

Trabajo fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis de instalaciones solares para procesos
térmicos industriales

Autor: Cristina Vernalte Martínez

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

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

Sevilla, 2018



Trabajo fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Análisis de instalaciones solares para procesos térmicos industriales

Autor:

Cristina Vernalte Martínez

Tutor:

Francisco Javier Pino Lucena

Dpto. de Ingeniería Energética
Grupo Termotecnia
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo fin de Grado: Análisis de instalaciones solares para procesos térmicos industriales

Autor: Cristina Vernalte Martínez

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

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

*A mi familia entera.
Especialmente a papá, mamá y
mis pequeños David, Paco y
Pepe.*

*A mis amigos de dentro y de
fuera de la Escuela.*

A mis profesores y a mi tutor.

La industria global requiere casi la mitad de la energía consumida en todo el mundo para lograr el funcionamiento de instalaciones de esta índole. Esto es debido no sólo a la gran variedad de industrias existentes, si no también a la enorme cantidad de energía requerida por cualquier planta de tipo industrial.

Hasta hace apenas un par de décadas, estas instalaciones habían obtenido su energía de combustibles fósiles como pueden ser el petróleo, el gas natural o el carbón. Pero en los últimos años las energías renovables han sufrido un enorme desarrollo debido a la inquietud que ha causado el posible agotamiento de estos recursos y a la inestabilidad económica del costo de ellos. Todo esto unido a las políticas públicas lanzadas por numerosos organismos han hecho que se suscite interés en la sociedad por este tipo de energías y que cada vez sean más los usuarios que quieren integrar plantas de este tipo a sus instalaciones del sector industrial, fomentando así la implantación de energías renovables.

Concretamente, el desarrollo de la energía solar térmica en el sector industrial será el objeto de estudio de ese Trabajo de Fin de Grado. Se analizará el funcionamiento de las plantas solares, así como los factores que deben estudiarse para lograr una integración exitosa. Para ello se estudiarán numerosas plantas en las que se han acoplado instalaciones solares con el objetivo de disminuir la dependencia de combustibles fósiles, cuyo uso se va queriendo evitar con el paso de los años debido a factores económicos, sociales y medioambientales.

Resumen	ix
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xv
1 Introducción	1
1.1. Situación energética actual	1
1.2. Tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar	2
1.2.1. Energía solar fotovoltaica	3
1.2.2. Energía solar térmica	4
1.3. Análisis termoeconómico	7
1.4. Sectores industriales con uso de energía solar térmica	8
1.4.1. Usos concretos de la energía solar térmica en la industria	10
2 Energía Solar Térmica	12
2.1. Instalaciones de Energía Solar Térmica en la Industria	12
2.1.1. Análisis previo	12
2.1.2. Clasificación de instalaciones solares industriales	13
2.2. Tecnología y Elementos de una Instalación Solar Térmica	14
2.2.1. Captadores solares	14
2.2.2. Sistema de distribución de una instalación solar térmica	29
2.2.3. Almacenamiento	32
2.2.4. Sistema de apoyo convencional	33
3 Instalaciones Industriales con Energía Solar Térmica	34
3.1. Miraah Omán	34
3.2. Pampa Elvira Solar (División Gabriela Mistral)	36
3.3. Princess Nora Bint Abdul Rahman University in Riyadh	38
3.4. Prestage Foods	40
3.5. La Parreña de Peñoles (Copper Mine)	41
3.6. Estadio piloto para la copa del mundo (FIFA)	42
3.7. Honeywell technology solutions	44
3.8. Captador Fresnel de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla	45
3.9. L’Oreal Pune	47
4. Análisis de Parámetros de Instalaciones Solares Industriales	49
4.1. Parámetro 1: Potencia / Superficie	49
4.2. Parámetro 2: Superficie / Volumen acumulación	51
4.3. Parámetro 3: Producción anual / Potencia	53
5. Conclusiones	55
Referencias	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Primeras instalaciones solares de la década de los 80	6
Tabla 2. Distribución de la demanda de calor por niveles de temperatura	9
Tabla 3. Rangos de temperaturas de industrias	10
Tabla 4. Sistemas de distribución de una instalación solar térmica	29
Tabla 5. Datos de la instalación Miraah Omán	36
Tabla 6. Datos de la instalación Pampa Elvira Solar	38
Tabla 7. Datos de la instalación PNUW	39
Tabla 8. Datos de la instalación Prestage Foods	41
Tabla 9. Datos de la instalación La Parreña	42
Tabla 10. Datos de la instalación FIFA Stadium	44
Tabla 11. Datos de la instalación Honeywell	45
Tabla 12. Datos de la fresnel ESI Sevilla	46
Tabla 13. Datos de la instalación L'Oreal Pune	48
Tabla 14. Parámetro potencia-superficie	49
Tabla 15. Parámetro Volumen de acumulación-Superficie	52
Tabla 16. Parámetro Producción Anual-Potencia	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de energía primaria a nivel mundial en 2016 (BP 2017) [1]	2
Figura 2. Mapa de ruta: potencial de uso de energía solar térmica en procesos industriales (BID 2013) [3]	2
Figura 3. Esquema de una instalación fotovoltaica (Cenitsolar)	3
Figura 4. Reflectores de la planta solar de alta temperatura en Maadi (EcoInventos)	5
Figura 5. Publicación del invento de Isidoro Cabanyes en la revista “La Energía Eléctrica” en 1903 (El Confidencial)	6
Figura 6. Resultados del estudio de POSHIP	9
Figura 7. Posición de la demanda de calor en el sector industrial en función del nivel térmico	10
Figura 8. Diseño de un sistema solar térmico destinado al suministro de vapor en un proceso (Fraunhofer 2016)	12
Figura 9. Captadores conectados en paralelo (Ingemecánica)	15
Figura 10. Captadores conectados en serie (Ingemecánica)	16
Figura 11. Captadores conectados en serie-paralelo (Ingemecánica)	16
Figura 12. Configuración en placa, parrilla y serpentín (Termicol)	17
Figura 13. Desglose de un captador solar plano (Termicol)	18
Figura 14. Pérdidas producidas en un captador plano (IEA 2008)	19
Figura 15. Recta de rendimiento de un captador plano (Apuntes Energía Solar)	19
Figura 16. Captador de vacío con fluido directo (Sitio Solar)	20
Figura 17. Captador de vacío (Sitio Solar)	21
Figura 18. Funcionamiento de captador de vacío heat pipe (Sitio Solar)	21
Figura 19. Captador cilindro parabólico en su recorrido del sol (Renovetec)	22
Figura 20. Esquema de disposición de tubo absorbedor	23
Figura 21. Pérdidas ópticas de un captador cilindro parabólico (Apuntes Energía Solar)	24
Figura 22. Pérdidas por sombras en captadores cilindro-parabólicos (Apuntes Energía Solar)	25
Figura 23. Pérdidas globales (Apuntes Energía Solar)	26
Figura 24. Esquema de una instalación tipo Fresnel (Millennium Energies)	27
Figura 25. Radiación recibida por captadores tipo Fresnel (Concentracion Solar)	28
Figura 26. Esquema de instalación tipo abierta (IDAE 2006) [15]	30
Figura 27. Esquema de una instalación cerrada (IDAE 2006) [15]	31
Figura 28. Instalación con circulación natural (Click Renovables)	31
Figura 29. Instalación con circulación forzada	32
Figura 30. Extracción de petróleo por EOR (SNF)	34
Figura 31. Montaje de la planta de Miraah Omán (Glasspoint)	35
Figura 32. Producción de vapor en Miraah Omán (Glasspoint)	35

Figura 33. Vista aérea de la planta Pampa Elvira Solar (Codelco)	37
Figura 34. Proceso de electroobtención del cobre en la instalación (Codelco)	38
Figura 35. Vista del campo de captadores de la Universidad de mujeres de Riyadh (Solar Thermal World)	39
Figura 36. Vista aérea de la planta de Prestage Foods (Prestage Farms)	40
Figura 37. Colectores de la planta de Prestage Foods (Prestage Farms)	41
Figura 38. Captadores de la planta solar de La Parreña (Arcon-Sunmark)	42
Figura 39. Vista aérea de la planta de La Parreña (Arcon-Sunmark)	42
Figura 40. Planta piloto para la copa del mundo de fútbol 2022 (Solar Thermal World)	43
Figura 41. Vista aérea de la planta piloto de la FIFA (Solar Thermal World)	43
Figura 42. Diagrama del enfriamiento térmico (Honeywell)	44
Figura 43. Vista aérea de la planta solar de Honeywell (Honeywell)	45
Figura 44. Captador Fresnel de la ESI Sevilla (Bibing)	46
Figura 45. Captadores de la planta de L'Oreal en Pune (L'Oreal)	47
Figura 46. Esquema de la instalación de la planta de L'Oreal en Pune (L'Oreal)	47
Figura 47. Representación del parámetro Potencia-Superficie para sistemas con concentración	50
Figura 48. Representación del parámetro Potencia-Superficie para sistemas sin concentración	51
Figura 49. Representación del parámetro Volumen de acumulación-Superficie	52
Figura 50. Representación del parámetro Producción Anual-Potencia	54

1 INTRODUCCIÓN

El consiguiente Trabajo de fin de Grado está basado en el análisis de la implantación de energía solar en distintos sectores de la industria. Este estudio demostrará como una serie de empresas pioneras están abasteciendo gran parte de la energía necesaria para su funcionamiento industrial con energías renovables, concretamente con energía solar de baja y media temperatura. El análisis de dichas instalaciones permitirá obtener una serie de parámetros que nos otorgará la capacidad de analizar el funcionamiento de las mismas y sacar conclusiones con respecto al funcionamiento y efectividad de la planta en cada una de las empresas.

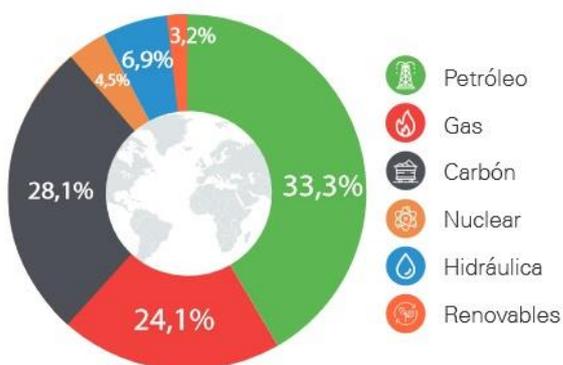
1.1. Situación energética actual

El consumo energético mundial no ha hecho más que aumentar en los últimos años y se prevee que lo siga haciendo en un 27% desde ahora hasta el año 2030. Esto es debido a que cada vez la población mundial es más dependiente de una serie de recursos que llevan implícitos el uso de energía.

A pesar de que las energías renovables han ido aumentando progresivamente, no han podido contrarrestar este notable incremento de necesidades energéticas que se ha producido, por lo que la producción de energía a partir de la combustión de combustibles fósiles ha seguido incrementando, aunque no tan rápidamente como lo han hecho las energías renovables, posiblemente por el recalable e inestable aumento de precios de combustibles como el gas natural o el petróleo, los cuáles seguirán sufriendo un incremento de costes del 2.5% anual hasta el año 2030. Aun así, aproximadamente el 80% del consumo de energía primaria en la industria se sigue abasteciendo actualmente con petróleo y gas natural. [1]

Según el informe de BP del año 2017, en el que compara el consumo de energía primaria a nivel mundial entre los años 2016 y 2015, la única fuente de energía catalogada como primaria que ha disminuido ha sido el carbón. Esto ha sido debido, posiblemente, a que el carbón ha sido elegido como el combustible fósil más “prescindible” actualmente y al compromiso que surgió a raíz de una serie de iniciativas en los últimos años. La más reciente fue la británico-canadiense que se acordó en noviembre de 2017, que comprometía a una serie de potencias mundiales que aseguraron dejar de depender del carbón como medio de obtención de energía para el año 2030. El fuerte aumento de las energías renovables unido al débil aumento del uso de los combustibles fósiles ha logrado que en 2016 sólo incrementaran las emisiones de gases de efecto invernadero en un 0.1%.

