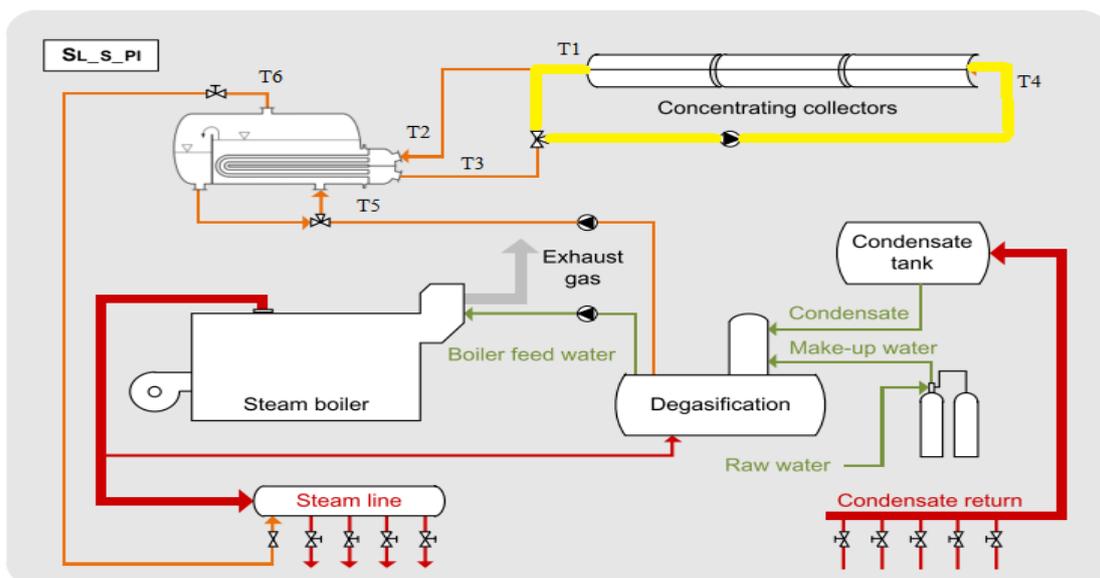


Figura 61 Esquema del proceso resaltando el proceso cuando la radiación no es suficiente.

b. Si por el contrario, T1 es mayor que la Tº de consigna la válvula de 3 vías estará cerrada y el aceite sí pasará por el intercambiador para continuar con el proceso, punto 3. Siguiendo el circuito en azul de la figura 62.

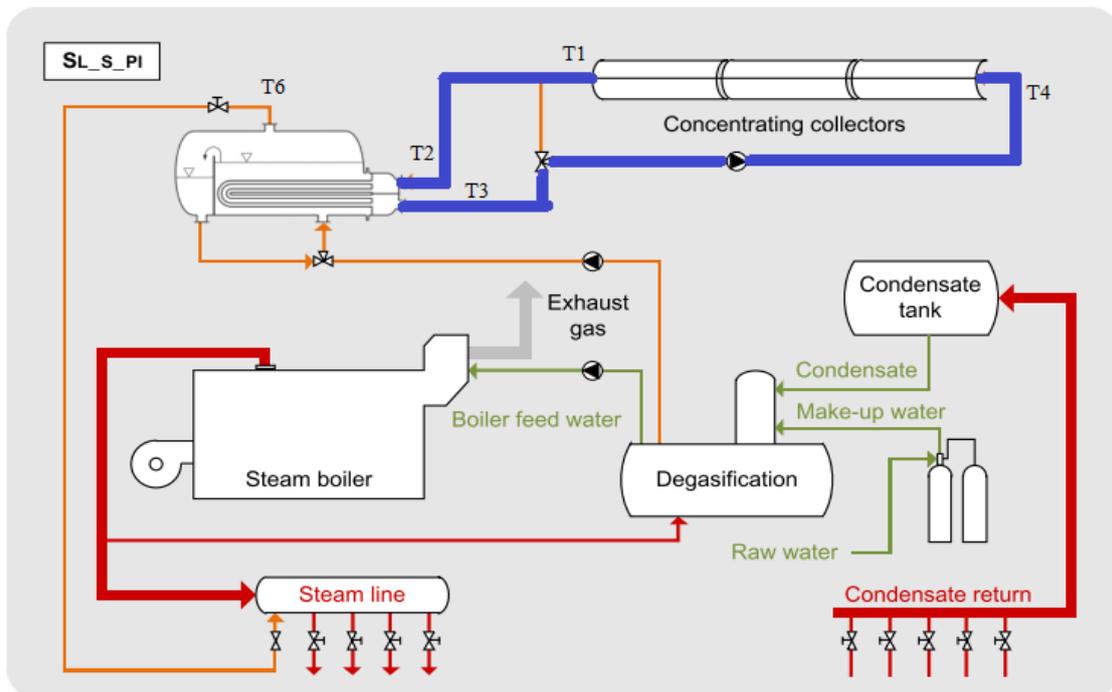


Figura 62 Esquema del proceso resaltando el proceso cuando la radiación es suficiente.

$$Q_{\text{intercambiador2}} \text{ [W]} = C_{\text{minaceite}} \text{ [J/s}\cdot\text{C]} \cdot (T_{\text{salidaCP}} \text{ [C]} - T_{\text{salidaINT1}} \text{ [C]})$$

$$Q_{\text{intercambiador1}} \text{ [W]} = C_{\text{minaceite}} \text{ [J/s}\cdot\text{C]} \cdot (T_{\text{salidaINT1}} \text{ [C]} - T_{\text{salidaINT}} \text{ [C]})$$

$$Q_{\text{intercambiador2}} \text{ [W]} = \text{If} (T_{\text{salidaCP}} \text{ [C]}; T_{\text{sdeseada}} \text{ [C]}; 0; 0; \epsilon_{\text{intercambiador2}} \cdot C_{\text{min}} \text{ [J/s}\cdot\text{C]} \cdot (T_{\text{salidaCP}} \text{ [C]} - T_{\text{vproceso}} \text{ [C]}))$$

$$Q_{\text{intercambiador}} \text{ [W]} = Q_{\text{intercambiador1}} \text{ [W]} + Q_{\text{intercambiador2}} \text{ [W]}$$

$$C_{p_{\text{aceite}}} \text{ [J/kg}\cdot\text{C]} = \text{Interpolate} ('Prop_{\text{aceite}}'; T; 'Cp'; T' = T_{\text{mediaCP}} \text{ [C]})$$

$$C_{p_{\text{agua}}} \text{ [J/kg}\cdot\text{C]} = C_p (\text{Steam}; P = P_{\text{proceso}} \text{ [Bar]}; T = T_{\text{lproceso}} \text{ [C]})$$

$$C_{\text{minaceite}} \text{ [J/s}\cdot\text{C]} = M_{\text{aceite}_{\text{serie}}} \cdot C_{p_{\text{aceite}}} \text{ [J/kg}\cdot\text{C]} \cdot N_{\text{Capt}_{\text{paralelo}}}$$

$$C_{\text{minagua}} \text{ [J/s}\cdot\text{C]} = M_{\text{agua}} \text{ [Kg/s]} \cdot C_{p_{\text{agua}}} \text{ [J/kg}\cdot\text{C]}$$

$$C_{\text{min}} \text{ [J/s}\cdot\text{C]} = \text{If} (C_{\text{minaceite}} \text{ [J/s}\cdot\text{C]}; C_{\text{minagua}} \text{ [J/s}\cdot\text{C]}; C_{\text{minaceite}} \text{ [J/s}\cdot\text{C]}; C_{\text{minagua}} \text{ [J/s}\cdot\text{C]}; C_{\text{minagua}} \text{ [J/s}\cdot\text{C]})$$

3. Al pasar por el intercambiador, T1=T2, por lo tanto, se considera que no hay pérdidas y la temperatura de entrada al intercambiador es la temperatura de salida del captador.

4. En el intercambiador el aceite transfiere su calor al agua, produciendo así vapor saturado a las condiciones exigidas en el proceso (vapor saturado a 4bar). Las corrientes de entrada a este son el aceite térmico a una Tº mayor que la de consigna y el agua a las condiciones de retorno del proceso (agua a 4 bar y 80ºC). Dependiendo de la energía que transfiera el aceite se genera

más o menos caudal de vapor, es decir, el caudal que se lleva al proceso desde el sistema solar depende del calor captado.

$$Q_{\text{intercambiador}} \text{ [W]} = \text{If} ( T_{\text{salidaCP}} \text{ [C]}; T_{\text{sdeseada}} \text{ [C]}; 0; 0; M_{\text{agua}} \text{ [Kg/s]} \cdot ( H_{\text{vproceso}} \text{ [J/Kg]} - H_{\text{lproceso}} \text{ [J/Kg]} ) )$$

$$\text{coberturasolar} = \frac{Q_{\text{intercambiador}} \text{ [W]}}{Q_{\text{proceso}} \text{ [W]}}$$

5. Por último, el valor de la  $T^a$  del aceite salida de intercambiador será la temperatura de entrada en el captador del siguiente ciclo (hora) de forma que  $T_4(t)=T_3(t-1)$ . El proceso completo está marcado con la línea azul sobre el sistema.

$$T_{\text{entradaCP1}} \text{ [C]} = \text{TableValue} ( \text{'Tabla'}, \text{ROW} - 1, T_{\text{salidaINT}} )$$

### 3.4 Descripción del caso base objeto de estudio.

El proceso que se estudia en el presente trabajo de fin de grado es el llamado “sistema de calentamiento indirecto en el sistema de generación de vapor”, visto anteriormente en el capítulo 2.4. Se trata de una integración a nivel de proceso, en concreto directamente a nivel de proceso (B1) según la Figura 21 Opciones de integración en la industria.

El proceso empieza con la instalación solar, recibiendo energía procedente del sol por parte de los captadores solares, se ha decidido simular la tecnología cilindroparabólico. Esta energía se aprovecha para calentar el aceite térmico que circula por los captadores, que a su vez pasa por un intercambiador, al cual llamaremos generador de vapor.

En el generador de calor llegan dos fluidos, por una parte, el aceite térmico a alta temperatura que viene del circuito solar y sale a una temperatura mucho menor para volver a ser calentado por los captadores. Por otra parte, al intercambiador llega la corriente de regreso de proceso industrial, el cual requiere el vapor, llegando en estado líquido desde el desgasificador.

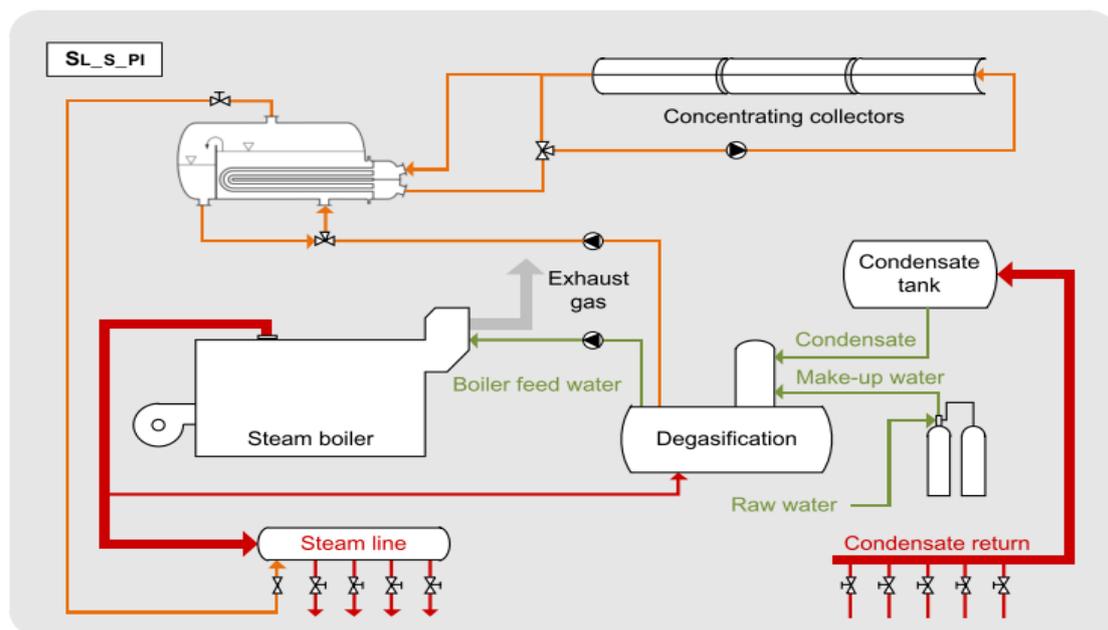


Figura 63 Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de generación de vapor

El objetivo de la instalación solar es cubrir un porcentaje de la demanda de vapor de un proceso industrial, de forma que una parte de vapor sea generada con la energía del sol y otra por una caldera convencional, tal como se puede observar en Figura 63 Sistema de calentamiento indirecto en el sistema de generación de vapor.