Consumo de energía primaria 2016



El consumo de energía mundial creció un **1%**

Consumo en el mundo 2016 vs 2015



Figura 1. Consumo de energía primaria a nivel mundial en 2016 (BP 2017) [1]

Aún así, la cifra de uso de energías renovables a nivel mundial sigue siendo muy baja. En el año 2016, únicamente el 10 % de la energía consumida había sido obtenida con energía renovable y únicamente un 1% con plantas solares. Este porcentaje se repartía entre las 160 instalaciones solares térmicas instaladas en el planeta y en 140600 m² de superficie que producían 100 MWth. [2]

Por supuesto se espera que esta situación vaya mejorando en los próximos años y que se sigan desarrollando proyectos de esta índole, especialmente en el sector industrial. Se prevee que para el año 2050 un 20 % de la demanda industrial total de calor a baja temperatura sea cubierta con la energía solar térmica y un 4% de la demanda industrial total. [3]

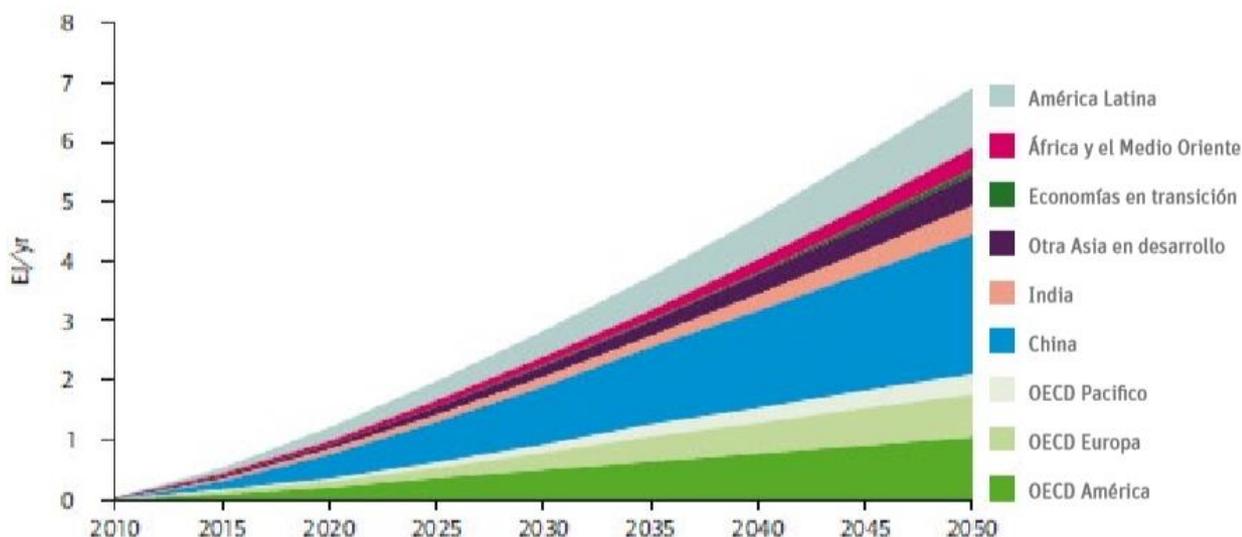


Figura 2. Mapa de ruta: potencial de uso de energía solar térmica en procesos industriales (BID 2013) [3]

1.2. Tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar

En los procesos industriales, la energía solar puede ser aprovechada de maneras muy diferentes. La radiación solar se aprovecha de una forma u otra en función del tipo de energía en la que queramos

transformarla, y en función de esto utilizaremos un tipo de tecnología u otra. Como elemento común siempre se dispone de un captador o colector solar, el cual se encargará de absorber la radiación procedente del Sol y tendrá una determinada función dependiendo de la futura transformación de energía.

Por este motivo, existen en la energía solar dos grupos bien diferenciados: la energía solar térmica, la cual se analizará en este informe, y la energía solar fotovoltaica, de la cuál se realizará una breve descripción aunque sea ajena a este Trabajo.

1.2.1. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica transforma de manera directa la luz solar en electricidad. Esto se lleva a cabo mediante el aprovechamiento de las propiedades de determinados materiales semiconductores mediante células fotovoltaicas.

Los paneles fotovoltaicos suelen estar hechos de silicio. Funcionan de manera que cuando los fotones de la luz solar inciden en una de las caras de la célula solar, provocan la generación de una corriente eléctrica. Esta electricidad es la que se aprovecha como fuente de energía.

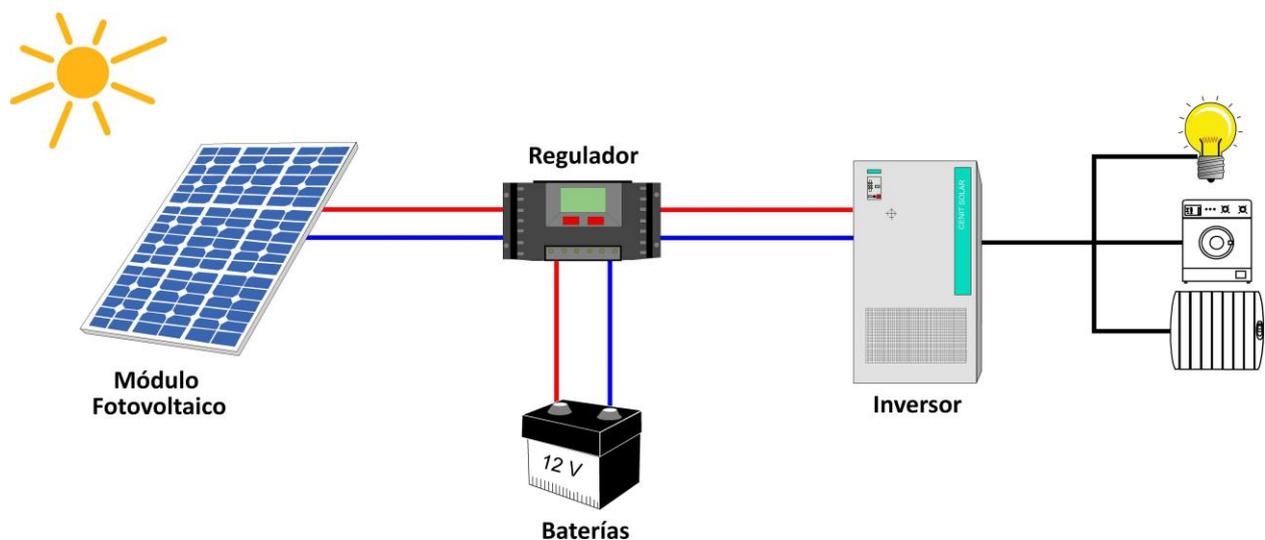


Figura 3. Esquema de una instalación fotovoltaica (Cenitsolar)

La instalación fotovoltaica consta además de un regulador que protege la batería frente a sobrecargas y descargas de una magnitud considerable. Controlan también el estado de las baterías regulando su intensidad y logrando alargar su vida útil. El objetivo de estas baterías es almacenar electricidad cuando el sol incide sobre los paneles, permitiendo así el uso de energía eléctrica en cualquier momento, independientemente de si es de noche o de día. Estas baterías mantienen un nivel de tensión estable

Por último cualquier instalación fotovoltaica dispone de un inversor, el cual transforma la corriente continua obtenida en corriente alterna, ya que las baterías solo pueden alimentar directamente consumos en corriente continua.

Se distinguen dos grupos de instalaciones fotovoltaicas:

- Instalaciones fotovoltaicas aisladas: son aquellas que están aisladas de la red eléctrica. Se utilizan únicamente para autoconsumo (vivienda aislada, red de riego concreta etc.).

- Instalaciones fotovoltaicas de conexión: la energía producida se usa para autoconsumo y la restante se incorpora a la red eléctrica. La mayoría de instalaciones fotovoltaicas son de este tipo. [4]

1.2.2. Energía solar térmica

La energía solar térmica es aquella que aprovecha la energía procedente del sol para producir calor transfiriéndola a un medio caloportador, normalmente agua o aire. Por tanto, esta tecnología está basada fundamentalmente en la capacidad de transformar los rayos de sol en energía térmica o calor.

La posibilidad de poder obtener calor mediante la energía lumínica del sol es algo tan sencillo como, por ejemplo, poder quemar papel concentrando la energía solar con una lupa. En este proceso se concentran los rayos en una superficie determinada (foco) y esto hace que se produzca un brusco incremento de temperatura que hace que el papel arda. En esto se basa fundamentalmente el funcionamiento de las plantas solares térmicas, no siendo necesaria siempre la concentración de los rayos del Sol y siendo este únicamente uno de los tres métodos usado en este tipo de instalaciones (energía térmica de concentración o de alta temperatura). [5]

La versatilidad de este tipo de energía la ha convertido en una de las energías renovables pioneras actualmente, pudiendo ser usadas para obtención de agua caliente, para sistemas de calefacción y frío solar, para máquinas de refrigeración por absorción o para la generación de energía eléctrica. Esto último se lleva a cabo haciendo que la radiación solar evapore el agua y a partir de este vapor se obtiene la electricidad.

El uso de la energía solar térmica reduce el consumo directo de fuentes de energía primaria, proporcionando además un precio estable ya que la mayoría de los costes de la instalación se incluyen en la inversión inicial.

El análisis que se lleva a cabo en este trabajo se centra en las instalaciones solares térmicas implantadas con uso industrial para la obtención de energía térmica. Los fines de la energía térmica obtenida son muy variados y abarcan funciones muy distintas. La versatilidad de este tipo de energía radica en la existencia de numerosas tecnologías de captadores solares que permiten abastecer demandas de energía térmica en procesos con diferentes niveles de temperatura y en diferentes situaciones. Aun así seguiría habiendo determinados sectores industriales que se verían limitados por falta de desarrollo tecnológico, ya que podrían requerir temperaturas más altas y materiales menos asequibles y tendrían que decidirse por otro tipo de tecnología.

1.2.2.1. Reseña histórica de la energía solar térmica

Desde tiempos inmemoriales el hombre ha usado la energía del sol para encender fuegos mediante la concentración de la radiación solar. Ya en el siglo VII a.C. se tiene indicios de que las sacerdotisas romanas encendían fuegos en los templos mediante la concentración de luz solar con espejos. En el siglo 212 a.C. Arquímedes desarrolló una máquina que concentraba los rayos de sol y en 1515 Leonardo Davinci inventó un concentrador de calor de seis kilómetros de diámetro. En 1717 Horacle de Saussure quiso comprobar qué temperatura se podía alcanzar en una caja de cristal con radiación solar y llegó a los 109 °C. Sin saberlo consiguió crear el llamado colector solar actualmente. Numeros inventos de esta índole se fueron sucediendo y en el siglo XX existían máquinas muy

sencillas que podían funcionar concentrando el calor procedente de los rayos del Sol, muchas de ellas destinadas a uso militar. [5]

El primer ejemplo se obtiene por parte del ingeniero Frank Shuman, inventor neoyorquino y pionero en energía solar. En 1911, el ingeniero e inventor Frank Shuman fundó la empresa Sun Power Co, y en ese mismo año fue encargada de construir una planta solar de concentración (actualmente conocida como planta solar de alta temperatura) en Tacony (EEUU) y llegó a tener una potencia de 20 KW. Sólo dos años más tarde, el gobierno egipcio quiso ser pionero en este tipo de tecnología y le encargó a Sun Power Co la instalación de la primera planta de canal parabólico en Maadi (Egipto) a orillas del río Nilo, con el fin de mover el motor de una bomba situada en dicho río. La central funcionaba con cinco reflectores de 62 metros de largo hechos de espejos de vidrio que concentraban la radiación solar en tubos de la misma longitud por los que circulaba agua para así obtener vapor. Tenía una potencia de 88 KW y fue capaz de bombear 27000 litros por segundo. Tras el éxito de dicha implantación, le fue asignado un proyecto de esta misma tecnología en el desierto de Sahara. Se pretendía que tuviera una expansión de 52000 km² y que tuviera una potencia de 198 MW. Sin duda era un reto que podría haber marcado un antes y un después en este sector, pero lamentablemente la segunda guerra mundial hizo que la primera planta de Shuman quedara destruida y que este segundo proyecto nunca llegara a ver la luz. Sin embargo, los inventos sus dieron un paso para la humanidad en lo que a energías renovables se refiere, y más concretamente a la energía solar.

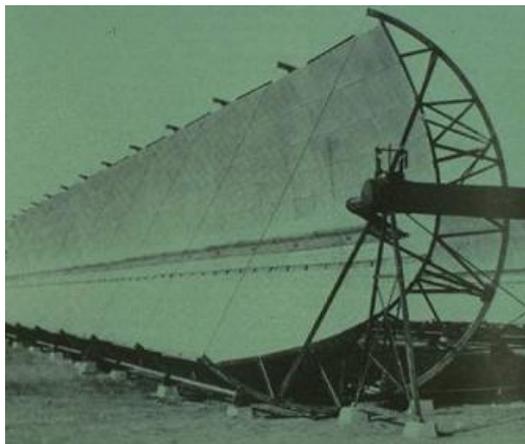


Figura 4. Reflectores de la planta solar de alta temperatura en Maadi (EcoInventos)

Cabe destacar, que en el año 1903, el español Isidoro Cabanyes desarrolló el primer diseño de chimenea solar, con un colector solar destinado a calentar el aire en zonas próximas a la torre mediante la canalización del aire caliente por la chimenea, generando una corriente ascendente. Añadía un generador eólico destinado a producir energía mecánica a partir del impulso de la corriente generada. Aunque su invento fue publicado, este tipo de instalaciones no se desarrolló, principalmente por motivos económicos, hasta los años 80.