En la tabla 14 se muestran los datos generales mientras que en la Tabla 15 Datos del proceso industrial muestran los datos del vapor demandado en el proceso industrial.

| Datos generales |         | Fuente |
|-----------------|---------|--------|
| Sistema         | GDV     | -      |
| Localidad       | Sevilla | -      |

Tabla 14 Datos generales.

| Datos del proceso industrial    |             | Fuente |
|---------------------------------|-------------|--------|
| Caudal vapor generador (kg/s)   | 1           | -      |
| Perfil de consumo               | 06:00-22:00 | -      |
| Presión (bar abs)               | 4           | -      |
| Temperatura saturación (°C)     | 143,6       | -      |
| Temperatura desgasificador (°C) | 80          | -      |

Tabla 15 Datos del proceso industrial

Para la simulación del captador se ha cogido los datos y metodología del documento del IDAE “Evaluación del potencial de la energía solar térmica en el sector industrial, estudio técnico PER 2011-2020”.

Se ha optado por la “mejor tecnología actualmente disponible”, la cual se considera no el promedio de todos los captadores, sino el promedio de los mejores captadores dentro de cada tecnología.

Para la producción del captador se usa el rendimiento, energía absorbida entre la radiación incidente al captador, y se define con la siguiente fórmula:

$$\eta = C_0 - (C_1 + C_2 \cdot \Delta T) \cdot \frac{\Delta T}{G_T}$$

Dónde  $C_0$  es el rendimiento óptico,  $C_1$ ,  $C_2$  son los coeficientes lineal y cuadrático de pérdida de calor ( $C_1$  [W/K m<sup>2</sup>];  $C_2$  [W/K<sup>2</sup>m<sup>2</sup>]),  $\Delta T$  [K] es la diferencia entre la temperatura media del fluido en el captador ( $T_m$ ) y la temperatura ambiente ( $T_a$ ), y  $G_T$  [W/m<sup>2</sup>] es la cantidad de radiación solar que incide en el captador.

Según el documento mencionado los valores de “mejor tecnología disponible” se muestran en la tabla 16.

Para el intercambio de energía del aceite térmico al agua/vapor se tienen en cuenta con los datos de la tabla 17.

Con estos datos, juntos con los datos ambientales de la localidad de Sevilla como son la radiación directa y temperatura ambiente, se ha simulado el proceso.

| Datos sistema de captación solar                  |               | Fuente       |
|---|---------------|--------------|
| Área bruta (m <sup>2</sup> )                      | 14,03         | Referencia 3 |
| Área apertura (m <sup>2</sup> )                   | 13,20         | Referencia 3 |
| C <sub>0</sub>                                    | 0,75          | Referencia 3 |
| C <sub>1</sub> (W/k m <sup>2</sup> )              | 0,15          | Referencia 3 |
| C <sub>2</sub> (W/k <sup>2</sup> m <sup>2</sup> ) | 0,0017        | Referencia 3 |
| K incidencia                                      | 0,87          | Referencia 3 |
| Diámetro absorbedor (m)                           | 0,066         | Referencia 6 |
| Caudal aceite (kg/s)                              | 8,46          | Referencia 6 |
| Fluido caloportador                               | Therminol VP1 | Referencia 6 |
| Calor específico a 150 °C (kJ/kg K)               | 1,91          | Referencia 6 |
| Número de captadores                              | 100           | -            |
| Número de captadores en serie                     | 4             | -            |
| Caudal bomba (kg/s)                               | 211,55        | -            |
| Temperatura de consigna lazo solar (°C)           | 150           | -            |
| Área total de captación (m <sup>2</sup> )         | 1320          | -            |

Tabla 16 Coeficientes para el cálculo del rendimiento del captador.

| Generador de vapor               |                                | Fuente |
|----------------------------------|--------------------------------|--------|
| Tipo                             | Intercambiador contracorriente | -      |
| Efectividad (con cambio de fase) | 0,8                            | -      |
| Efectividad (sin cambio de fase) | 0,7                            | -      |

Tabla 17 Datos generador de vapor.

### 3.5 Resultados.

Para mostrar los resultados de manera más útil, y no tener que comprobar las 52560 iteraciones, se han agrupado en valores mensuales y anuales. En la Tabla 18 Resultados mensuales y anuales del caso base y en la Figura 64 Resultados mensuales del caso base se muestran los valores de los calores mensuales.

- Q<sub>solar</sub>: Radiación solar por área de apertura
- EGV: energía en el generador de calor (intercambiador)
- QCPC: Energía captada por el captador solar.
- Rendimiento solar= QCPC/Q<sub>solar</sub>.
- Cobertura solar= EGV/Q<sub>proceso</sub>

Se observa que el global de la energía producida en el generador de vapor es la misma que la obtenida en el captador solar debido a que el sistema se ha considerado sin pérdidas, por tanto, la energía que entra debe ser igual que la que sale.

La cantidad de energía transferida en el generador de vapor depende mucho del mes, debido a la radiación de cada uno de esto. Hay mucha diferencia entre el mes con más producción, Julio

con 137 MWh, y el mes con menos, Diciembre con 26 MWh. Esto es una diferencia de 111 MWh, es decir, el mes con menos producción produce una % del mes con más radiación

| Mes        | Qsolar (MWh) | Qútil (MWh) | Qcaptación (MWh) | Qproceso (MWh) | Rendimiento captación | Rendimiento instalación |
|------------|--------------|-------------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| Enero      | 66           | 29          | 29               | 1192           | 44,78%                | 2,46%                   |
| Febrero    | 78           | 37          | 37               | 1077           | 47,46%                | 3,42%                   |
| Marzo      | 120          | 62          | 62               | 1192           | 51,55%                | 5,18%                   |
| Abril      | 148          | 80          | 80               | 1154           | 54,18%                | 6,93%                   |
| Mayo       | 197          | 109         | 109              | 1192           | 55,35%                | 9,13%                   |
| Junio      | 212          | 120         | 120              | 1154           | 56,41%                | 10,37%                  |
| Julio      | 240          | 137         | 137              | 1192           | 57,09%                | 11,51%                  |
| Agosto     | 214          | 121         | 121              | 1192           | 56,64%                | 10,18%                  |
| Septiembre | 147          | 80          | 80               | 1154           | 54,39%                | 6,94%                   |
| Octubre    | 110          | 57          | 57               | 1192           | 51,49%                | 4,76%                   |
| Noviembre  | 73           | 34          | 34               | 1154           | 46,90%                | 2,97%                   |
| Diciembre  | 58           | 26          | 26               | 1192           | 44,39%                | 2,18%                   |
| Total      | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,35%                   |

Tabla 18 Resultados mensuales y anuales del caso base

La energía demandada por el proceso varía de unos meses a otros debido a la cantidad de días que componen el mes, aunque el consumo diario es siempre de 6:00 a 22:00. Debido a la cantidad de horas en la que se el proceso demanda vapor y la potencia que este necesita, la cobertura solar es baja, variando desde un 2% en invierno al 11% en verano.

El rendimiento de la instalación solar es en torno al 50%, siendo superior en verano e inferior en invierno, debido a que el rendimiento solar es proporcionar a la radiación solar y a la temperatura ambiente. Por este motivo es que hay tanta diferencia entre el rendimiento máximo (producido en Julio 57.09%) y el rendimiento mínimo (producido en Diciembre 44,39%), existiendo una diferencia de 12.7%. La evolución a lo largo de los meses se observa perfectamente en la figura 64.

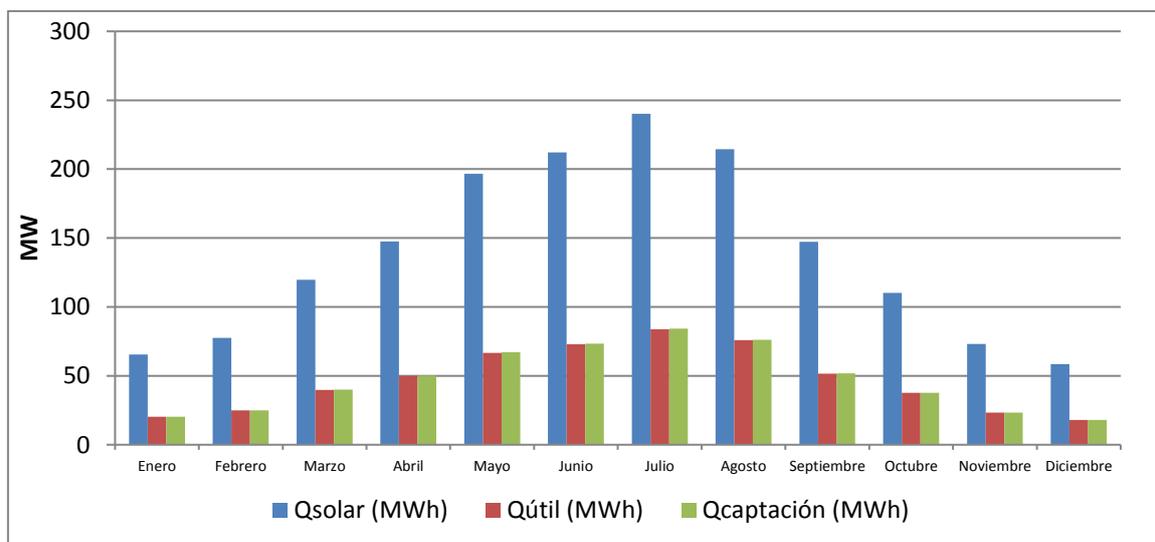


Figura 64 Resultados mensuales del caso base

A continuación se compara la temperatura de salida del captador solar y la del intercambiador durante un día soleado y otro nublado, de forma que se pueda observar el salto de temperatura en ambos casos y la evolución de esos días.

**Día soleado: 19/06/2016**

En [Tabla 19 Evolución de Tª de salida del intercambiador y captador en un día soleado](#) y en la [Figura 65 Evolución de Tª de salida del intercambiador y captador en un día soleado](#) se muestra la evolución del este día.

| Hora | Radiación | Tª salida captador | Tª salida intercambiador |
|------|-----------|--------------------|--------------------------|
| 0    | 0         | 149,7              | 149,7                    |
| 1    | 0         | 149,7              | 149,7                    |
| 2    | 0         | 149,7              | 149,7                    |
| 3    | 0         | 149,7              | 149,7                    |
| 4    | 0         | 149,7              | 149,7                    |
| 5    | 128       | 149,7              | 149,7                    |
| 6    | 644       | 149,8              | 149,7                    |
| 7    | 1524      | 150,1              | 149,7                    |
| 8    | 2529      | 150,7              | 150,2                    |
| 9    | 3543      | 152,9              | 152,1                    |
| 10   | 4423      | 155,8              | 154,8                    |
| 11   | 5030      | 158,7              | 157,5                    |
| 12   | 5268      | 161,2              | 159,8                    |
| 13   | 5098      | 162,6              | 161,1                    |
| 14   | 4548      | 162,8              | 161,2                    |
| 15   | 3705      | 161,6              | 160,1                    |
| 16   | 2703      | 159,2              | 157,9                    |
| 17   | 1687      | 156,0              | 155,0                    |
| 18   | 779       | 152,4              | 151,7                    |
| 19   | 179       | 149,9              | 149,8                    |
| 20   | 0         | 149,8              | 149,8                    |
| 21   | 0         | 149,8              | 149,8                    |
| 22   | 0         | 149,8              | 149,8                    |
| 23   | 0         | 149,8              | 149,8                    |

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| ATmax | 13,1  | 11,6  |
| MaxT  | 162,8 | 161,2 |
| MinT  | 149,7 | 149,7 |

[Tabla 19 Evolución de Tª de salida del intercambiador y captador en un día soleado](#)

Se observa que la tendencia de la salida del intercambiador y del captador son la misma, al ser un día soleado, la evolución es la típica parábola invertida de forma continua. Obviamente la salida del captador siempre es superior en caso de que haya radiación e igual cuando no hay radiación. Lógicamente en los días de verano y sin nubes se produce más energía en la

instalación solar y por tanto el salto de temperaturas es mayor para estos días, siendo 13.1 el salto en la Tª de salida del captador y 11.6 el salto en la salida del intercambiador.

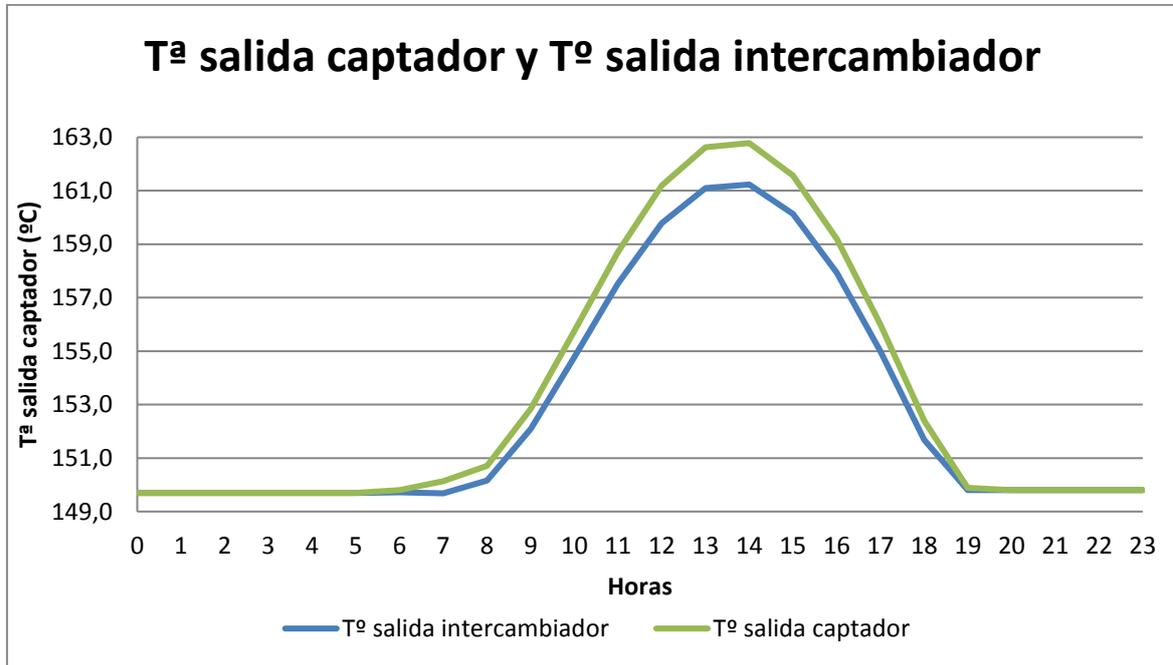


Figura 65 Evolución de Tª de salida del intercambiador y captador en un día soleado

#### Día nublado:(24/01/2016)

En la Figura 66 Evolución de Tª de salida del intercambiador y captador en un día nublado y en Tabla 20 Evolución de Tª de salida del intercambiador y captador en un día nublado se muestra los resultados de un día nublado.

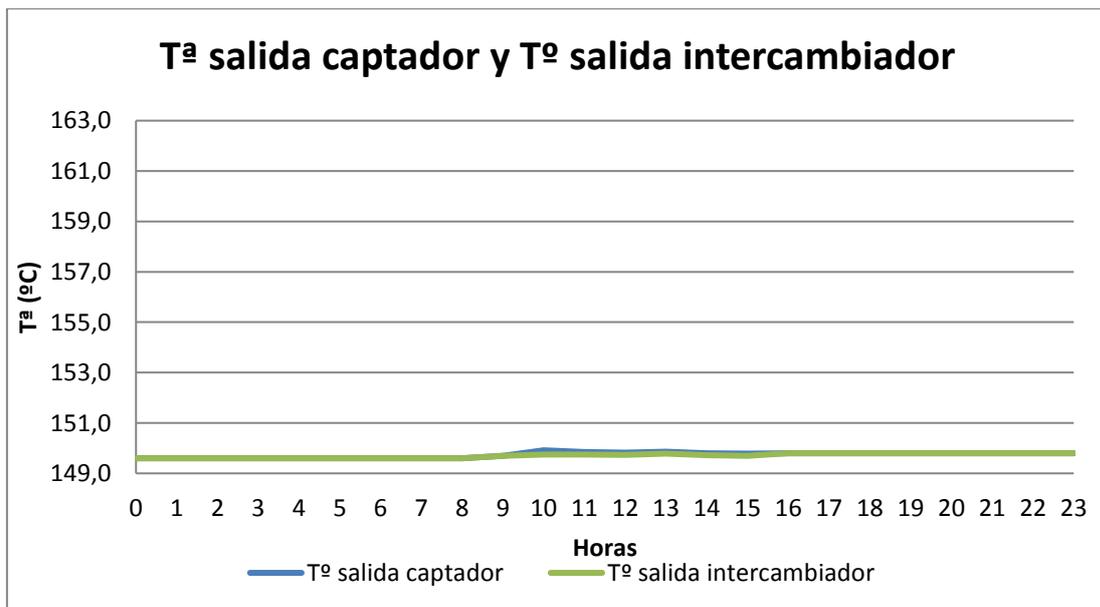


Figura 66 Evolución de Tª de salida del intercambiador y captador en un día nublado

| Hora | Radiación | Tº salida captador | Tº salida intercambiador |
|------|-----------|--------------------|--------------------------|
| 0    | 0         | 149,6              | 149,6                    |
| 1    | 0         | 149,6              | 149,6                    |
| 2    | 0         | 149,6              | 149,6                    |
| 3    | 0         | 149,6              | 149,6                    |
| 4    | 0         | 149,6              | 149,6                    |
| 5    | 0         | 149,6              | 149,6                    |
| 6    | 0         | 149,6              | 149,6                    |
| 7    | 30        | 149,6              | 149,6                    |
| 8    | 140       | 149,6              | 149,6                    |
| 9    | 519       | 149,7              | 149,7                    |
| 10   | 798       | 149,9              | 149,8                    |
| 11   | 638       | 149,9              | 149,8                    |
| 12   | 753       | 149,8              | 149,7                    |
| 13   | 708       | 149,9              | 149,8                    |
| 14   | 611       | 149,8              | 149,7                    |
| 15   | 615       | 149,8              | 149,7                    |
| 16   | 180       | 149,8              | 149,8                    |
| 17   | 21        | 149,8              | 149,8                    |
| 18   | 0         | 149,8              | 149,8                    |
| 19   | 0         | 149,8              | 149,8                    |
| 20   | 0         | 149,8              | 149,8                    |
| 21   | 0         | 149,8              | 149,8                    |
| 22   | 0         | 149,8              | 149,8                    |
| 23   | 0         | 149,8              | 149,8                    |

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| ATmax | 0,3   | 0,2   |
| MaxT  | 149,9 | 149,8 |
| MinT  | 149,6 | 149,6 |

Tabla 20 Evolución de Tº de salida del intercambiador y captador en un día nublado

En este caso, aunque la tendencia de la salida del intercambiador y del captador son casi invariante, la evolución no es continua y se producen cambios. Obviamente la salida del captador siempre es superior en caso de que haya radiación e igual cuando no hay radiación. Lógicamente en los días de invierno y nubes se produce menos energía en la instalación solar y por tanto el salto de temperaturas es casi nulo para estos días, siendo 0,3 el salto en la Tº de salida del captador y 0,2 el salto en la salida del intercambiador.

## 4. Análisis paramétrico

### 4.1 Introducción.

En este apartado se procede a hacer un análisis de la influencia de las principales variables sobre el rendimiento de captación y sobre el rendimiento de la instalación solar. Esto consiste en cambiar el valor de las variables en cuestión de estudio y dejar todas las demás igual que en el caso base.

Los indicadores que se comparan, rendimiento de captación y rendimiento de la instalación se definen de la siguiente manera:

- Rendimiento captación es el rendimiento del elemento responsable de transferir la energía procedente de la radiación solar al fluido. La fórmula es la siguiente:

$$\text{Rendimiento captación} = \frac{\text{Energía de captadores solares (MWh)}}{\text{Radiación} \left( \frac{\text{MWh}}{\text{m}^2} \right) * \text{Superficie de captación (m}^2\text{)}}$$

- Rendimiento instalación es el rendimiento del sistema completo objeto de estudio en este trabajo. La fórmula es la siguiente:

$$\text{Rendimiento instalación} = \frac{\text{Energía en el generador de vapor (MWh)}}{\text{Energía demandada en el proceso (MWh)}}$$

### 4.2 Área de captación.

En este apartado se estudia la influencia de la superficie de captación sobre los dos indicadores explicados, para ello dejamos a agrupación de captadores en serie fija en 4, de ahí que los números de captadores que se muestran en la tabla son múltiplo de 4. Esto significa que el salto de temperatura en el sistema de captación permanece igual a caso base y que lo que se modifica es el caudal de aceite térmico de la bomba, ya que al aumentar o disminuir captadores se aumenta o disminuye las agrupaciones en paralelo. En la Tabla 21 Resultados análisis paramétrico del área de captación y Figura 67 Resultados análisis paramétrico del área de captación se muestra los resultados.