La Energía Eléctrica

REVISTA GENERAL DE ELECTRICIDAD Y SUS APLICACIONES

PUBLICACIÓN QUINCENAL ILUSTRADA

SUMARIO

Proyecto de motor solar (continuación), por Isidoro Cabanyes.—Algo de electricidad pasiva.—Inventos últimos del mundo de Wilson & Deering y Arcton (continuación), por A. C.—¿Qué es el potencial? (continuación), por Ramón de Ugarte.—Emisión transportada por magnetita en conductores, teoría del profesor Steen y Siemens y Hübner, y su aplicación en el efecto alfa (continuación), por C. Fierro.—Teoría y experimentos sobre el papel que en la propagación de las ondas eléctricas desempeña, en la Telegrafía sin cables, el gas de escape de la línea, la tierra y la atmósfera (continuación), por Carlos García.—Océano eléctrico: Radio-actividad del agua.—La resistencia eléctrica de los gases.—Reflexión.—Efecto y desarrollo.—Correspondencia particular.

PROYECTO DE MOTOR SOLAR

CONSTRUYAN una gran caja de cristal hermeticamente cerrada; bajo la caja transparente, otra de hierro pintada de negro, y dentro de esta última caja, aire ó agua, ó cualquier medio que, una vez elevado á alta temperatura pueda á cualquiera de las máquinas ya conocidas de aire caliente ó de vapor de agua y en ella funcionar y todo ello rodeado



Figura 5. Publicación del invento de Isidoro Cabanyes en la revista “La Energía Eléctrica” en 1903 (El Confidencial)

En la década de los 70, con motivo de la crisis de los años 73 y 79 este tipo de energía empezó a resurgir de nuevo suscitando interés en muchos países debido a la brutal subida de precios de los combustibles fósiles. Se comenzaron a desarrollar una serie de instalaciones que finalmente vieron la luz en la década de los 80.

PROYECTO	PAÍS	POTENCIA (MW)	AÑO DE PUESTA EN MARCHA
SSPS	ESPAÑA	0.5	1981
EURELIOS	ITALIA	1	1981
SUNSHINE	JAPÓN	1	1981
CESA - 1	ESPAÑA	1	1982
MSEE / Cat B	EEUU	1	1983
THEMIS	FRANCIA	2.5	1984
SPP - 5	RUSIA	5	1986
SOLAR ONE	EEUU	10	1982

Tabla 1. Primeras instalaciones solares de la década de los 80

Sin embargo, a mitad de los años 80 se estabilizó de nuevo el precio de los combustibles, lo que provocó que el interés por este tipo de tecnología mermara y que muchos proyectos quedaran en el olvido.

Años después, en la década de los 90 empiezan a tomar fuerza las preocupaciones medioambientales y numerosos gobiernos empiezan a proponer sus primeras ofertas para implantar proyectos de este

tipo ofreciendo subvenciones y ayudas. Esto impulsó notablemente las plantas de energía solar térmica tal y como hoy las conocemos.

Todos estos inventos a lo largo de la historia han hecho posible el actual desarrollo de lo que hoy conocemos como energía solar térmica. [6]

1.3. Análisis termoeconómico

El consumo de energía a nivel industrial comprende el 40% de la energía total consumida según la OCDE, estando destinado otro 40% a transporte. Además, este sector es uno de los que presenta mayores necesidades de seguir aumentando sus recursos energéticos. Con la instalación de este tipo de plantas, no sólo se logra una reducción de costes asociados a combustibles, si no también disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero, la cantidad de residuos que van a vertederos o el uso de agua reciclada mediante un tratamiento previo de esta, contribuyendo en el aumento de producción de energía sostenible.

Es cierto que el desembolso inicial para implantar una instalación de este tipo es grande, pero un buen estudio termoeconómico previo, analizando su coste y rentabilidad, y un uso adecuado de las tecnologías actuales hace que el periodo de retorno de cualquier instalación sea de muy pocos años en comparación con la vida útil de una planta de este calibre. El estudio termoeconómico previo destinada a comprobar la viabilidad de la instalación solar abarca los siguientes aspectos:

- **Ubicación:** la situación es posiblemente el primer aspecto que se debe considerar al plantearse la instalación de una planta de esta índole. Se deberá analizar el lugar en el que se quiere situar la planta así como las horas de sol existentes a lo largo del año para ver si se adecúa a las necesidades del usuario.

Se debe lograr maximizar la generación de energía con un análisis completo de las horas, los días y los meses con más horas de sol y tener en cuenta aquellas épocas del año en los que la radiación solar no es tan abundante.

La posibilidad de colocar unidades de suministro de calor convencional a la instalación solar debe considerarse, ya que es posible que en algún momento pueda necesitarse como apoyo a la energía solar en momentos de radiación baja o de falta de almacenamiento.

- **Tamaño de la planta:** el tamaño de la instalación dependerá de las necesidades que esta quiere cubrir, y en función de esto se preveerá una potencia mayor o menor. La disponibilidad de espacio para instalar los captadores solares es, obviamente, fundamental. Uno de los principales retos es integrar este tipo de instalaciones a edificios industriales ya existentes.

Además se debe tener en cuenta la necesidad de espacio disponible para colocar grandes volúmenes de fluido (tanques de almacenamiento) a modo de reserva para intentar evitar el aporte de energía convencional adicional.

- **Nivel térmico:** la versatilidad de la energía solar hace que se pueda utilizar para obtener energía térmica en procesos muy diferentes. Cada proceso requerirá una temperatura de trabajo concreta en función del fin. La industria minera, por ejemplo, es la que precisa un nivel térmico mayor pudiendo llegar a requerir hasta 400 °C. Sin embargo un simple proceso

de lavado necesita apenas 60°C. El desarrollo de la energía solar térmica está optimizado, actualmente, hasta una temperatura de 250°C, es decir, baja y media temperatura. Esto no significa que no se pueda trabajar a niveles mayores de temperatura pero es cierto que la rentabilidad no será tan relevante.

- **Energía térmica generada:** el cálculo del ahorro que se obtendrá una vez instaurada la instalación es imprescindible, ya que si la demanda que es capaz de cubrir la planta no es considerable, la implantación de esta no sería viable económicamente.
- **Políticas públicas:** actualmente la implantación de instalaciones solares térmicas está a la orden del día, y son pocos los países en los que esta tecnología no ha suscitado interés. Por este motivo hay numerosas subvenciones y ayudas por parte de los distintos organismos que apoyan la implementación de esta tecnología en el sector industrial. De hecho, algunas de las instalaciones que se analizarán posteriormente no habrían podido llegar a ser implementadas sin la ayuda de determinadas contribuciones públicas.

Destacar además, que el mantenimiento de una planta de este calibre es prácticamente inexistente. Si la instalación solar está bien diseñada y correctamente instalada no tiene por qué presentar problemas. De hecho, el grado de satisfacción entre los usuarios es muy alto.

El alcance del mantenimiento se asemeja al que puede necesitar cualquier instalación de climatización o calefacción y un breve seguimiento rutinario debe ser suficiente para garantizar una actividad correcta a lo largo de la vida útil de la instalación.

En los últimos años han sido muchas las empresas que han llevado a cabo estos estudios para lograr ser pioneras en la instalación de plantas de energía solar térmica en centrales industriales, desarrollándose gran variedad de proyectos con diferentes propósitos. Aun así fue a partir de la década de los 70 cuando este tipo de instalaciones comenzaron a verse viables económicamente. Se realizaron numerosos estudios y análisis, pero las limitaciones de la tecnología del momento, como se ha citado anteriormente, el alto precio de los materiales necesarios y el bajo coste de los combustibles fósiles por ese entonces han hecho que este tipo de instalaciones no prosperara realmente hasta entrado el actual siglo. No obstante el desarrollo de este campo está siendo muy lento, y es que aún se siguen encontrando muchas trabas, ya que las nuevas tecnologías siempre conceden el beneficio de la duda al cliente y normalmente se prefiere asegurar con métodos de obtención de energía convencionales y que otros sean los que se aventuren.

Se espera que este tipo de instalación termine de despegar para seguir consiguiendo mejoras en este sector de la tecnología solar, logrando que el desconocimiento cultural en cuanto a esta sea menor y no se tenga tanto recelo a la hora de instaurar este tipo de instalaciones en la industria. Lograr el convencimiento del cliente con números de por medio es el objetivo de este análisis termoeconómico, demostrando la rentabilidad y viabilidad de la inversión de manera obvia y objetiva. [7]

1.4. Sectores industriales con uso de energía solar térmica

Los sistemas térmicos industriales de baja y media temperatura pueden llegar a cubrir gran parte de la demanda del sector, convirtiendo así a la energía solar térmica en una aplicación prometedora y adecuada para este sector. La demanda térmica industrial conforma el 33% de la demanda de energía

total en el sur de Europa.

Como se ha citado anteriormente, la energía solar térmica tiene un uso muy versátil en las instalaciones industriales, por lo que el resultado del análisis termoeconómico dependerá, en gran medida, de la temperatura necesaria de trabajo y de la finalidad de la energía térmica.

En el año 2011, IDAE [8] evaluó el potencial de la energía solar térmica en el sector industrial español y los resultados se muestran en la Tabla 2.

FUENTE	DEMANDA DE CALOR POR NIVELES DE TEMPERATURA
Baja temperatura (<60°C)	8 %
Media temperatura (<120°C)	22 %
Media temperatura (<150°C)	23%
Media temperatura (<250°C)	41%

Tabla 2. Distribución de la demanda de calor por niveles de temperatura

Se observa que en España se podrían abastecer el 94% de las industrias con energía térmica procedente del sol con los recursos actuales de esta tecnología, es decir, el 94% de las industrias españolas necesita una temperatura de trabajo menor a 250°C. [9]

Para la obtención de estos datos se hizo uso del análisis que realizó el proyecto POSHIP en el año 2001, en el que evaluó los consumos de energía térmica en la península ibérica (España y Portugal) en diferentes procesos industriales, diferenciando únicamente dos sectores: aquellos que requieren temperaturas de más de 160 °C y los que requieren menos. Los resultados que obtuvieron fueron los siguientes:

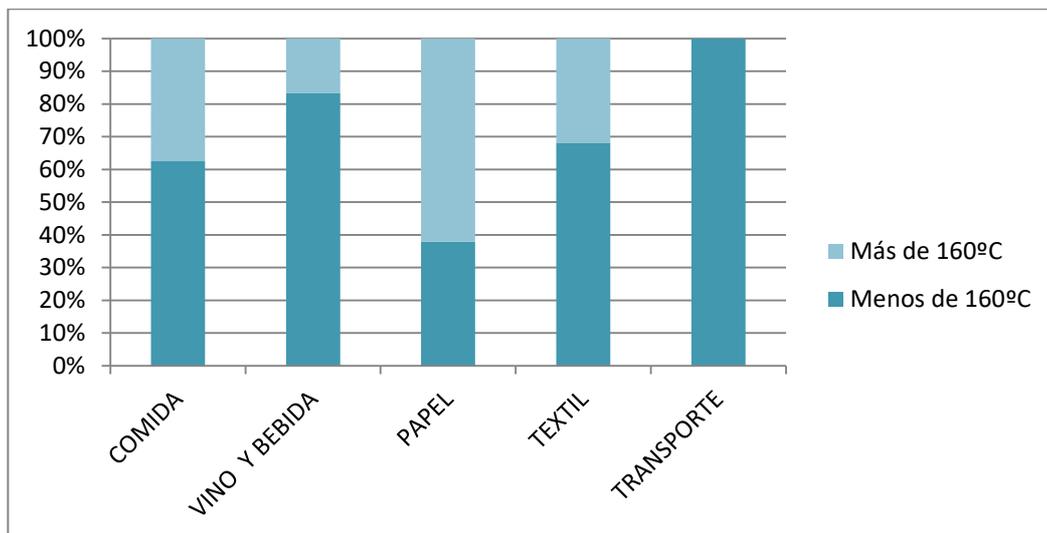


Figura 6. Resultados del estudio de POSHIP

Se observa que todos estos sectores son bastante apropiados para el uso de energía solar térmica de baja y media temperatura, especialmente el sector transporte, cuya energía podría ser totalmente proporcionada por instalaciones solares.

Desgraciadamente, a nivel mundial estos resultados no son tan objetivos, aunque presentan también

un porcentaje considerable, siendo el 59 % industrias las que precisan un nivel térmico bajo y medio. [10]

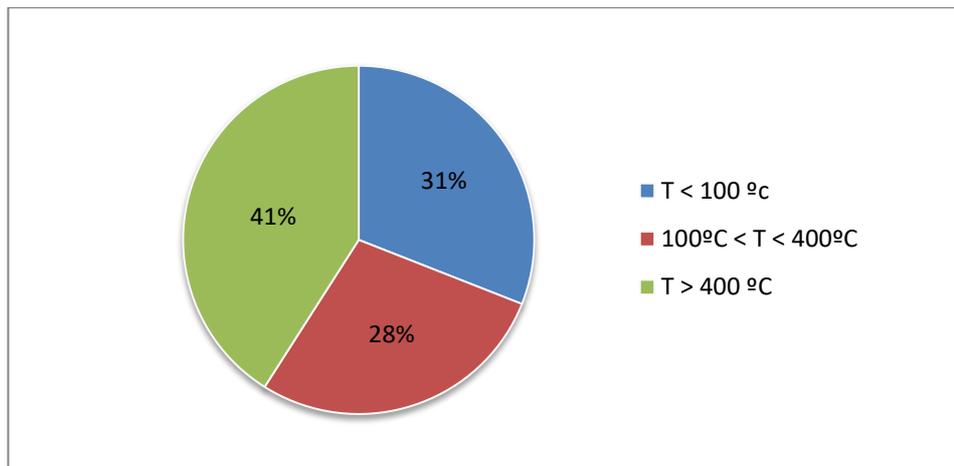


Figura 7. Posición de la demanda de calor en el sector industrial en función del nivel térmico

1.4.1. Usos concretos de la energía solar térmica en la industria

A lo largo del Trabajo se expondrán algunas de las industrias más relevantes a nivel mundial que han incorporado plantas de energía solar térmica a sus instalaciones. Estas industrias destinarán la energía térmica obtenida a diferentes tipos de trabajo y en función de la tarea en la que se vea envuelta, se necesitará una temperatura de trabajo u otra. En la Tabla 3 se asocia a algunas de las industrias y procesos industriales un rango de temperatura medio.

INDUSTRIA	PROCESO INDUSTRIAL	RANGO DE TEMPERATURA
ALIMENTACION	ESTERILIZACIÓN	60 – 120 ° C
	ESTERILIZACIÓN	100 – 120 °c
	SECADO	120 – 180 °C
	LAVADO	60 – 90 °C
TEXTIL	SECADO, DESENGRASADO	100 – 130 °C
	TINTE	100 – 180 °C
PAPEL	BLANQUEO	130 – 150 °C
QUÍMICA	EVAPORACIÓN	90 – 105 °C
	DESTILACIÓN	110 – 300 °C
	CALOR DE PROCESO	120 – 180 °C

	PETRÓLEO	100 – 150 °C
SUBPRODUCTOS MADERA	SEPARACIÓN PULPA	120 – 170 °C
DESALINIZACIÓN	TEMPERATURA FLUIDO CALOPORTADOR	100 – 250 °C
MINERA	SECADO	100 – 400 °C
	FUNDICIÓN DEL CONCENTRADO	
	CALENTAMIENTO SOLUCIONES	
	LAVADO	
PLÁSTICOS	PREPARACIÓN	120 – 140 °C
	DESTILACIÓN	110 – 300 °C
	SEPARACIÓN	200 – 220 °C
	EXTENSIÓN	140 – 160 °C
	SECADO	180 – 200 °C
	MEZCLADO	120 – 140 °C
TRATAMIENTO TÉRMICO	REVENIDO MEDIO	350 – 450 °C
REFRIGERACIÓN	MÁQUINA ABSORCIÓN DOBLE EFECTO	120 – 190 °C

Tabla 3. Rango de temperaturas de industrias [11]

Los procesos mineros son posiblemente aquellos que requieren un nivel de temperatura mayor, pudiendo oscilar las necesidades entre 100°C y 400°C. Las ventajas de desarrollar la energía solar en procesos de este tipo son tanto medioambientales como económicas, ya que proporciona una mayor estabilidad de precios al no depender constantemente de la variación de costes de los combustibles fósiles.

Esta energía se puede aplicar en numerosos procesos: en minas de extracción de cobre aportando el calor necesario para el proceso de electroobtención, en yacimientos de extracción de petróleo mediante el método EOR, es decir, mediante el calentamiento de alguna solución, en procesos de fundición de algún concentrado o en procesos de lavado en plantas que realizan algún tratamiento metálico como galvanizado o pintado. Normalmente este lavado precisa de un nivel de temperatura menor, alrededor de los 60°C. [12]

Cabe destacar que el uso de energía solar térmica en procesos mineros ha dado lugar a los campos solares industriales más grandes del sector, como se analizará posteriormente. [13]

2 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

S

Hemos demostrado la utilidad comercial de la energía solar y en particular su resultado eficaz. Nuestras reservas de carbón y petróleo se agotan y la raza humana puede recibir el poder de los rayos ilimitados del Sol

- Frank Shuman, 1916 -

2.1. Instalaciones de Energía Solar Térmica en la Industria

Todas las instalaciones solares térmicas disponen de un sistema de captación seguido de su propio sistema de distribución y normalmente, de un sistema de almacenamiento o acumulación, que abastece el consumo cuando sea necesario. En la mayoría de instalaciones industriales, este sistema de energía solar se acopla una vez construida la planta para proporcionar parte de la demanda calorífica a este.

Este tipo de instalaciones disponen de un sistema de apoyo convencional para evitar fluctuaciones energéticas en periodos en los que la radiación es demasiado baja o en aquellos en los que la demanda sea mayor de la prevista inicialmente. [14]

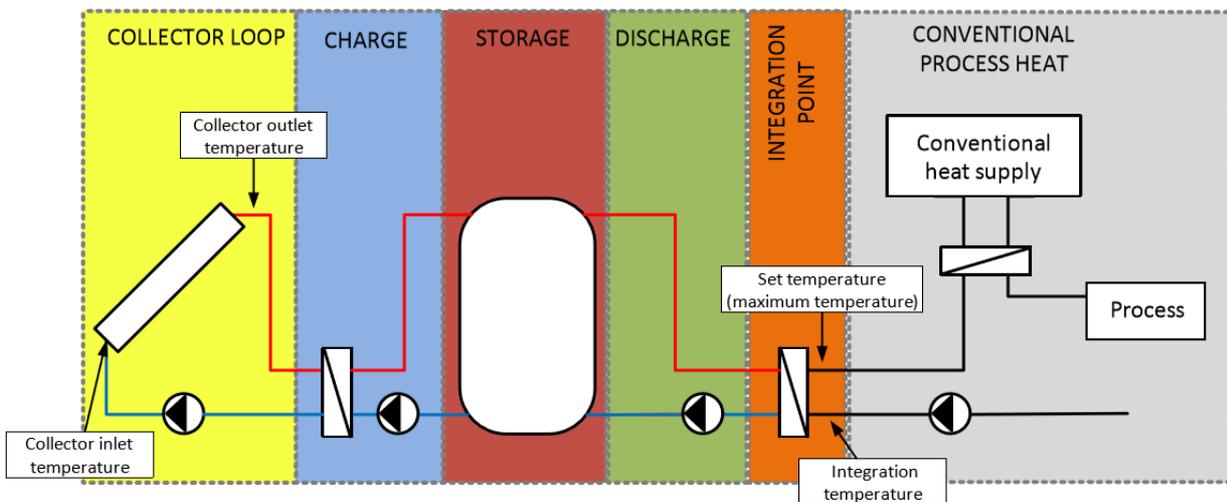


Figura 8. Diseño de un sistema solar térmico destinado al suministro de vapor en un proceso (Fraunhofer 2016)

2.1.1. Análisis previo

El análisis previo tiene como objetivo lograr un buen acoplamiento del sistema de energía solar a la instalación industrial. Unido al análisis termoeconómico forman las dos etapas preliminares a estudio más importantes del proceso.

Por tanto, se debe realizar en primer lugar una estimación de la capacidad térmica del sistema y estudiar qué porcentaje de la demanda energética cubrirá esta instalación. Esta primera estimación

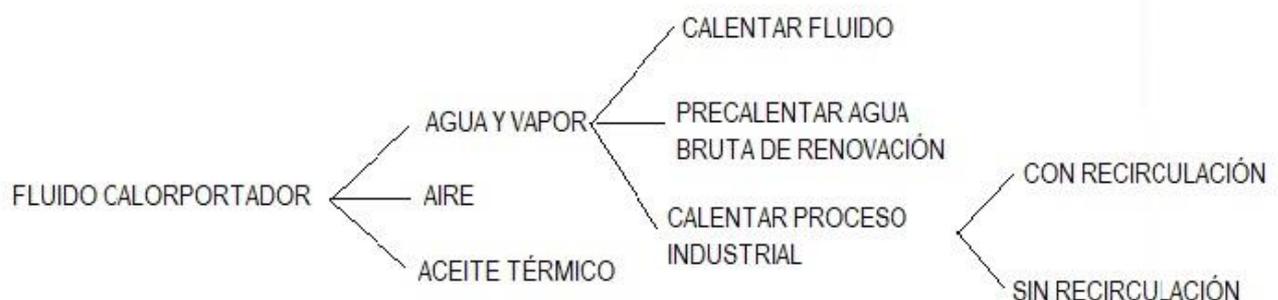
debe realizarse a lo largo de todo el año para analizar las variaciones de aporte de energía solar en las distintas estaciones. Normalmente una instalación en la actualidad suele cubrir entre el 40 y el 80 % de la demanda total industrial, ya que para que pudiera cubrirse al cien por cien sería necesario instalar sistemas muy costosos de almacenamiento de energía a largo plazo que harían económicamente inviable el proyecto.

Una vez que se conoce qué demanda cubrirá la planta, se hallará la potencia que debe producir la instalación y estimar la superficie de captadores solares que se deberá instalar, así como el volumen de acumulación que se requerirá.

Finalmente, antes de implantar definitivamente la planta solar se deben llevar a cabo una serie de simulaciones con los colectores y volumen de almacenamiento elegidos para poder llevar el proyecto a cabo.

2.1.2. Clasificación de instalaciones solares industriales

Para lograr realizar una clasificación de las instalaciones solares hay que tener en cuenta numerosos criterios, ya que no existe una única distribución.



2.1.2.1. Fluido calorportador

El fluido calorportador es uno de los principales criterios para llevar una clasificación a cabo. Normalmente se utiliza agua (tanto líquida como en forma de vapor) o aire, aunque también puede usarse un aceite térmico con mayor capacidad de térmica. En una instalación donde el fluido sea agua o vapor, esta podría precalentar el agua bruta de renovación, calentar directamente el proceso industrial o calentar el fluido calorportador, según se ve en la figura del punto 2.1.2. También se podría llevar a cabo una combinación de las dos últimas. [12]

2.1.2.2. Circuito de captación

En procesos en los que el fluido es líquido y su objetivo es calentar directamente el proceso industrial, el Sistema puede tener o no recirculación. La mayoría de los procesos industriales tienen recirculación. Estos sistemas (aquellos que tienen recirculación) se asemejan en funcionamiento a los sistemas de calentamiento de agua en la edificación.

Los sistemas sin recirculación constan únicamente en procesos industriales en los que el agua o

fluido calorportador se ensucia en el proceso de calentamiento, por ejemplo, en un tren de lavado de botellas o en una línea de desinfección y tratamiento de aves para consumo humano.

2.1.2.3. Sistema Auxiliar

El sistema auxiliar puede existir o no, y si existe, puede estar conectado en serie o en paralelo. Normalmente se conectan en serie para lograr un mayor rendimiento de los captadores, ya que permite que estos trabajen a una temperatura menor.

2.1.2.4. Sistema de acumulación

La instalación puede constar o no de un sistema de acumulación, aunque normalmente disponen de un depósito que permite utilizar la energía en función de la demanda. [15]

2.2. Tecnología y Elementos de una Instalación Solar Térmica

Como se ha mencionado anteriormente, la parte más relevante de una instalación solar térmica son los colectores solares. Por ellos circula el fluido de trabajo y se calienta, evitando mediante un aislamiento térmico lo más eficaz posible que el fluido se enfríe. Por ejemplo, si se dispone de aire se puede hacer circular este por piedras calientes, devolviendo el calor al aire que se haya enfriado.

Los colectores tienen asociados a su vez un sistema de distribución, que se encarga tanto de recircular el fluido del circuito primario como de repartir directa o indirectamente este y de hacerlo llegar a los puntos de consumo. El diseño de un buen sistema de distribución es imprescindible para lograr una eficiencia adecuada de la planta, situando los puntos de consumo y los circuitos de recirculación en las zonas indicadas de manera que se use el sistema auxiliar lo menos posible.

2.2.1. Captadores solares

Los captadores solares son el elemento básico de esta fuente de energía renovable. Absorbe la energía solar y la transforma en calor. Los procesos industriales requieren una energía térmica que oscila en un rango muy amplio, requiriéndose a veces niveles térmicos muy bajos, como por ejemplo una temperatura ambiente, hasta procesos en los que se necesitan más de 250 °C. Dicho requerimiento de temperatura es el que determina el tipo de tecnología del colector que debe usarse y define cómo debe integrarse para lograr un funcionamiento eficiente de la instalación.

- Baja temperatura ($T < 60-80$ °C): aquellos procesos industriales que requieren un nivel térmico bajo suelen usar colectores de tipo placa plana
- Media temperatura ($80 < T < 250$ °C): este tipo de instalaciones suelen estar destinadas a producción de vapor en procesos industriales y producción de electricidad. Suelen ser colectores de vacío.
- Alta temperatura ($T > 250$ °C): son capaces de alcanzar temperaturas extremadamente altas, pudiendo llegar incluso hasta los 2000 °C. Evidentemente, son los sistemas más caros y con mayor rendimiento. Trabajan por concentración, ya que si no sería imposible alcanzar niveles térmicos tan elevados. [12]

2.2.1.1. Conexión de captadores solares

La correcta distribución y conexión de los captadores es uno de los requisitos para lograr una buena integración de la instalación solar térmica a la planta industrial. Por supuesto el campo solar deberá siempre estar compuesto por unidades del mismo modelo para optimizar el funcionamiento de la instalación y la distribución debe ser lo más uniforme posible.