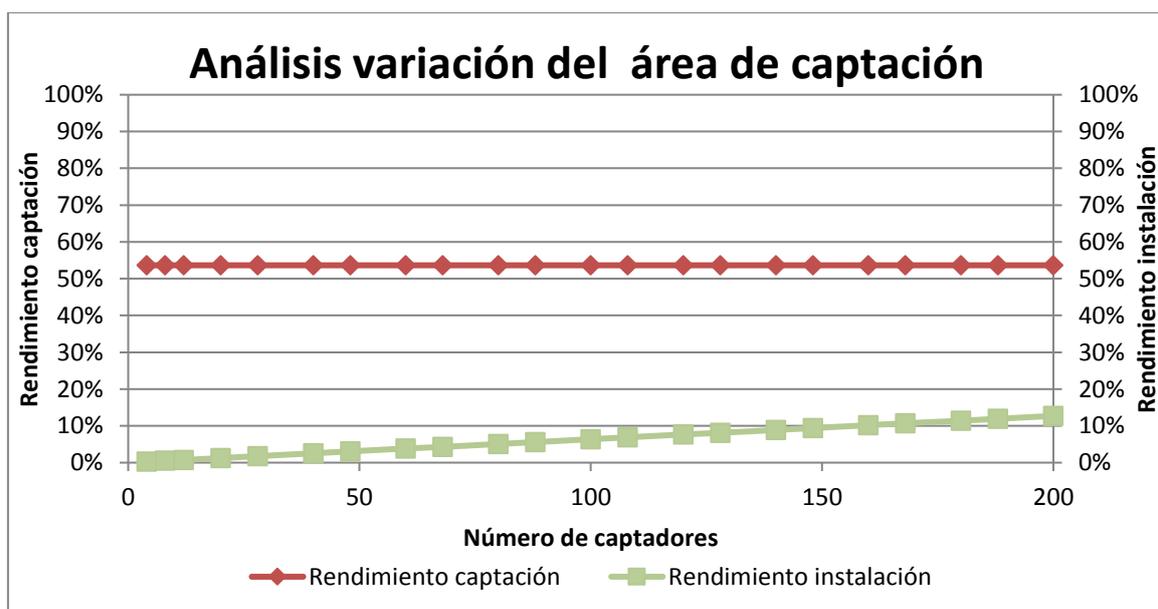


Figura 67 Resultados análisis paramétrico del área de captación

| Nº de captadores | Área de Captación(m <sup>2</sup> ) | Qsolar (MWh) | Qútil (MWh) | Qcaptación (MWh) | Qproceso (MWh) | Rendimiento captación | Rendimiento instalación |
|------------------|------------------------------------|--------------|-------------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| 4                | 52,8                               | 67           | 36          | 36               | 14035          | 53,642%               | 0,254%                  |
| 8                | 105,6                              | 133          | 71          | 71               | 14035          | 53,642%               | 0,508%                  |
| 12               | 158,4                              | 200          | 107         | 107              | 14035          | 53,642%               | 0,762%                  |
| 20               | 264                                | 333          | 178         | 178              | 14035          | 53,642%               | 1,271%                  |
| 28               | 369,6                              | 466          | 250         | 250              | 14035          | 53,642%               | 1,779%                  |
| 40               | 528                                | 665          | 357         | 357              | 14035          | 53,642%               | 2,542%                  |
| 48               | 633,6                              | 798          | 428         | 428              | 14035          | 53,642%               | 3,050%                  |
| 60               | 792                                | 998          | 535         | 535              | 14035          | 53,642%               | 3,813%                  |
| 68               | 897,6                              | 1131         | 607         | 607              | 14035          | 53,642%               | 4,321%                  |
| 80               | 1056                               | 1330         | 714         | 714              | 14035          | 53,642%               | 5,083%                  |
| 88               | 1161,6                             | 1463         | 785         | 785              | 14035          | 53,642%               | 5,592%                  |
| 100              | 1320                               | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,642%               | 6,354%                  |
| 108              | 1425,6                             | 1796         | 963         | 963              | 14035          | 53,642%               | 6,863%                  |
| 120              | 1584                               | 1995         | 1070        | 1070             | 14035          | 53,642%               | 7,625%                  |
| 128              | 1689,6                             | 2128         | 1142        | 1142             | 14035          | 53,642%               | 8,134%                  |
| 140              | 1848                               | 2328         | 1249        | 1249             | 14035          | 53,642%               | 8,896%                  |
| 148              | 1953,6                             | 2461         | 1320        | 1320             | 14035          | 53,642%               | 9,405%                  |
| 160              | 2112                               | 2660         | 1427        | 1427             | 14035          | 53,642%               | 10,169%                 |
| 168              | 2217,6                             | 2793         | 1498        | 1498             | 14035          | 53,642%               | 10,676%                 |
| 180              | 2376                               | 2993         | 1605        | 1605             | 14035          | 53,642%               | 11,438%                 |
| 188              | 2481,6                             | 3126         | 1677        | 1677             | 14035          | 53,642%               | 11,947%                 |
| 200              | 2640                               | 3326         | 1784        | 1784             | 14035          | 53,642%               | 12,709%                 |

Tabla 21 Resultados análisis paramétrico del área de captación

El rendimiento solar no depende de la superficie de captación (número total de captadores) debido a que al aumentar el  $Q_{solar}$  aumenta de manera proporcional  $Q_{egv}$ , lo que es lógico ya que este parámetro no interviene en la fórmula del rendimiento. Lo que si influye es el número de captadores en serie, ya que esto modifica el salto de temperatura que si influye en la fórmula del rendimiento del captador.

Por otro lado, influye de manera directamente proporcional en la “cobertura solar”, debido que a mayor superficie de captación mayor energía se genera y como la energía del proceso permanece igual hace que aumente la “cobertura solar”, he de ahí que la tendencia sea una recta con pendiente positiva.

### 4.3 Agrupación de captadores en serie.

En este apartado se varía el número de captadores en serie dejando constante la superficie de captación, lo que implica que también se cambiará el número de agrupaciones en paralelo y por tanto el caudal de la bomba. Al cambiar los captadores en serie varía el salto de temperatura, del cual depende el rendimiento. En la Tabla 22 Resultados análisis paramétrico

de captadores en serie y Figura 68 Resultados análisis paramétrico de captadores en serie se muestra los resultados.

| Nº de captadores serie | Área de Captación (m <sup>2</sup> ) | Qsolar (MWh) | Qútil (MWh) | Qcaptación (MWh) | Qproceso (MWh) | Rendimiento captación | Rendimiento instalación |
|------------------------|-------------------------------------|--------------|-------------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| 1                      | 1320                                | 1663         | 899         | 899              | 14035          | 54,04%                | 6,40%                   |
| 2                      | 1320                                | 1663         | 898         | 898              | 14035          | 53,98%                | 6,40%                   |
| 4                      | 1320                                | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,35%                   |
| 5                      | 1320                                | 1663         | 889         | 889              | 14035          | 53,44%                | 6,33%                   |
| 10                     | 1320                                | 1663         | 870         | 870              | 14035          | 52,33%                | 6,20%                   |
| 20                     | 1320                                | 1663         | 832         | 832              | 14035          | 50,03%                | 5,93%                   |
| 25                     | 1320                                | 1663         | 812         | 813              | 14035          | 48,88%                | 5,79%                   |
| 50                     | 1320                                | 1663         | 718         | 720              | 14035          | 43,31%                | 5,11%                   |
| 100                    | 1320                                | 1663         | 565         | 567              | 14035          | 34,10%                | 4,02%                   |

Tabla 22 Resultados análisis paramétrico de captadores en serie

Se comprueba que al aumentar el salto de temperatura, debido a más captadores en serie, el calor obtenido en la captación es menor, tal como indica la fórmula de del rendimiento con la que se modela el sistema de captación. A dicha relación hay que sumarle que al aumentar el número de captadores en serie y dejar constante el total de captadores, el número de agrupaciones en paralelo también cae y por tanto el caudal de la bomba.

La tendencia es prácticamente lineal, ya que la diferencia de rendimiento de captación entre los dos extremo de la tabla es de 19.9%, siendo casi la mitad la diferencia entre 1 y 50 captadores en serie, 10.73%, y casi la otra mitad la diferencia entre 50 y 100, 9.21%. Esto ocurre de forma análoga en el otro indicador pero con una diferencia total de 2.38%, 1.29 entre 1 y 50 captadores y 1.09 entre 50 y 100.

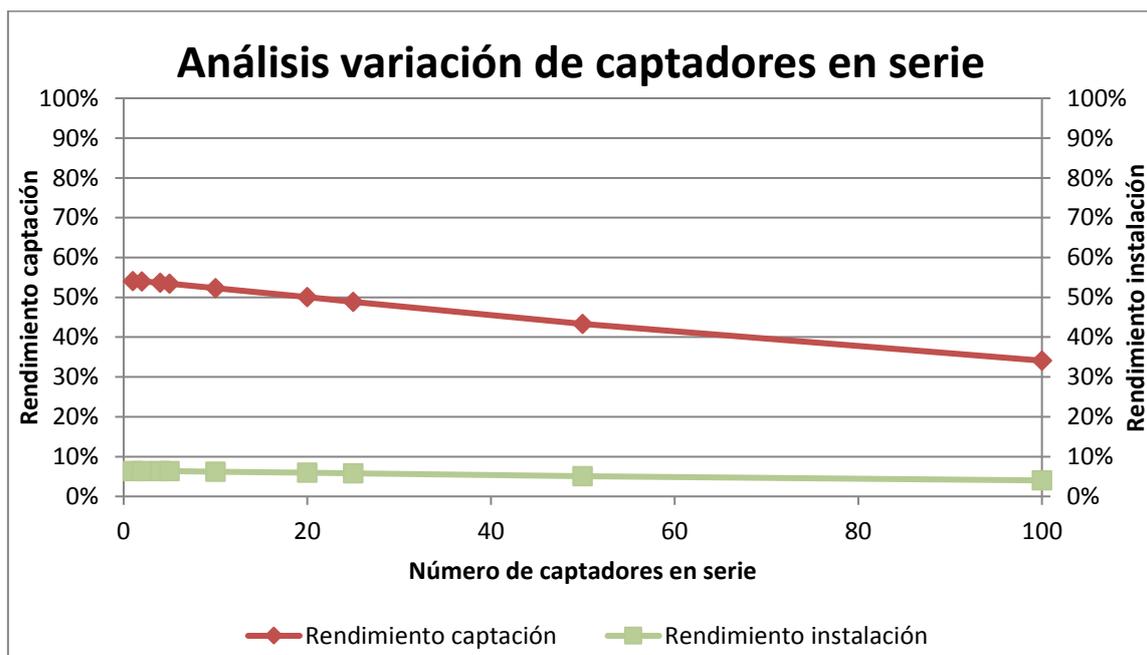


Figura 68 Resultados análisis paramétrico de captadores en serie

#### 4.4 Caudal de aceite en serie.

Al variar el caudal que pasa por los captadores, hay que multiplicar las constantes de la fórmula del rendimiento por un coeficiente,  $C_m$ , este coeficiente es un factor corrector de  $F_R$  porque el caudal influye fundamentalmente en  $F_R$ . El factor corrector es el cociente  $(F_R)_{new}/(F_R)_{old}$  y se calcula con la siguiente fórmula:

$$\frac{(F_R)_{new}}{(F_R)_{old}} = \left[ 1 + \frac{(F_R U_L)_{old}}{2(\dot{m} C_p)_{new}} - \frac{(F_R U_L)_{old}}{2(\dot{m} C_p)_{old}} \right]^{-1}$$

Siendo  $\dot{m}$  el caudal el caudal másico del captador y  $C_p$  el calor específico.

Primero se muestra la evolución del coeficiente  $C_m$  con la variación de caudal. Se observa que  $C_m$  varía muy poco al ser un caudal elevado.

| $Q_{instalación}/Q_{ensayo}$ | Caudal <sub>instalación</sub> | $C_m$ | $F'U_L$ | $F_R U_L$ |
|------------------------------|-------------------------------|-------|---------|-----------|
| 0,25                         | 2,115                         | 0,999 | 3,066   | 3,066     |
| 0,5                          | 4,231                         | 0,999 | 3,066   | 3,066     |
| 0,75                         | 6,347                         | 0,999 | 3,066   | 3,066     |
| 1                            | 8,462                         | 1     | 3,066   | 3,066     |
| 1,5                          | 12,693                        | 1     | 3,066   | 3,066     |
| 2                            | 16,924                        | 1     | 3,066   | 3,066     |
| 2,5                          | 21,155                        | 1     | 3,066   | 3,066     |
| 3                            | 25,386                        | 1     | 3,066   | 3,066     |
| 4                            | 33,848                        | 1     | 3,066   | 3,066     |

Tabla 23 Parámetro de corrección por caudal.

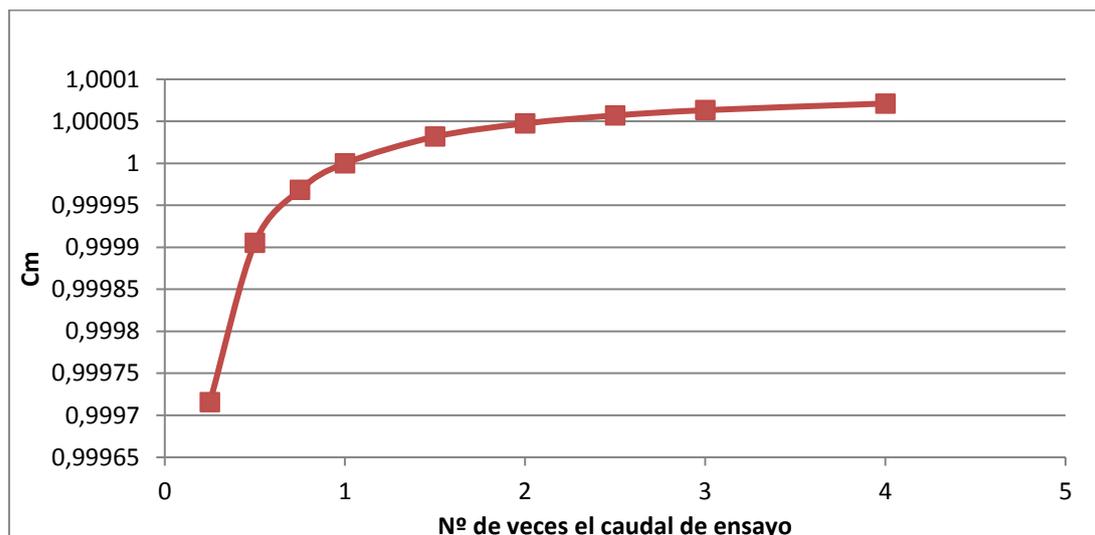


Figura 69 Parámetro de corrección por caudal.

Al ser un caudal elevado, el  $C_m$  varía relativamente poco por lo que el cambio de caudal tiene poca influencia en los coeficientes de la fórmula del rendimiento.