Además se debe llevar a cabo un equilibrado del campo de captación para nivelar el caudal del fluido de trabajo. Para ello se debe igualar la longitud de los circuitos con el denominado retorno invertido. Consiste en igualar la longitud de las tuberías de distribución de los captadores para que se produzca la misma pérdida de carga en todos los puntos de la red. Se insertan también pérdidas de carga instalando válvulas de equilibrado a la salida del grupo de captadores.

Los captadores pueden conectarse en serie, en paralelo o hacer una combinación de ambas, logrando lo que se conoce como circuito mixto.

2.2.1.1.1. Captadores conectados en paralelo

Este tipo de conexión es la más habitual en instalaciones de baja temperatura. Al conectar los captadores en paralelo, la entrada y la salida de los captadores están conectadas a puntos de entrada y salida comunes al resto de los captadores. Esto hace que la temperatura del fluido de entrada sea la misma en todos los puntos previos a los captadores, ocurriendo lo mismo en los puntos situados a la salida de los captadores.

Esta configuración trabaja realmente con el salto térmico de un solo captador, por lo que todos trabajan en el mismo punto de la curva de rendimiento.

El caudal de trabajo será la suma de los caudales parciales de cada captador. Sin embargo, la pérdida de carga que afecta a todo el conjunto es la de un único colector solar.

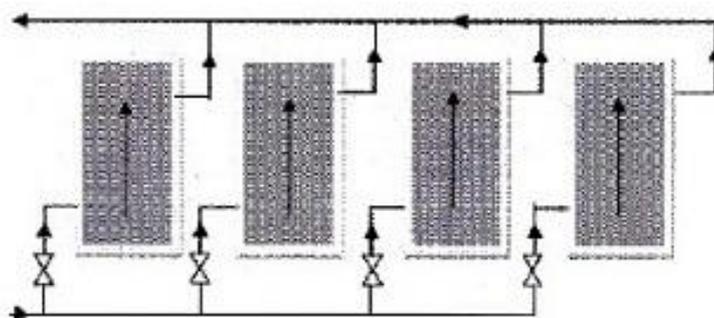


Figura 9. Captadores conectados en paralelo (Ingemecánica)

2.2.1.1.2. Captadores conectados en serie

En este tipo de conexión, la salida del primer captador se conecta directamente con la entrada del segundo, y así sucesivamente. La temperatura del fluido de trabajo en cada captador es menor que la de su posterior, ya que se va calentando conforme va circulando por los distintos colectores. Esto permite obtener temperaturas más altas que si se trabajara con el salto térmico de un solo captador. Este aumento tan acusado de temperatura tiene la desventaja de que el rendimiento de captación disminuye proporcionalmente con el aumento de la temperatura del fluido. Además, el caudal de circulación es bajo y ocurren numerosas pérdidas de carga, lo que dificulta el trabajo de la bomba.

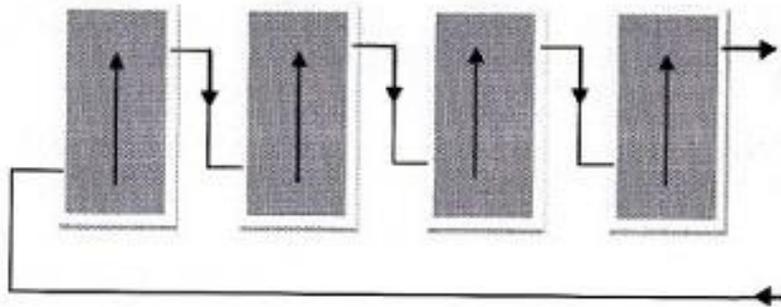


Figura 10. Captadores conectados en serie (Ingemecánica)

2.2.1.1.3. Captadores conectados en serie-paralelo

Esta conexión mixta se instala en algunos casos en los que se requieran temperaturas más elevadas o variaciones en el volumen de de los captadores, por lo que se combinan las dos configuraciones anteriores.

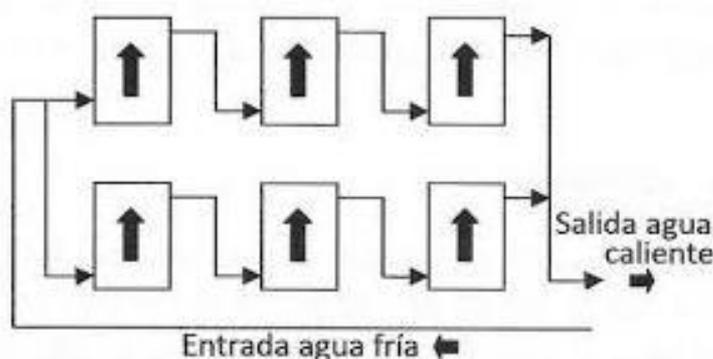


Figura 11. Captadores conectados en serie-paralelo (Ingemecánica)

2.2.1.2. Tipos de captadores solares

2.2.1.2.1. Captador Plano

Un captador solar plano es el tipo más habitual de colector, especialmente en plantas de baja temperatura. Actualmente su uso está más extendido a nivel doméstico, especialmente para obtención de agua caliente sanitaria, pero es cierto que es de gran utilidad para algunos procesos industriales como pueden ser lavado, secado o tratamientos térmicos específicos, los cuáles precisan un nivel térmico no extremadamente alto. Se trata de colectores estacionarios que carecen de mecanismo alguno para el seguimiento del Sol.

El principio de funcionamiento de este tipo de captador se basa en una “trampa de calor” que combina los efectos de cuerpo negro y el efecto invernadero. Este principio es el mismo que se experimenta al entrar en un coche aparcado al sol en verano, ya que se permite la entrada de radiación solar de onda corta, y no permite salir la onda larga. De esta manera, la radiación de onda corta atraviesa la superficie de captación e incide en la placa absorbente, la cual se calienta y transfiere calor por conducción a los tubos que circulan por su interior. Las pérdidas radiantes consiguen reducirse ya que los rayos de longitud de onda corta han pasado a ser de onda larga tras el choque y la cubierta tiene poca transmisividad para este tipo de onda. [15]

2.2.1.2.1.1. Elementos de un captador solar plano

Un captador solar plano consta principalmente de cuatro elementos básicos.

- **Cubierta:** en la mayoría de los casos el captador tiene una placa acristalada, normalmente de vidrio blanco por su valor elevado de transmisividad, en la parte que está expuesta al sol para absorber la radiación solar y evitar que se fugue la energía térmica. El objetivo es que se refleje la menor radiación posible en la superficie y que absorba la mínima en su interior, logrando que la mayoría de la radiación, aproximadamente un 60 %, incida directamente en el absorbedor.
- **Placa absorbedora:** justo debajo de la cubierta, en el interior del captador se encuentra una placa metálica, conocida como placa absorbedora. Básicamente es la encargada de transformar la energía solar en térmica, transfiriendo el calor de los rayos de sol al fluido que circula por su interior. Esta placa está unida a una serie de tubos y conductos por los que circula el fluido de trabajo, el cual se calienta al incidir la luz solar. Según la configuración de estos tubos, la configuración puede ser en placas, en parrilla o en serpentín.

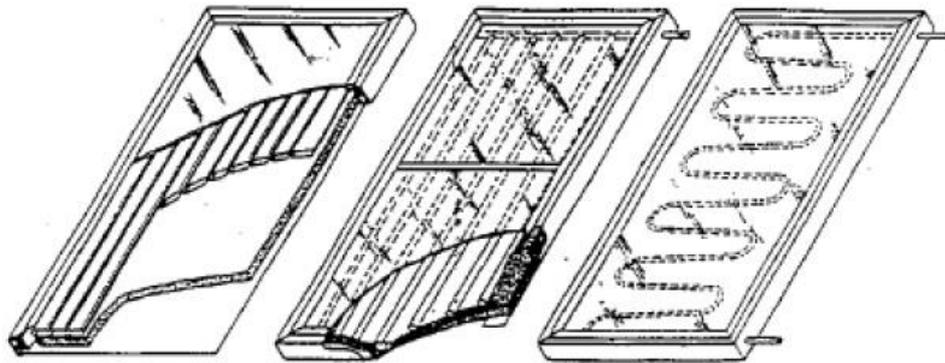


Figura 12. Configuración en placa, parrilla y serpentín (Termicol)

- **Aislamiento térmico:** el aislamiento térmico conforma uno de los elementos más importantes de un captador solar plano. Es el encargado de reducir las pérdidas térmicas con el exterior, por lo que se coloca un material aislante capaces de soportar altas temperaturas (lanas minerales, poliuretano, poliestireno etc.) que rodee tanto los laterales como la superficie trasera.

Es muy importante que el material que se elija como aislante no emita gases a altas temperaturas, ya que esto provocaría deposiciones que afectarían negativamente en el rendimiento del captador. Además deben poder resistir a la humedad ya que en caso de lluvias podrían producirse filtraciones accidentales de agua al interior podrían deteriorar el captador.

- **Carcasa:** este último elemento recubre y envuelve a los demás elementos de la placa solar, proporcionándole la forma final y protegiéndolo de agentes externos. Las carcasas suelen ser de aluminio o acero galvanizado. [16]

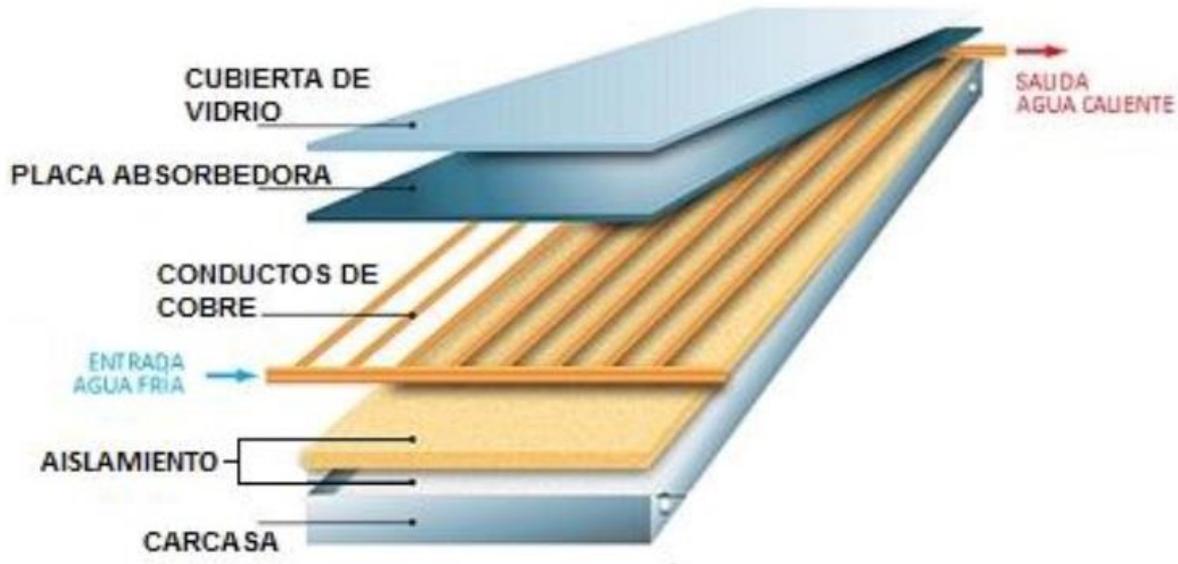


Figura 13. Desglose de un captador solar plano (Termicol)

2.2.1.2.1.2. Eficiencia de un captador solar plano

La eficiencia de cada captador solar está definida en su curva de rendimiento de manera que el cliente pueda conocer qué cantidad de energía se puede obtener en cada momento. La homologación de los captadores está controlada por una normativa que lleva a cabo la evaluación de la curva de cada uno de los modelos que pretenden comercializarse. Obviamente los datos de la eficiencia que se proporcionan se referirán al año cero de la vida útil del captador, ya que su rendimiento se puede ver mermado debido a factores de ensuciamiento, mal mantenimiento etc. La orientación e inclinación tienen una fuerte influencia en el rendimiento del captador y la temperatura de entrada del fluido a la entrada interesa que sea lo más baja posible.

Aun así nunca se consigue aprovechar la radiación que llega al colector en su totalidad. Debido a las pérdidas térmicas y ópticas que se producen.

El rendimiento de un captador plano es la relación entre la energía que logra captar la placa absorbente y la energía que incide sobre el captador y viene dado por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Q_u}{I \cdot A_c} = \frac{I \cdot A_c \cdot F_R(\tau\alpha) - A_c \cdot F_R \cdot U_L \cdot (T_{fe} - T_a)}{I \cdot A_c}$$

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_{fe} - T_a)}{I}$$

Siendo:

T_{fe} : temperatura del fluido de entrada

T_a : temperatura del entorno

I : irradiancia global media $[W/m^2]$

$F_R(\tau\alpha)$: Factor Óptico o Factor de ganancias. Se identifica en la curva de rendimiento inferior con el

corte con el eje de ordenadas. Las pérdidas ópticas son independientes de la temperatura y aumentan con el ángulo de incidencia de la radiación.

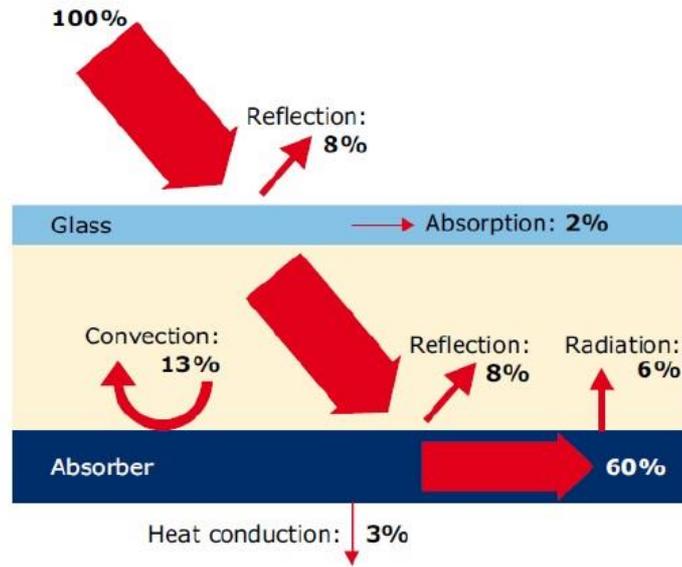


Figura 14. Pérdidas producidas en un captador plano (IEA 2008)

$F_R \cdot U_L$: Factor de Pérdidas Térmicas. Este parámetro representa las pérdidas que ocurren principalmente por convección como consecuencia del aire que se encuentra atrapado entre la superficie absorbente y la cubierta. También se pierde calor por conducción a través de la cubierta trasera y los laterales y de ahí radica la relevancia de un buen aislamiento. Estas pérdidas vienen representadas en la pendiente de la recta de rendimiento. [16]

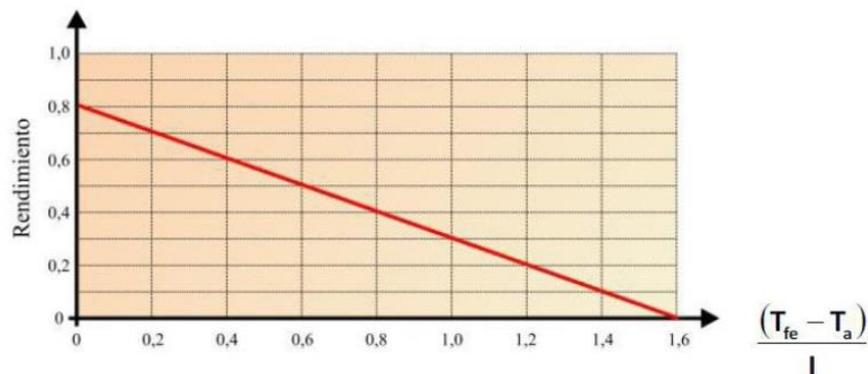


Figura 15. Recta de rendimiento de un captador plano (Apuntes Energía Solar)

2.2.1.2.2. Captador solar de tubos de vacío

Los captadores de tubos de vacío suelen usarse en lugares más fríos en los que la diferencia de temperatura entre el entorno y el propio panel es relativamente alta, por lo que conviene minimizar las pérdidas térmicas. En invierno tienen también mejor rendimiento, soportando normalmente temperaturas de -30°C . Este tipo de captadores suponen un avance en la tecnología de captación en condiciones más adversas y además son más económicos al estar fabricados completamente por cristal borosilicato.

Están formados por colectores lineales que se encuentran ubicados en el interior de un tubo de vacío.

Entre el tubo transparente exterior y el interior por el que circula el glicol se ha hecho el vacío para evitar las pérdidas por convección. Con esto se logra que se reduzcan las pérdidas por convección y conducción desde la superficie absorbente que se producen en los captadores planos, en un 95 %, lo que permite una mejora del rendimiento de casi el 200 % respecto a los anteriores. Se consigue alcanzar temperaturas de más de 100 °C.

Al igual que los anteriores son estacionarios, pero estos tienen la ventaja de que al estar formado por tubos cilíndricos, el rendimiento del captador no se modifica en una variación del ángulo de incidencia del sol de 25° ya que reciben los rayos de sol perpendicularmente prácticamente todo el día, algo que en los captadores planos solo ocurre en horas concretas del día. Esto significa que son mucho más versátiles con respecto a la ubicación y no debe ser tan estudiada como en los captadores planos, ya que permite que se adapten a diversas edificaciones fácilmente.

Este tipo de captadores podrían considerarse un tipo concreto de los captadores solares planos, con la diferencia de que las pérdidas que se producían en los primeros por convección entre la superficie de absorción y la placa aquí se reducen considerablemente, llegando a ser despreciables. Esto permite una mejora de casi el 200% del rendimiento del captador.

Existen dos tipos de captadores de tubo de vacío cuyo funcionamiento es muy diferente: captadores de vacío con fluido directo y captadores *heat pipe*.

2.2.1.2.2.1. Captador de vacío con fluido directo

El funcionamiento de este tipo de captadores es prácticamente idéntico al de los captadores solares planos, de manera que el fluido del circuito primario circula por los conductos expuestos al sol y va aumentando su energía térmica a lo largo del recorrido. Los propios tubos disponen de una placa que hace el papel de superficie absorbente, junto a la cual circula el fluido de trabajo y se produce la transformación de la radiación solar en energía térmica.

Tienen un recorrido de ida y otro de vuelta al igual que los captadores planos convencionales.

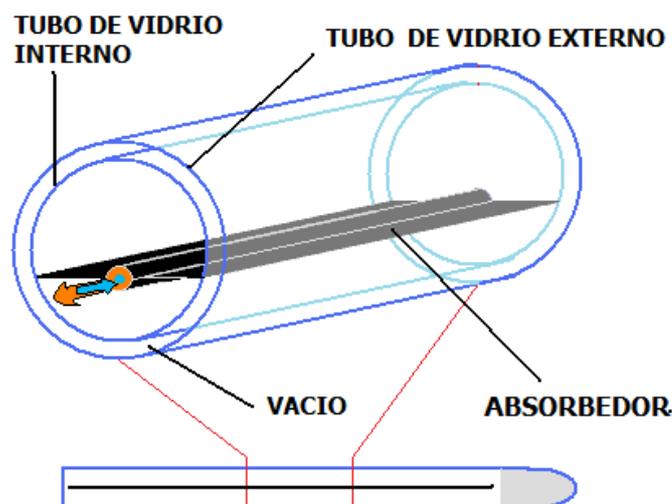


Figura 16. Captador de vacío con fluido directo (Sitio Solar)

2.2.1.2.2.2. Captador de vacío *heat pipe*

Los captadores *heat pipe* son muy eficaces debido a la enorme conductividad térmica de los tubos. El principio de funcionamiento de estos colectores es muy diferente al anterior, ya que está basado en

un efecto de termosifón.

Los tubos cilíndricos de los heat pipe disponen en su interior de otro tubo fino de cobre por el que circula una mezcla de glicol normalmente. La radiación al incidir en la superficie absorbadora del tubo, la cuál si es idéntica a la de los de fluido directo, se calienta y transmite ese calor al tubo fino de cobre. Este calentamiento hace que el glicol se evapore y que al ser un gas caliente ascienda hasta llegar a la parte superior donde este cede su calor latente a otro fluido más frío que circula por el circuito secundario. Al hacerlo se condensa de nuevo y vuelve a bajar por gravedad para repetir este proceso de nuevo.

Este funcionamiento permite la inclinación individual de cada tubo, lo que permite montar este tipo de instalaciones sin necesidad de que los captadores solares estén orientados al sur.

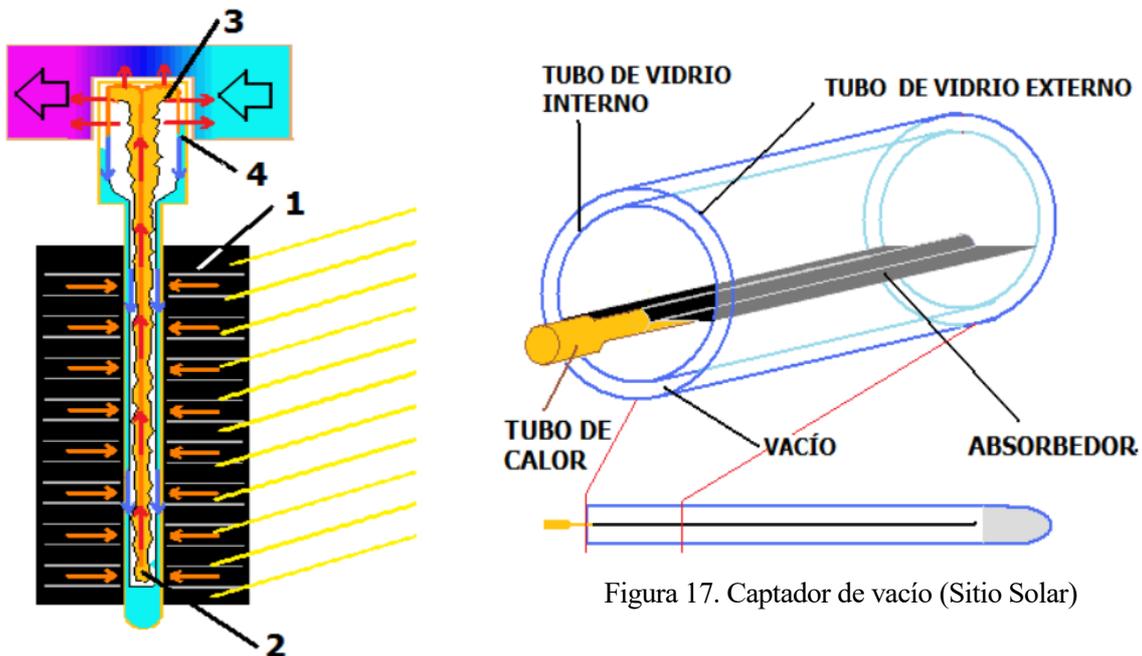


Figura 17. Captador de vacío (Sitio Solar)

Figura 18. Funcionamiento de captador de vacío heat pipe (Sitio Solar)

2.2.1.2.3. Captador cilindro parabólico

Los captadores cilindro parabólicos son considerados captadores solares de concentración. Se encargan de transformar la energía solar en energía térmica con la particularidad de que concentran los rayos de sol en un fluido de trabajo, logrando así un salto térmico. La concentración suele estar en torno a 25. Dicho fluido de trabajo circula por un conducto (tubo absorbedor) situado en la línea focal de la parábola de los captadores.

A diferencia de los dos tipos de captadores estudiados anteriormente, los cuáles eran estacionarios, estos constan de un sistema de seguimiento que logra una mayor absorción de la radiación solar.

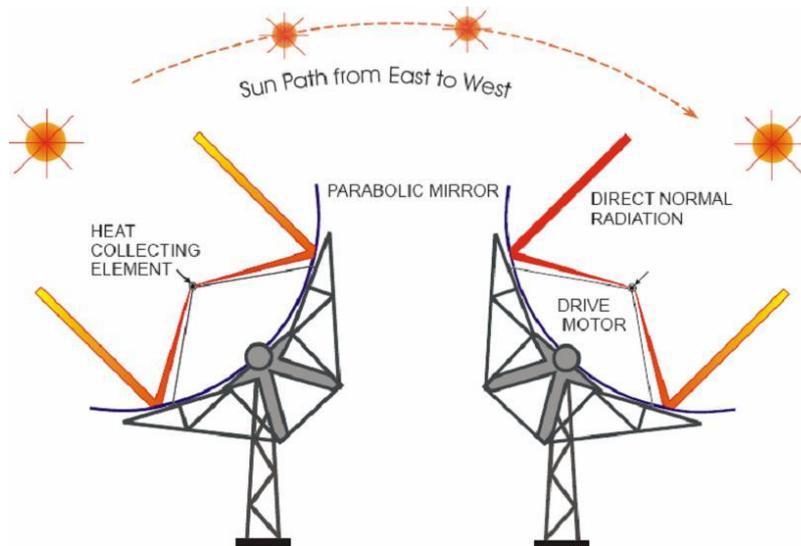


Figura 19. Captador cilindro parabólico en su recorrido del sol (Renovetec)

La concentración de estos colectores permite que puedan trabajar con temperaturas de entre 150 °C y 400 °C, permitiendo que puedan usarse no solo en aplicaciones con un nivel térmico de temperatura medio, si no también para alta temperatura. Esto es posible gracias al gran tamaño del área de apertura en comparación con el área de la superficie de absorción, lo que disminuye enormemente las pérdidas térmicas al ser estas proporcionales a la superficie de absorbente. En función de la temperatura que se desee alcanzar, se usará un fluido de trabajo u otro. Por ejemplo, si el nivel térmico necesario es menor de 150 °C se puede usar agua desmineralizada, ya que la presión de trabajo no es muy alta. Sin embargo cuando las temperaturas son mayores, el agua debe sustituirse por aceites térmicos o sales, ya que si no la presión que debe mantenerse (presión superior a la de saturación) para que el agua no se evapore sería insoportable por el sistema. Aún así, la idea de uso de agua como fluido de trabajo ha sido siempre la más llamativa porque permite aumentar la eficiencia de captadores y disminuir las pérdidas térmicas en el campo solar.