Con esto procedemos a calcular el análisis paramétrico de la variable caudal.

| $Q_{\text{instalación}}/Q_{\text{ensayo}}$ | Caudal instalación (kg/s) | $Q_{\text{solar}}$ (MWh) | Útil (MWh) | $Q_{\text{captación}}$ (MWh) | $Q_{\text{proceso}}$ (MWh) | Rendimiento o captación | Rendimiento instalación |
|--|---------------------------|--------------------------|------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0,2  | 1,69                      | 1663                     | 832        | 832                          | 14035                      | 50,03%                  | 5,93%                   |
| 0,4  | 3,38                      | 1663                     | 870        | 870                          | 14035                      | 52,33%                  | 6,20%                   |
| 0,6  | 5,08                      | 1663                     | 883        | 883                          | 14035                      | 53,08%                  | 6,29%                   |
| 0,8  | 6,77                      | 1663                     | 889        | 889                          | 14035                      | 53,44%                  | 6,33%                   |
| 1  | 8,46                      | 1663                     | 892        | 892                          | 14035                      | 53,64%                  | 6,35%                   |
| 1,2  | 10,15                     | 1663                     | 894        | 894                          | 14035                      | 53,77%                  | 6,37%                   |
| 1,4  | 11,85                     | 1663                     | 895        | 895                          | 14035                      | 53,85%                  | 6,38%                   |
| 1,6  | 13,54                     | 1663                     | 897        | 896                          | 14035                      | 53,91%                  | 6,39%                   |
| 1,8  | 15,23                     | 1663                     | 897        | 897                          | 14035                      | 53,95%                  | 6,39%                   |
| 2  | 16,92                     | 1663                     | 898        | 898                          | 14035                      | 53,98%                  | 6,40%                   |
| 2,2  | 18,62                     | 1663                     | 898        | 898                          | 14035                      | 54,00%                  | 6,40%                   |
| 2,4  | 20,31                     | 1663                     | 898        | 898                          | 14035                      | 54,02%                  | 6,40%                   |
| 2,6  | 22,00                     | 1663                     | 898        | 898                          | 14035                      | 54,03%                  | 6,40%                   |
| 2,8  | 23,69                     | 1663                     | 899        | 898                          | 14035                      | 54,03%                  | 6,40%                   |
| 3  | 25,39                     | 1663                     | 899        | 899                          | 14035                      | 54,04%                  | 6,40%                   |

Tabla 24 Resultados análisis paramétrico caudal de aceite térmico.

En el caso del caudal de aceite, tiene una influencia idéntica tanto en el rendimiento solar como en la cobertura solar, ambas aumentan de manera logarítmica, donde el salto en ambos indicadores es elevado cuando el caudal varía entre 2-7 kg/s y permanece casi invariante a partir de los 15 kg/s.

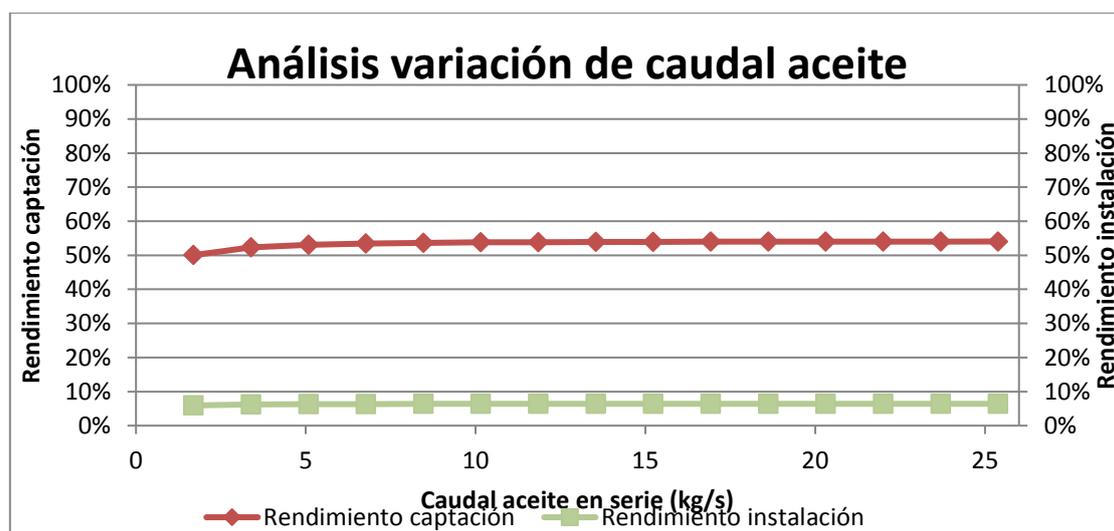


Figura 70 Resultados análisis paramétrico del caudal de aceite.

#### 4.5 Efectividad del intercambiador con cambio de fase.

Tal como se ha modelado el intercambiador, el parámetro que lo caracteriza es la efectividad, ya que se utiliza el método  $Q_{\text{max}}$ . Además al modelarse como dos intercambiadores en serie,

antes dicho, la importancia de la efectividad de cada uno de ellos dependerá del porcentaje de calor intercambiado en ambos. Puesto que en el intercambiador con cambio de fase se produce el 99% del total del calor transferido para generar vapor, su importancia es mayor a la del intercambiador sin cambio de fase.

En la Tabla 25 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador con cambio de fase y Figura 71 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador con cambio de fase se muestra los resultados.

| ε int camb fase | Qsolar (MWh) | Qútil (MWh) | Qcaptación (MWh) | Qproceso (MWh) | Rendimiento captación | Rendimiento instalación |
|-----------------|--------------|-------------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| 0,50            | 1663         | 885         | 885              | 14035          | 53,22%                | 6,31%                   |
| 0,55            | 1663         | 887         | 887              | 14035          | 53,32%                | 6,32%                   |
| 0,60            | 1663         | 888         | 888              | 14035          | 53,40%                | 6,33%                   |
| 0,65            | 1663         | 889         | 889              | 14035          | 53,47%                | 6,33%                   |
| 0,70            | 1663         | 890         | 890              | 14035          | 53,53%                | 6,34%                   |
| 0,75            | 1663         | 891         | 891              | 14035          | 53,59%                | 6,35%                   |
| 0,80            | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,35%                   |
| 0,85            | 1663         | 893         | 893              | 14035          | 53,69%                | 6,36%                   |
| 0,90            | 1663         | 893         | 893              | 14035          | 53,73%                | 6,37%                   |
| 0,95            | 1663         | 894         | 894              | 14035          | 53,76%                | 6,37%                   |
| 1,00            | 1663         | 894         | 894              | 14035          | 53,79%                | 6,37%                   |

Tabla 25 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador con cambio de fase

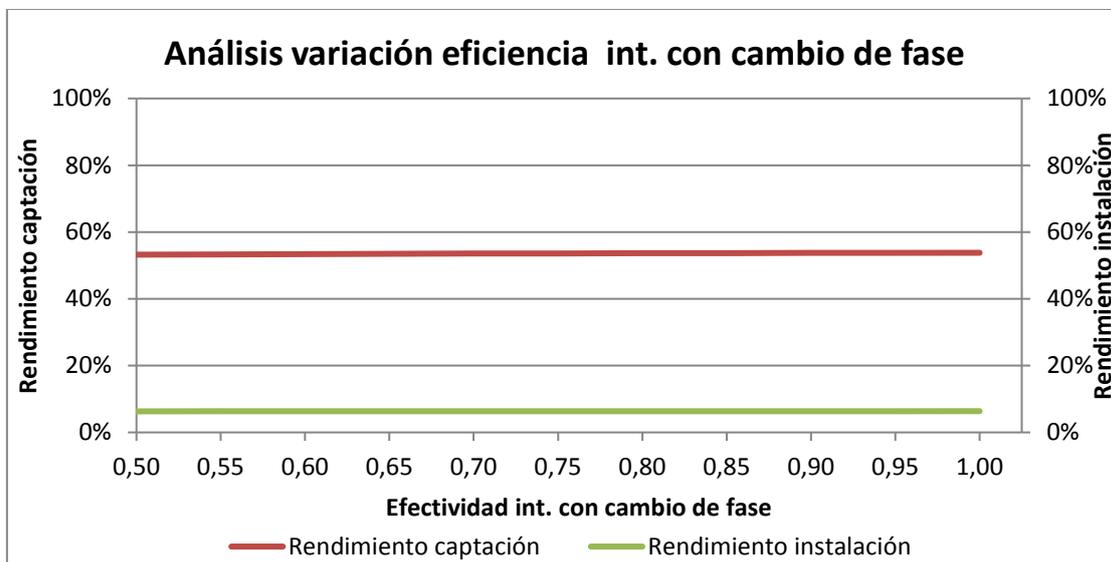


Figura 71 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador con cambio de fase

Al variar este parámetro tiene una influencia casi nula, ya que la diferencia de los dos indicadores estudiado para una efectividad de 0.5 y otra de 1 es de 0.57% en el rendimiento de captación y un 0.06 en el rendimiento de la instalación. Esto es totalmente lógico ya que se ha considerado un intercambiador sin pérdidas, es decir el calor que entra con el aceite se lo lleva el vapor, lo que si influye es en el salto de temperatura en él.

Aun así tiene una influencia idéntica en los dos indicadores estudiados, en este caso aumentan de manera proporcional a la efectividad, ya que al aumentar la efectividad se transfiere más energía en el generador de calor y por tanto se obtiene más vapor para el proceso.

#### 4.6 Efectividad del intercambiador sin cambio de fase.

Si la efectividad en el intercambiador con cambio de fase tiene poca influencia, aún menos tiene la del intercambiador sin cambio de fase, que transfiere un 1% del calor total intercambiado en el generador de vapor.

Para comprobarlo, se muestran los resultados en Tabla 26 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador sin cambio de fase y Figura 72 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador sin cambio de fase. En este caso la influencia es igual a la vista en el caso anterior pero con mucha menos importancia, casi inapreciable. De hecho, el rendimiento solar solo varía 0.005% y la cobertura solar aún menos.

| $\epsilon$ int sin camb fase | Qsolar (MWh) | Qútil (MWh) | Qcaptación (MWh) | Qproceso (MWh) | Rendimiento captación | Rendimiento instalación |
|------------------------------|--------------|-------------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| 0,50                         | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,35%                   |
| 0,55                         | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,35%                   |
| 0,60                         | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,35%                   |
| 0,65                         | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,35%                   |
| 0,70                         | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,35%                   |
| 0,75                         | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,36%                   |
| 0,80                         | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,36%                   |
| 0,85                         | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,36%                   |
| 0,90                         | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,36%                   |
| 0,95                         | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,36%                   |
| 1,00                         | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,65%                | 6,36%                   |

Tabla 26 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador sin cambio de fase

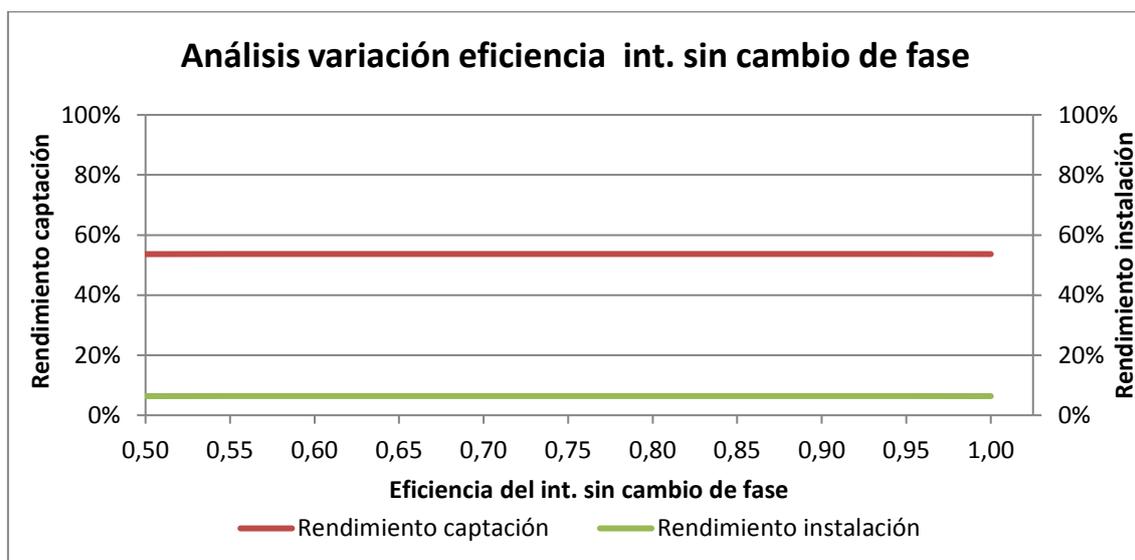


Figura 72 Resultados análisis paramétrico efectividad intercambiador sin cambio de fase

#### 4.7 Temperatura de consigna.

La temperatura de consigna se trata del umbral que ha de superar el aceite térmico para que se abra la válvula de tres vías, y por tanto, el aceite circule por el intercambiador y se genere vapor. En caso de no superar esta temperatura el aceite recircula para volverse a calentar en el captador.

Por tanto, esta variable determina directamente el salto de temperatura en el intercambiador y afecta al calor intercambiado. En Tabla 27 Resultados análisis paramétrico temperatura de consigna y Figura 73 Resultados análisis paramétrico temperatura de consigna se muestra los resultados de cambiar el valor de esta variable.

| Tº consigna (°C) | Qsolar (MWh) | Qútil (MWh) | Qcaptación (MWh) | Qproceso (MWh) | Rendimiento captación | Rendimiento instalación |
|------------------|--------------|-------------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| 140              | 1663         | 883         | 896              | 14035          | 53,09%                | 6,29%                   |
| 142              | 1663         | 883         | 896              | 14035          | 53,09%                | 6,29%                   |
| 144              | 1663         | 888         | 896              | 14035          | 53,43%                | 6,33%                   |
| 146              | 1663         | 895         | 895              | 14035          | 53,84%                | 6,38%                   |
| 148              | 1663         | 894         | 894              | 14035          | 53,75%                | 6,37%                   |
| 150              | 1663         | 892         | 892              | 14035          | 53,64%                | 6,35%                   |
| 152              | 1663         | 890         | 890              | 14035          | 53,50%                | 6,34%                   |
| 154              | 1663         | 887         | 887              | 14035          | 53,33%                | 6,32%                   |
| 156              | 1663         | 884         | 884              | 14035          | 53,14%                | 6,30%                   |
| 158              | 1663         | 880         | 881              | 14035          | 52,93%                | 6,27%                   |
| 160              | 1663         | 876         | 877              | 14035          | 52,71%                | 6,24%                   |
| 162              | 1663         | 872         | 873              | 14035          | 52,47%                | 6,22%                   |
| 164              | 1663         | 868         | 869              | 14035          | 52,22%                | 6,19%                   |
| 166              | 1663         | 864         | 865              | 14035          | 51,96%                | 6,16%                   |
| 168              | 1663         | 860         | 860              | 14035          | 51,70%                | 6,12%                   |
| 170              | 1663         | 855         | 856              | 14035          | 51,43%                | 6,09%                   |

Tabla 27 Resultados análisis paramétrico temperatura de consigna

La influencia de la temperatura de consigna, a partir de la cual el aceite térmico empieza a pasar por el generador de calor, tiene tres partes bien diferenciadas:

- 140 °C-143,6 °C: permanece constante al ser menor que la temperatura de vapor y por tanto tendrían el mismo comportamiento ya que sería como si no hubiese esta consigna y el aceite siempre circularía por el intercambiador. Además, habría menos ocasiones en las que se pueda generar vapor ya que no se supera la temperatura de saturación, necesitando más radiación para superarla. Por este motivo, en estos casos el calor de captación es mayor que el de intercambiador.
- 143.6 °C-aprox146 °C: se produce un aumento de los dos indicadores hasta llegar al máximo, el cual está en torno a una temperatura de 146 °C. Este máximo sería el óptimo para coger, aunque en el caso base se trabaja con 150 °C.

- A partir de este máximo, a medida que se aumenta la consigna se disminuye la energía obtenida para el proceso ya que el aceite circularía en menos ocasiones por el generador de calor debido a que le “costaría más” llegar a esa temperatura.

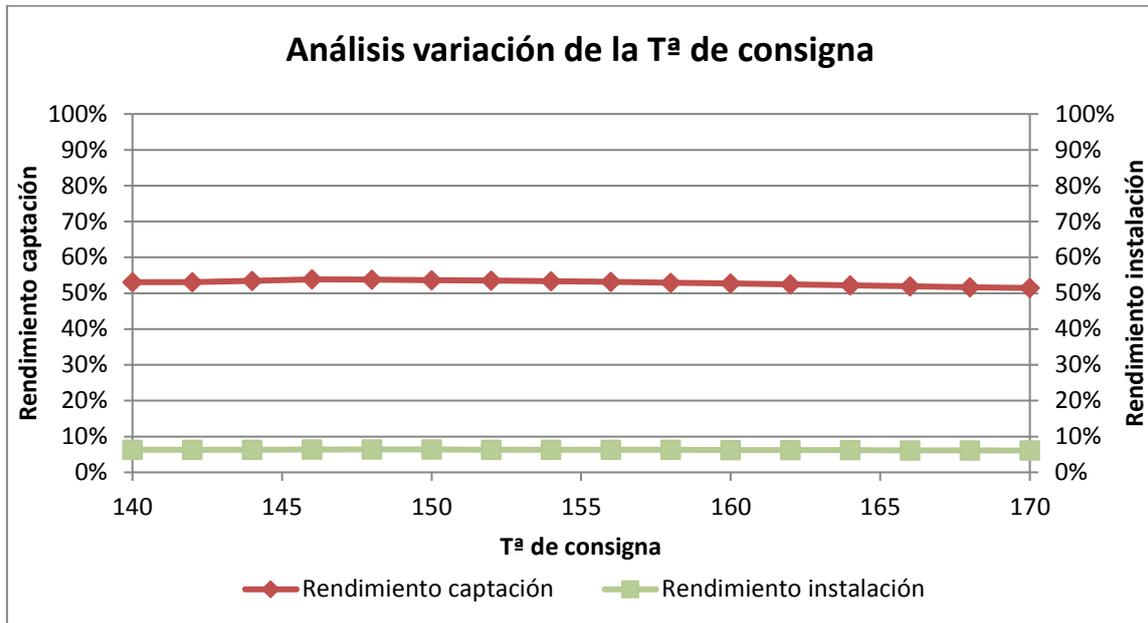


Figura 73 Resultados análisis paramétrico temperatura de consigna

#### 4.8 Perfil demanda de vapor

La curva de demanda de vapor se ha considerado constante de 06:00 a 22:00, a continuación, se estudian dos casos en los que se varía esta demanda del proceso industrial.

##### A. Variación de la demanda 1.

Para este caso, la demanda no será constante durante las horas de uso pero si por escalones, es decir el valor del caudal demandado será constante en cada hora pero este valor no es el mismo en todas las horas de demanda. En la Figura 74 Curva demanda de vapor en variación 1 se muestra la curva de demanda caudal de vapor.

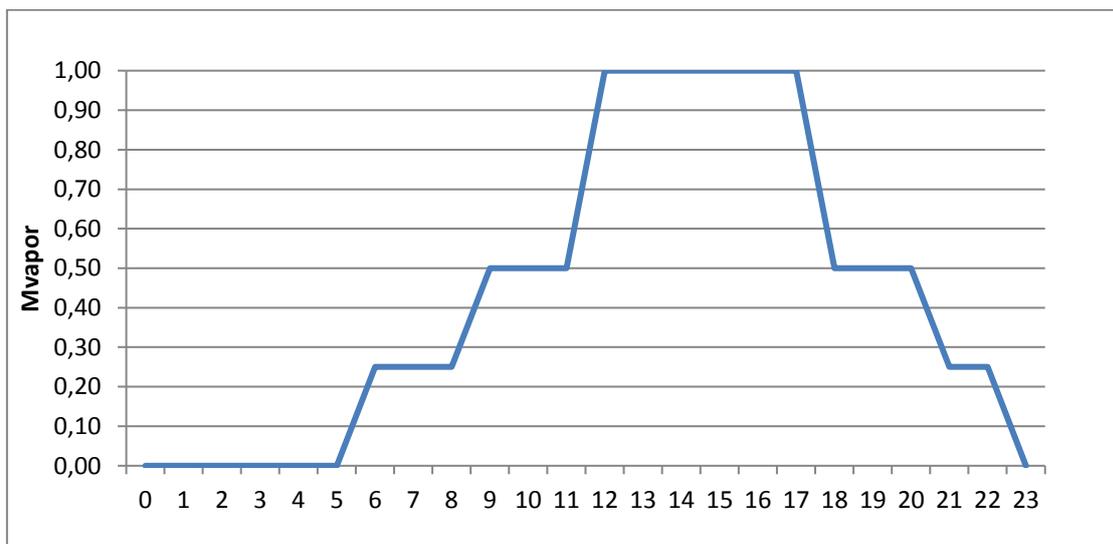


Figura 74 Curva demanda de vapor en variación 1

Con esto, vemos los resultados en Tabla 28 Resultados mensuales y anuales de la variación demanda 1 y Figura 75 Resultados mensuales variación demanda 1.

Si comparamos los resultados con el caso base, vemos que todos los resultados coinciden, excepto la energía del proceso obviamente. Al ser la demanda menor, el rendimiento de la instalación solar aumenta.

Los resultados no varían ya que el vapor producido en la instalación en ningún momento supera el demandado, tal como ocurría en el caso base. Por este motivo la variación de la demanda no influye en los resultados, excepto en el rendimiento total de la instalación.

| Mes        | Qsolar (MWh) | Qútil (MWh) | Qcaptación (MWh) | Qproceso (MWh) | Rendimiento captación | Rendimiento instalación |
|------------|--------------|-------------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| Enero      | 66           | 29          | 29               | 764            | 44,78%                | 3,84%                   |
| Febrero    | 78           | 37          | 37               | 690            | 47,46%                | 5,34%                   |
| Marzo      | 120          | 62          | 62               | 764            | 51,55%                | 8,08%                   |
| Abril      | 148          | 80          | 80               | 739            | 54,18%                | 10,81%                  |
| Mayo       | 197          | 109         | 109              | 764            | 55,35%                | 14,26%                  |
| Junio      | 212          | 120         | 120              | 739            | 56,41%                | 16,19%                  |
| Julio      | 240          | 137         | 137              | 764            | 57,09%                | 17,96%                  |
| Agosto     | 214          | 121         | 121              | 764            | 56,64%                | 15,90%                  |
| Septiembre | 147          | 80          | 80               | 739            | 54,39%                | 10,84%                  |
| Octubre    | 110          | 57          | 57               | 764            | 51,49%                | 7,43%                   |
| Noviembre  | 73           | 34          | 34               | 739            | 46,90%                | 4,64%                   |
| Diciembre  | 58           | 26          | 26               | 764            | 44,39%                | 3,40%                   |
| Total      | 1663         | 892         | 892              | 8991           | 53,64%                | 9,92%                   |

Tabla 28 Resultados mensuales y anuales de la variación demanda 1

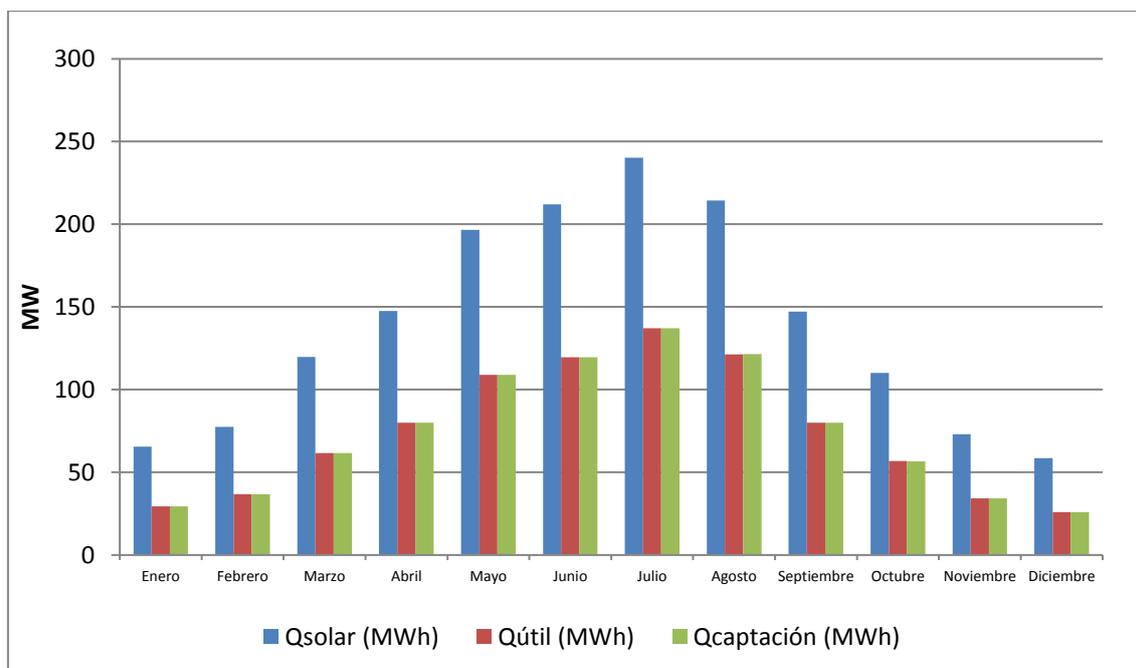


Figura 75 Resultados mensuales variación demanda 1

B. Variación de la demanda 2.

Para este caso, la demanda tendrá un perfil que irá aumentando de manera lineal hasta las 12:00, este se mantendrá constante hasta las 16:00, donde empezará a disminuir hasta las 22:00. En Figura 76 Curva demanda de vapor en variación 2 se muestra la curva de demanda caudal de vapor.