La mayoría de los captadores cilindro parabólicos están destinados a la producción de vapor, el cuál puede usarse o no para lograr la generación de electricidad incorporando una turbina. Este vapor puede generarse mediante tres métodos diferentes:

- Generación directa de vapor: se evapora agua directamente en los tubos absorbedores. Lógicamente para ello se debe usar agua como fluido de trabajo.
- Usando un aceite térmico como fluido de trabajo, de manera que al ser calentado por la radiación solar concentrada, se dirija a un intercambiador donde se da el intercambio del calor latente que posee y produce vapor. Con este método se puede trabajar a altas temperaturas.
- Haciendo circular agua presurizada por los colectores y transformándolo parcialmente en vapor en un tanque externo de expansión. Este método únicamente puede usarse cuando el nivel térmico requerido sea menor de 200 °C.

2.2.1.2.3.1. Elementos de un captador cilindro parabólico

Un captador solar consta fundamentalmente de cuatro elementos básicos:

- **Reflector cilindro parabólico:** como su propio nombre indica, es el encargado de reflejar y

concentrar la radiación solar en el tubo absorbente, colocado a lo largo de la línea focal de la parábola. Estos espejos están fabricados de metal, plástico o cristal y están envueltos con películas de plata o aluminio. La incidencia de esta radiación hace que la energía termodinámica (calor latente) del fluido que circula por el interior del tubo absorbente aumente.

- **Receptor o tubo absorbedor:** es donde se produce la transformación de la energía solar en energía térmica que transporta el fluido calorportador. Este conducto es de cristal, por cuyo interior circula otro tubo, el cual es metálico y posee un recubrimiento con un determinado material de alta absorptividad y baja emisividad en el infrarrojo, logrando así un gran rendimiento. Este tubo de cristal también suele estar tratado de manera que se aumente su transmisividad y como consecuencia, su rendimiento óptico.

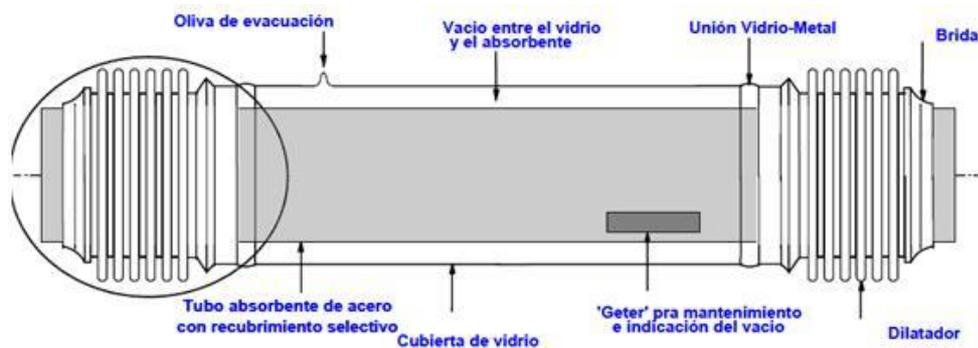


Figura 20. Esquema de disposición de tubo absorbedor

- **Sistema de seguimiento:** el sistema de seguimiento de este tipo de captadores puede ser de un eje o de dos ejes. Los primeros tienen una mayor eficiencia y un menor coste, por lo que salvo alguna excepción, suelen ser los predominantes en este tipo de instalaciones. El objetivo de este mecanismo es seguir el sol a lo largo del día para favorecer la incidencia de las radiaciones solares sobre el reflector, de manera que el sistema de seguimiento se coloca de norte a sur o de este a oeste para lograr aumentar esta incidencia.

Estos mecanismos suelen ser eléctricos, para el caso de colectores de reducido tamaño, o hidráulicos si se trabaja con colectores muy grandes.

- **Estructura soporte:** proporciona rigidez al conjunto y sirve de unión con la cimentación del propio colector.

2.2.1.2.3.2. Eficiencia de un captador cilindro parabólico

La eficiencia de un captador cilindro parabólico viene determinada por el tubo absorbedor, de manera que cuanto menor sea esta superficie de absorción, menores serán las pérdidas térmicas que se producen. Estas pérdidas vienen provocadas por diversos factores, por lo que se puede diferenciar entre:

- **Pérdidas ópticas:** estas se producen debido a la imperfección del reflector, ya que por muy transparente que sea la cubierta no deja pasar el cien por cien de la radiación, ni la superficie de absorción tiene un rendimiento total. Estas pérdidas quedan definidas tras la aplicación de

cuatro parámetros:

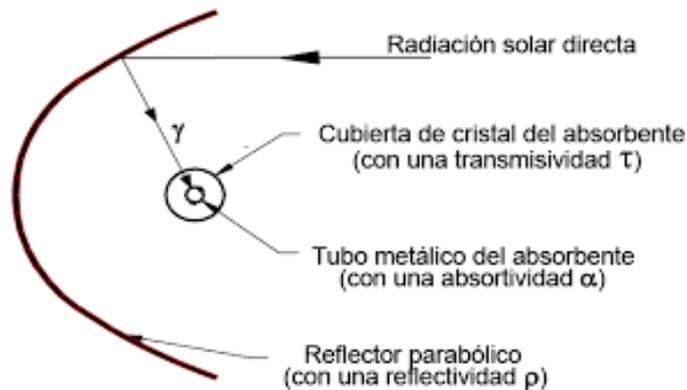


Figura 21. Pérdidas ópticas de un captador cilindro parabólico (Apuntes Energía Solar)

Factor de interceptación (γ): representa la parte de la radiación solar que realmente llega al tubo absorbedor, ya que desde el momento en el que la radiación solar incide en este hasta que llega al tubo receptor (si llega), se producen una serie de pérdidas provocadas por la mala ubicación del colector o del tubo receptor respecto a este y por una serie de imperfecciones microscópicas o macroscópicas.

Transmisividad (τ): la cubierta del receptor es atravesada por la mayoría de la radiación solar que le llega, pero hay una pequeña parte que se refleja o se absorbe. Representa el cociente entre la radiación que atraviesa la cubierta y la que incide sobre esta. La transmisividad suele tomar valores de entre un 92 % y 96 %.

Absortividad (α): representa la cantidad de radiación que realmente es absorbida por el tubo, en comparación con la incidente. La absorptividad suele tomar valores de entre un 90 % y 96 %.

Reflectividad (ρ): está relacionado con la cantidad de radiación solar que el propio espejo es capaz de reflejar. De aquí radica la importancia de un buen mantenimiento y limpieza de los espejos. La reflectividad suele tomar valores de entre un 83 % y 93 %.

La combinación de estos cuatro parámetros da lugar al rendimiento óptico del captador, lo que demuestra que en las pérdidas ópticas únicamente influyen el grado de ensuciamiento del captador y el ángulo de incidencia del sol.

$$\eta_{opt} = \gamma \cdot \rho \cdot \alpha \cdot \tau$$

- **Pérdidas geométricas:** estas pérdidas son relativas a la posición de los colectores y provocan una reducción del área eficaz de captación. En función de la posición del sol algunos captadores pueden generar sombras sobre otros, por lo que mientras mayor sea la distancia entre las filas de colectores, menores serán las pérdidas de este tipo, pero mayores serán las pérdidas térmicas y asociadas a bombeo que puedan producirse al aumentar la superficie total de captación.

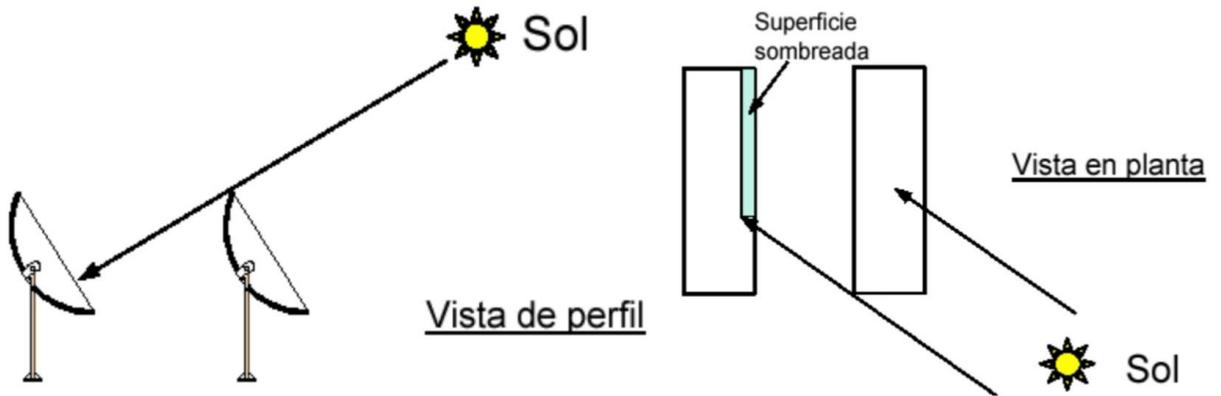


Figura 22. Pérdidas por sombras en captadores cilindro-parabólicos (Apuntes Energía Solar)

Además los captadores también sufren pérdidas inherentes propias a cada uno debido al sistema de seguimiento de un solo eje. Esto provoca que el ángulo de incidencia, φ , que es el ángulo formado entre la radiación solar directa que incide sobre la apertura del captador y la normal a dicho plano, reduzca tanto la superficie de captación efectiva como los valores de absorptividad, reflectividad y transmisividad, los cuáles tienen un valor máximo cuando el ángulo de incidencia es 0° . El valor del ángulo de incidencia varía en función de la época del año y de las horas del día.

- **Pérdidas térmicas:** las pérdidas térmicas se producen fundamentalmente en el tubo absorbente y algunas en los conductos del fluido térmico.

Estas se producen por convección con el aire del ambiente, por radiación con el propio entorno y por conducción a través del tubo absorbente y la cubierta de cristal. Se modelan con un coeficiente global de transferencia de calor, U_L , el cual es proporcionado por el fabricante. En muchos casos se consiguen disminuir las pérdidas por convección y radiación haciendo el vacío en el espacio disponible entre el tubo metálico y la cubierta de vidrio.

Una vez consideradas todas estas pérdidas se puede tener una idea de la cantidad de energía que se pierde en este proceso de captación, siendo menor la real que la que se obtendría si se consideraran condiciones totalmente ideales. [5]

Por tanto, el rendimiento final sería la relación entre la potencia térmica útil y la potencia real solar que incide sobre el colector.

$$\eta_{total} = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{Q}_{\text{solar-colector}}}$$

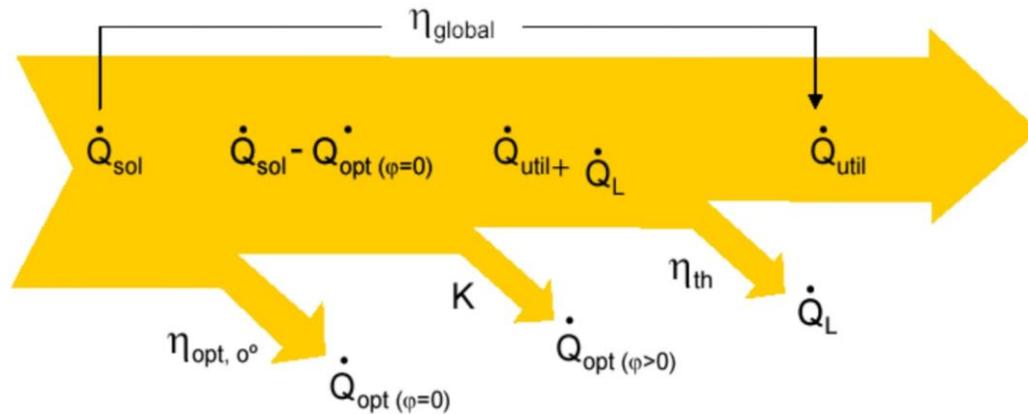


Figura 23. Pérdidas globales (Apuntes Energía Solar)

2.2.1.2.4. Captador tipo Fresnel

Los captadores tipo Fresnel, al igual que los anteriores, son captadores de concentración de foco lineal, es decir, concentran la radiación solar a lo largo de una línea que se corresponde con el tubo de absorción por el que circula el fluido térmico.