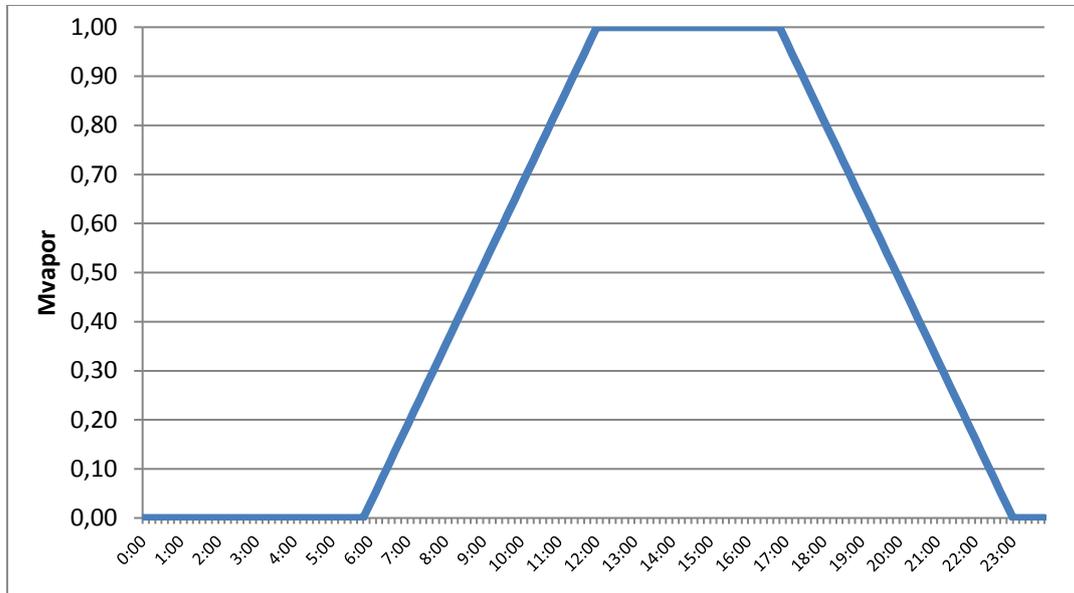


Figura 76 Curva demanda de vapor en variación 2

Con esto, vemos los resultados en Tabla 29 Resultados mensuales y anuales de la variación demanda 2 y Figura 77 Resultados mensuales variación demanda 2.

| Mes        | Qsolar (MWh) | Qútil (MWh) | Qcaptación (MWh) | Qproceso (MWh) | Rendimiento captación | Rendimiento instalación |
|------------|--------------|-------------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| Enero      | 66           | 29          | 29               | 820            | 44,78%                | 3,58%                   |
| Febrero    | 78           | 37          | 37               | 740            | 47,46%                | 4,98%                   |
| Marzo      | 120          | 62          | 62               | 820            | 51,55%                | 7,53%                   |
| Abril      | 148          | 80          | 80               | 793            | 54,18%                | 10,08%                  |
| Mayo       | 197          | 109         | 109              | 820            | 55,35%                | 13,29%                  |
| Junio      | 212          | 120         | 120              | 793            | 56,41%                | 15,08%                  |
| Julio      | 240          | 137         | 137              | 820            | 57,09%                | 16,73%                  |
| Agosto     | 214          | 121         | 121              | 820            | 56,64%                | 14,81%                  |
| Septiembre | 147          | 80          | 80               | 793            | 54,39%                | 10,10%                  |
| Octubre    | 110          | 57          | 57               | 820            | 51,49%                | 6,92%                   |
| Noviembre  | 73           | 34          | 34               | 793            | 46,90%                | 4,32%                   |
| Diciembre  | 58           | 26          | 26               | 820            | 44,39%                | 3,17%                   |
| Total      | 1663         | 892         | 892              | 9649           | 53,64%                | 9,24%                   |

Tabla 29 Resultados mensuales y anuales de la variación demanda 2

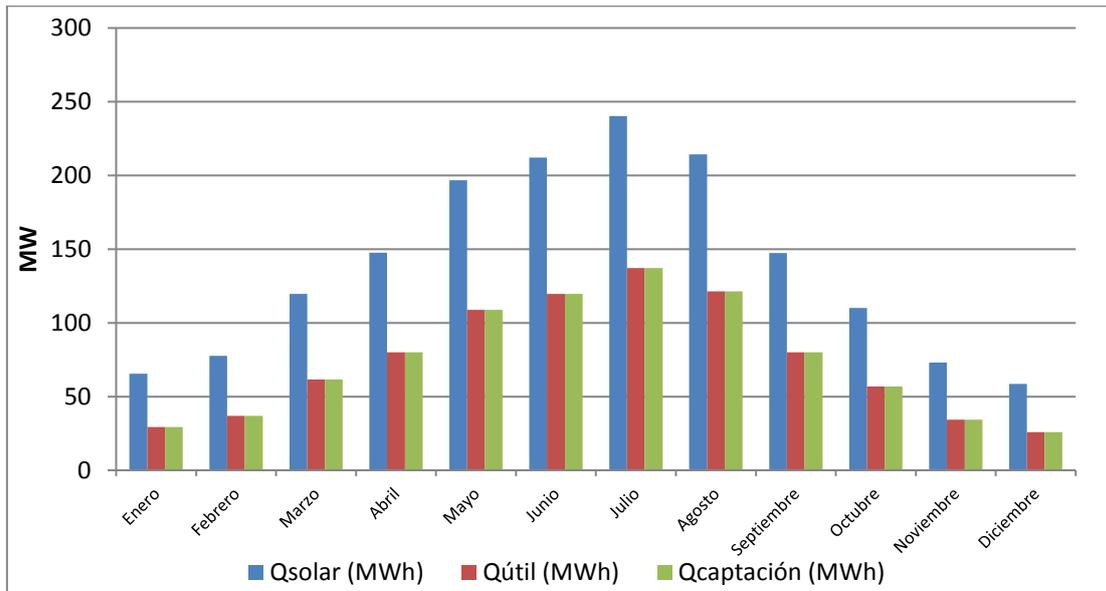


Figura 77 Resultados mensuales variación demanda 2

De nuevo comprobamos que da los mismos resultados que en el caso anterior y que en el caso base, excepto la energía del proceso. En este caso disminuimos aún más la demanda de vapor del proceso, como se puede ver en el rendimiento de la instalación.

En este caso, al igual que en el anterior y en el caso base, el vapor producido en la instalación en ningún momento supera el demandado. Con esto podemos afirmar con mayor certeza que la variación de la demanda no influye en los resultados, excepto en el rendimiento total de la instalación.

### C. Variación de la demanda 3.

En esta ocasión mantendremos la misma demanda que en el caso base, pero reduciremos el caudal de demanda de 1kg/s a 0,25 kg/s. En la Figura 78 Curva demanda de vapor en variación 3 se muestra la curva de demanda caudal de vapor.

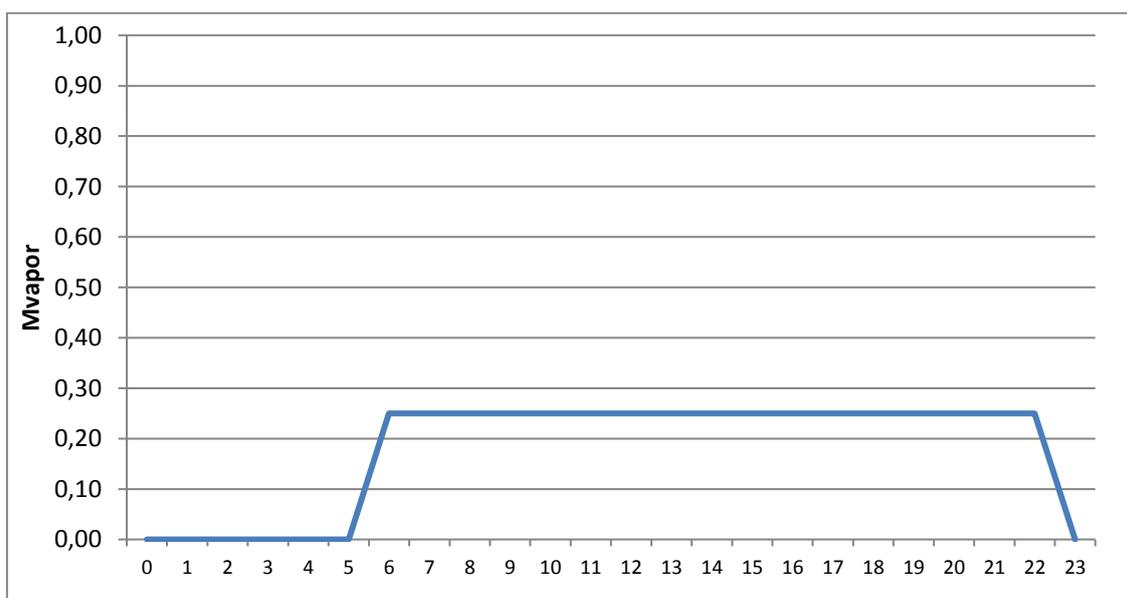


Figura 78 Curva demanda de vapor en variación 3

Con esto, vemos los resultados en la Tabla 30 Resultados mensuales y anuales de la variación demanda 3 y Figura 79 Resultados mensuales variación demanda 3

| Mes        | Qsolar (MWh) | Qútil (MWh) | Qcaptación (MWh) | Qproceso (MWh) | Rendimiento captación | Rendimiento instalación |
|------------|--------------|-------------|------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| Enero      | 66           | 29          | 29               | 317            | 44,78%                | 9,27%                   |
| Febrero    | 78           | 37          | 37               | 286            | 47,46%                | 12,88%                  |
| Marzo      | 120          | 62          | 62               | 317            | 51,55%                | 19,48%                  |
| Abril      | 148          | 80          | 80               | 306            | 54,18%                | 26,07%                  |
| Mayo       | 197          | 108         | 109              | 317            | 55,35%                | 34,25%                  |
| Junio      | 212          | 119         | 120              | 306            | 56,41%                | 38,75%                  |
| Julio      | 240          | 136         | 137              | 317            | 57,09%                | 43,08%                  |
| Agosto     | 214          | 121         | 121              | 317            | 56,64%                | 38,34%                  |
| Septiembre | 147          | 80          | 80               | 306            | 54,39%                | 26,13%                  |
| Octubre    | 110          | 57          | 57               | 317            | 51,49%                | 17,92%                  |
| Noviembre  | 73           | 34          | 34               | 306            | 46,90%                | 11,19%                  |
| Diciembre  | 58           | 26          | 26               | 317            | 44,39%                | 8,20%                   |
| Total      | 1663         | 890         | 892              | 3728           | 53,64%                | 23,87%                  |

Tabla 30 Resultados mensuales y anuales de la variación demanda 3

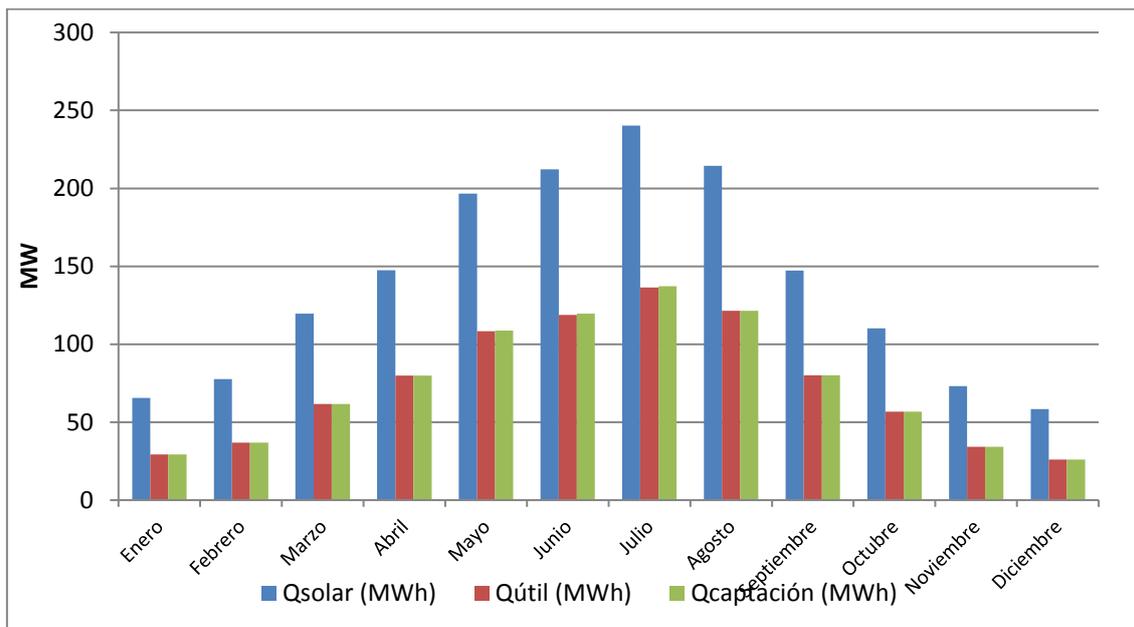


Figura 79 Resultados mensuales variación demanda 3

En este caso el vapor producido en la instalación supera el demandado en algún momento, por lo que, al no tener almacenamiento, este calor se perdería. Por este motivo, en este caso, la energía útil del intercambiador no es igual a la energía solar captada.

Con esto concluimos que lo que influye en la variación de la demanda influye sobre los resultados, excepto el rendimiento de la instalación, solo si se da que el vapor producido en la instalación supera el demandado en algún momento

## 5. Resumen y Conclusiones

El presente trabajo tiene dos partes diferenciadas, una descriptiva del estado actual de sistemas solares en la industria y otra de simulación de un caso base junto con un análisis paramétrico de algunas de las variables que intervienen en dicho sistema.

Empieza con resumen del consumo energético en España, se aprecia que el petróleo sigue siendo la parte más importante del mix energético de energía final y primaria, donde las renovables aún siguen siendo una mínima parte. Aunque el consumo total aumento en 2016 con respecto a 2015, en el sector industrial disminuyó siguiendo la tendencia desde 2010.

Se describen los sistemas solares en la industria y se realiza una introducción de sistema de generación térmica, los elementos que componen estos sistemas y clasificación. Continúa con la situación actual de la tecnología donde se destaca que actualmente se llega a proporcionar temperaturas de hasta 400°C, potencialmente cumpliendo casi el 50% de la demanda de calor en el sector industrial (IRENA) y determinando el rango de temperaturas para cada tecnología de captación solar (captadores planos, de tubos de vacío, cilindro-parabólicos, Fresnel lineales, etc...) además de una breve estimación de precios. Se estudia la clasificación de las instalaciones de energía solar en el sector industrial donde se indica que para el diseño de la instalación hay que tener en cuenta fundamentalmente el fluido caloportador utilizado en el proceso y la temperatura del proceso, por lo que la clasificación se basa en estos. El punto 4, es de especial importancia, debido a que se explica los diferentes tipos de integración del sistema solar en la industria, la cual se puede realizar a nivel de suministro de energía o a nivel de proceso, lo cual depende de la necesidad y optimización del proceso en cuestión, mostrándose ejemplo de diferentes tipologías. Además, se muestran algunos de los proyectos más importantes que actualmente están operando en el mundo y España junto con sus principales características. Esta parte descriptiva, termina con estadísticas de instalaciones solares térmicas para procesos industriales, donde se ven las aplicaciones según su superficie de captación, tecnología, proceso, etc..., destacando que un gran porcentaje de potencia instalada pertenece a un pequeño grupo de grandes instalaciones.

Se ha implementado un programa en EES donde se modela un sistema solar completo para un proceso industrial. Se trata de un simulador de cada una de las ecuaciones propias de los elementos que intervienen, teniendo un total de 58 variables. Esta simulación se basa en periodos diezminutales, por lo que al simularse un año se tienen 52560. Se ha utilizado el EES debido a su versatilidad, utilidad y base de datos de propiedades que posee. Se explica y detalla todo el modelado de la instalación, incluyendo las ecuaciones utilizadas y las secuencias de los procesos. Una vez se ha explicado el modelo, se describe en profundidad el caso base, clasificándolo según lo explicado en la parte descriptiva y enumerando todos los datos de entrada junto con la fuente de estos, se trata de un "sistema de calentamiento indirecto en el sistema de generación de vapor" en el que se utiliza aceite térmico como fluido calo portador y captadores cilindroparabólicos, los cuales se modelan con las características de la mejor tecnología disponible según la referencia 3. Otros datos importantes del caso base son que está localizado en Sevilla y se utilizan los datos de 2017 y la demanda es constante entre las 06:00 a las 22:00

Tras simularlo, se muestran detalladamente los resultados del caso base explicado, aunque la simulación se realiza en bloques de diez minutos, estos resultados se muestran mensuales para su mejor análisis, siendo unos resultados lógicos para las características comentados. Tras observar los resultados de caso base, se realiza un análisis paramétrico de forma que se estudie la influencia de las variables más importantes, las cuales son área de captación, agrupación de captadores en serie, caudal de aceite en serie, efectividad del intercambiador con cambio de fase, efectividad del intercambiador sin cambio de fase, temperatura de consigna y perfil demanda de vapor.

Tras el estudio en el presente trabajo se pueden sacar las siguientes conclusiones respecto a instalaciones existentes y a la simulación realizada:

- Es fundamental la temperatura del proceso, debiendo realizar un estudio personalizado para poder determinar su tipo de integración, esquema, elementos, etc...
- La mayor parte de la potencia instalada de estas instalaciones tienen una superficie mayor que 1.000 m<sup>2</sup>, lo que hace indicar que a medida que se aumenta el tamaño de la instalación aumenta la rentabilidad. Esto se observa en el análisis paramétrico, viendo como el rendimiento de captación se mantiene y el de la instalación aumenta.
- La mayoría de los sistemas utilizan captadores planos seguidos por captadores de tubos de vacío y captadores de captadores cilindroparabólicos. Esto se comprueba directamente en las instalaciones existentes más destacadas, como el caso de “Codelco Gabriela Mistral” o “Daly Textile”. Estadísticamente, los captadores planos ocupan un 88% de la potencia instalada.
- De los resultados del caso base, se comprueba como al aumentar la radiación aumenta el rendimiento de captación, de ahí que la localización de estos sistemas es vital para su viabilidad, de ahí que los proyectos existentes estén en lugares con altos niveles de radiación como por ejemplo “Codelco Gabriela Mistral”, en Chile.
- El caso base se generan 892 MWh de calor útil con lo que se obtiene un rendimiento de captación de 53,64% y un rendimiento de la instalación de 6,35%. Estos datos son mayores en los meses de verano que en los de inviernos por lo comentado en el punto anterior. Mientras en diciembre se obtiene un rendimiento de captación de 44,39% y un rendimiento de la instalación de 2,18%, en Julio se obtiene respectivamente 57,09% y 11,51%.
- En todos los casos, el rendimiento de la instalación es relativamente bajo debido a la alta demanda de vapor simulada, con un ratio de  $(7.58 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s vapor}) / (\text{m}^2 \text{ de captación})$ , de ahí que se obtiene un 6,35% de cobertura de la demanda anual.
- La evolución de las temperaturas de salida del captador e intercambiador en el caso base para los días soleados siguen la tendencia de la radiación recibida obteniéndose la parábola típica solar, llegando a salto máximo 13,1 °C en la salida del captador y 11,6 en la salida del intercambiador. La tendencia en el día nublado es diferente, pero según marque la radiación, obteniéndose un salto máximo de 0,3 °C.
- El rendimiento solar no depende de la superficie de captación (número total de captadores), siempre que se mantenga constante las agrupaciones en serie, ya que este parámetro no interviene en la fórmula del rendimiento. Para el doble de superficie se obtiene el doble de calor útil.

- Si influye es el número de captadores en serie, ya que esto modifica el salto de temperatura que si influye en la fórmula del rendimiento del captador, de forma que para 1 captador en serie se obtiene 899 MWh y para 10 se obtiene 870, 29 MWh de diferencia
- En el caso del caudal de aceite, tiene una influencia idéntica tanto en el rendimiento solar como en la cobertura solar, ambas aumentan de manera logarítmica. Para un caudal tres veces el del caso base, se obtiene 7 MWh más de potencia útil, en cambio para un quinto de caudal de caso base se obtiene 60 MWh menos. Además, comprobamos que al ser un caudal grande, la corrección de caudal es poco importante, ya que el CM va desde 0,99971556 a 1,00007113.
- La transferencia de calor del aceite térmico al vapor del proceso se produce prácticamente por completo en el cambio de fase agua-vapor, un 99%. La efectividad del generador de calor tiene una influencia casi nula, ya que la diferencia de los dos indicadores estudiado para una efectividad de 0.5 y otra de 1 es de 0.57% en el rendimiento de captación y un 0.06 en el rendimiento de la instalación.
- El umbral que ha de superar el aceite térmico para que se abra la válvula de tres vías es un parámetro importante, ya que influye directamente en las secuencias y comportamiento del sistema, teniendo un máximo que el caso base objeto de estudio está en torno a una temperatura de 146 °C, obteniéndose rendimiento de captación de 53,64% y un rendimiento de la instalación de 6,35%. Esto se debe a que en el caso de que la consigna sea muy pequeña el salto de temperaturas en el intercambiador es bajo, en cambio si la consigna es alta, necesita más calor para llegar a esa temperatura, existiendo intervalos sin intercambios. También se comprueba que siempre que la temperatura de consigna no supere la temperatura del vapor de proceso, esta no influye en los resultados.
- Se trata de una instalación sin almacenamiento, por lo que se genere se debe de consumir, en caso de que la instalación supera el caudal demandado en algún momento el calor se perdería. Por este motivo, en este caso, la energía útil del intercambiador no es igual a la energía solar captada.

## 6. Bibliografía

1. Guerra Macho, J. Apuntes Energía solar para procesos industriales. ETSI. Universidad de Sevilla. 2018
  - a. Introducción a los sistemas de energía solar.
  - b. Captador solar. Fundamentos
  - c. Captador solar. Análisis Térmico
  - d. Captador solar. Caracterización
  - e. Industria. Energía solar térmica
2. Molina Félix, J.L. Apuntes Método generales de diseño de intercambiadores. ETSI. Universidad de Sevilla. 2015
3. IDEA. Evaluación del potencial de la energía solar térmica en el sector industrial. Estudio técnico. PER 2011-2020. 2011.
4. IEA-ETSAP y IRENA. Solar Heat for Industrial Processes. Technology Brief. 2015.
5. <http://ship-plants.info/>
6. NREL. Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar. 2003.
7. Amo Calvo, M.A.. Proyecto fin de carrera Ingeniería Industrial aplicaciones de la energía Solar Térmica a procesos de calentamiento en la Industria. ETSI. Universidad de Sevilla. 2014.