El principio de funcionamiento está basado en el método Fresnel que consiste en dividir una parábola en segmentos y es prácticamente igual que el de los captadores cilindro parabólicos: la superficie receptora concentra y refleja los rayos de sol en el tubo receptor por el que circula el fluido de trabajo. La diferencia con los captadores cilindro parabólicos radica en que los anteriores constaban con una superficie absorbedora (receptor) por cada hilera de colectores mientras que los captadores solares tipo Fresnel constan de una única superficie de absorción o tubo receptor para una serie de hileras colocadas en paralelo. Para lograr que la concentración se produzca en la dirección correcta deben contar también con un sistema de seguimiento de eje único con el objetivo de seguir la trayectoria del sol. Una vez que el receptor reciba la radiación concentrada la transforma en energía térmica al absorberla el fluido térmico. Al concentrar todos los captadores la radiación en un único conducto por el que circula el fluido de trabajo, se logran conseguir temperaturas mucho más altas.

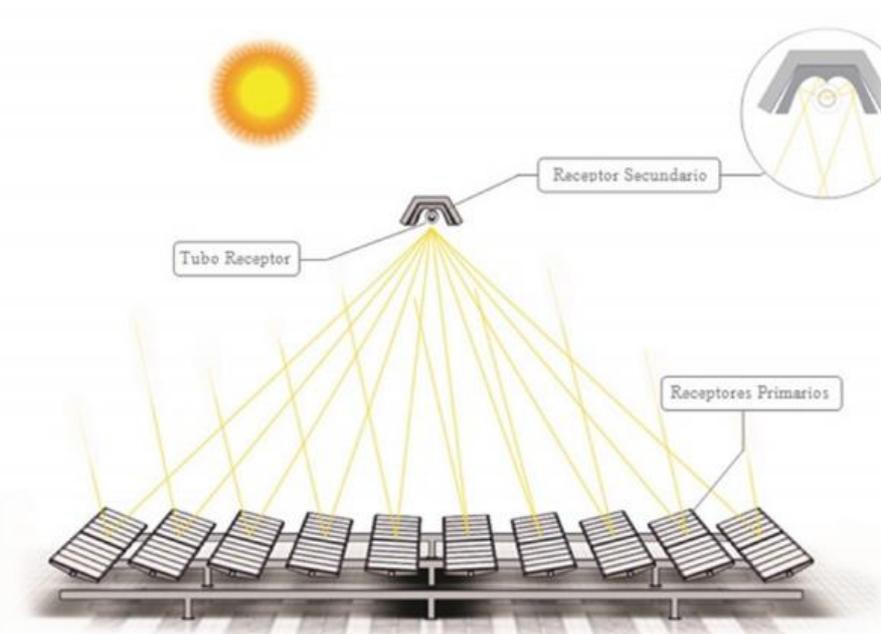


Figura 24. Esquema de una instalación tipo Fresnel (Millennium Energies)

Los espejos que componen este tipo de captador son largos, delgados y con un gran radio de curvatura, pudiendo llegar a ser incluso planos. Además la estructura de estos es más sencilla ya que no tienen que soportar al tubo absorbedor. Al estar situados prácticamente al nivel del suelo, resisten más las corrientes de viento que puedan darse y se evitan la producción de sombras entre ellos.

La versatilidad de este tipo de captadores ha hecho que se integren en numerosas plantas industriales, pudiendo usarse para generación de frío para refrigeración industrial, para producción de calor a media y alta temperatura en procesos industriales, para generación de electricidad,

En la Escuela se dispone de un captador solar de este tipo ubicado en el ático del edificio, el cual se analizará posteriormente.

2.2.1.2.4.1. Elementos de un captador solar tipo Fresnel

Los elementos principales de un captador solar tipo Fresnel son los siguientes:

- **Reflector:** los reflectores de un captador de este tipo son largos, delgados y con un gran radio de curvatura, pudiendo llegar a ser incluso planos. Tienen una forma determinada para evitar el funcionamiento de una lente biconvexa o de tipo lupa sin requerir un grosor demasiado grande, lo que permite un mayor área de concentración. Están situados prácticamente al nivel del suelo, resistiendo más las corrientes de viento que pudieran darse y evitando la producción de sombras entre ellos en la medida de lo posible.
- **Tubo absorbedor o receptor:** este consta de un concentrador secundario y de un tubo absorbente. El concentrador secundario se dispone sobre el tubo receptor con el objetivo de mejorar el rendimiento óptico del sistema, ya que los reflectores presentes en instalaciones de tipo Fresnel no se comportan exactamente igual que los cilindro parabólicos y de reducir también las pérdidas térmicas, ya que minimiza las pérdidas por convección. El tubo de absorción, sin embargo, sí es similar al de los anteriores. Consta de un recubrimiento

selectivo de alta absorptividad para longitud de ondas cortas y una baja emisividad en el infrarrojo. Debe tener una buena transmisión de calor con el fluido térmico y una distribución de temperatura adecuada y uniforme a lo largo del tubo para evitar la degradación del material.

Además el receptor puede contar con un reconcentrador, que ayuda a aprovechar los rayos de sol reflejados que no llegan directamente al tubo.

No suelen constar de aislamiento de vacío, pero es una nueva mejora tecnológica que se está desarrollando en la actualidad con el objetivo de mejorar la eficiencia energética disminuyendo aún más las pérdidas térmicas.

En algunos casos se puede disponer de más de un receptor con el objetivo de aumentar la eficiencia óptica.

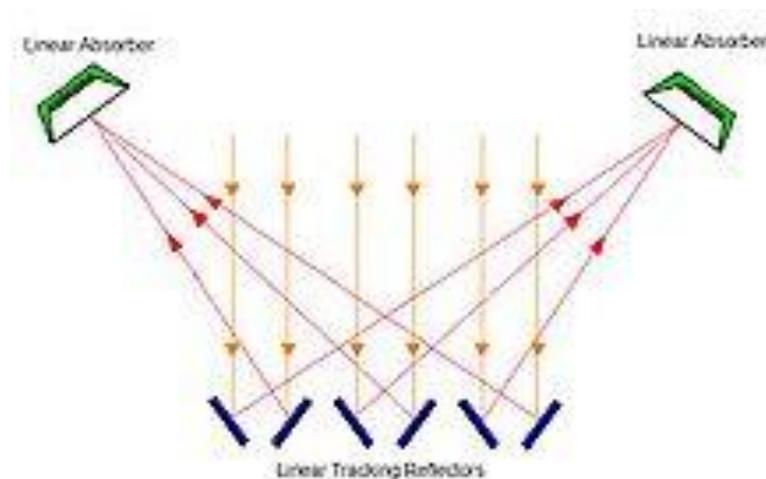


Figura 25. Radiación recibida por captadores tipo Fresnel (Concentraci3n Solar)

- **Sistema de seguimiento:** el sistema de seguimiento de este tipo de captadores es de un solo eje y se encarga de que cada reflector tenga una inclinaci3n diferente para lograr mantener el 3rea incidente perpendicular a los rayos solares. Para ello el sistema consta de un motor con un elemento fotosensible que determinan el movimiento del sol para conseguir el movimiento requerido. Las filas pueden funcionar todas con un mismo motor o disponer de varios y combinar las filas.
- **Estructura soporte:** proporciona rigidez al conjunto y sirve de uni3n con la cimentaci3n del propio colector. Suele ser simple y ligera, dise1ada para que los costes no sean demasiado altos y de manera que se facilite el trabajo de limpieza y mantenimiento en caso de avería.

2.2.1.2.4.2. Eficiencia de un captador solar tipo Fresnel

Al igual que ocurría en los captadores cilindro parab3licos, la eficiencia de los captadores solares tipo Fresnel viene determinada en gran parte por la superficie de absorci3n, de manera que cuanto menor sea esta, menores ser3n las p3rdidas t3rmicas que se producen. Estas p3rdidas vienen provocadas por diversos factores.

- **Efecto coseno:** representa la energía perdida cuando el plano reflector no es perpendicular a la radiaci3n solar. En funci3n de la radiaci3n solar incidente se reflejar3 m3s o menos energía, por lo que esta proporci3n es controlada por el coseno del 3ngulo que forma la

normal al plano con el rayo de sol.

- **Sombras y bloqueos:** las sombras se producen debido a la distancia de un colector con otro. Al ser esta distancia muy pequeña, las pérdidas por sombras son menores que en los anteriores. Sin embargo las pérdidas por bloqueo, que consisten en que parte de la radiación destinada a una fila concreta de colectores es interceptada por otro elemento u otro colector, son más relevantes en este tipo de instalación.

Además, el tubo absorbedor y la propia estructura soporte también producen sombras sobre los captadores.

- **Desbordamiento:** también conocido como Spillage. Son pérdidas consecuentes de las irregularidades presentes en el colector que hacen que parte de la radiación se desvíe y no llegue a alcanzar el tubo absorbente.
- **Reflectividad:** está relacionado con la cantidad de radiación solar que el propio espejo es capaz de reflejar. De aquí radica la importancia de un buen mantenimiento y limpieza de los espejos. Hay parte de la radiación que es absorbida por el propio material de la superficie también.

Considerando todos estos factores, que son las pérdidas más relevantes en un captador de este tipo, se logra modelar el modificador por ángulo de incidencia, que representa el rendimiento óptico de un captador de este tipo. [17]

2.2.2. Sistema de distribución de una instalación solar térmica

El sistema de distribución tiene como misión transportar el fluido caliente que circula por los captadores y llevarlo al punto de consumo. El objetivo de estos circuitos es lograr que las pérdidas térmicas sean lo menores posibles durante su recorrido, de manera que se pueda llevar al punto de consumo la mayoría del calor latente disponible en el fluido de trabajo.

En función de las necesidades que haya que satisfacer y de las condiciones climáticas de la zona donde se ubique la instalación, el circuito de distribución será de una forma u otra. Para ello se pueden clasificar según la manera en la que se genera el agua caliente o en función del tipo de circulación del fluido.

GÉNERO	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
GENERACIÓN DE AGUA CALIENTE	INSTALACIÓN DE CIRCUITO ABIERTO
	INSTALACIÓN DE CIRCUITO CERRADO
TIPO DE CIRCULACIÓN DEL FLUIDO	CIRCULACIÓN NATURAL
	CIRCULACION FORZADA

Tabla 4. Sistemas de distribución de una instalación solar térmica

2.2.2.1. Instalaciones de circuito abierto

Las instalaciones solares de circuito abierto son aquellas en las que el agua de consumo pasa directamente por los colectores solares, por lo que transfieren directamente el calor del agua caliente producida en el captador al depósito de acumulación o punto de consumo.

El sistema de funcionamiento es muy sencillo: al calentarse el captador con los rayos de sol incidentes, el agua aumenta de temperatura y se desplaza hacia arriba. La misma cantidad de agua desplazada vuelve a entrar fría al captador para que se repita el proceso.

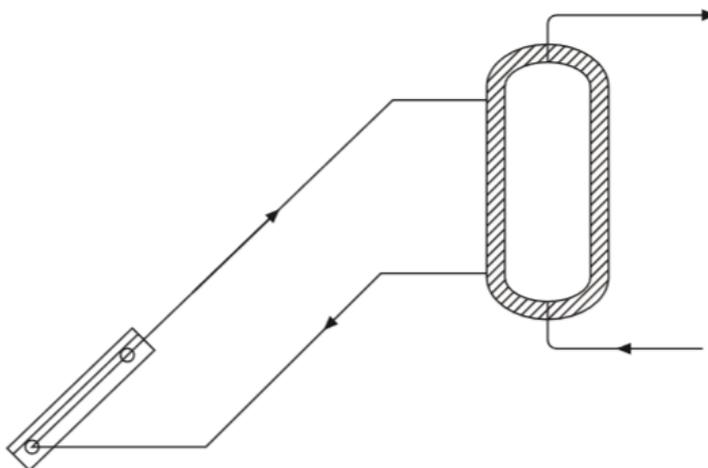


Figura 26. Esquema de instalación tipo abierta (IDAE 2006) [15]

Este sistema logra reducir los costes de la instalación de distribución, y energéticamente hablando, es más eficiente porque se producen menos pérdidas térmicas.

Sin embargo, presenta una serie de inconvenientes. En zonas donde las temperaturas son muy bajas y en zonas con alta concentración de sales pueden acabar obstruyendo los paneles. Se deben usar, por tanto, materiales que no contaminen el agua de circulación, existiendo más riesgo de corrosión en las tuberías del sistema de distribución. Igualmente, se debe controlar también el riesgo de congelación que puede provocar roturas en periodos de heladas y vaporización, ya que no se pueden emplear anticongelantes que influyan negativamente en la calidad del agua, para lo cual se procederá al vaciado y posterior llenado del circuito durante el invierno. La presión de la red también debe ser objeto de control continuamente, ya que puede hacer peligrar el correcto funcionamiento de los captadores.

Por todos estos motivos, este tipo de distribución está sometido a más restricciones legales y controles y suele emplearse en zonas donde el invierno no es demasiado frío o en instalaciones temporales que sólo funcionen durante una determinada época del año en la que las temperaturas no son excesivamente bajas.

2.2.2.2. Instalaciones de circuito cerrado

Este tipo de instalaciones es el más habitual y constan, como mínimo, de dos circuitos, ya que el agua de consumo no circula directamente por los captadores.

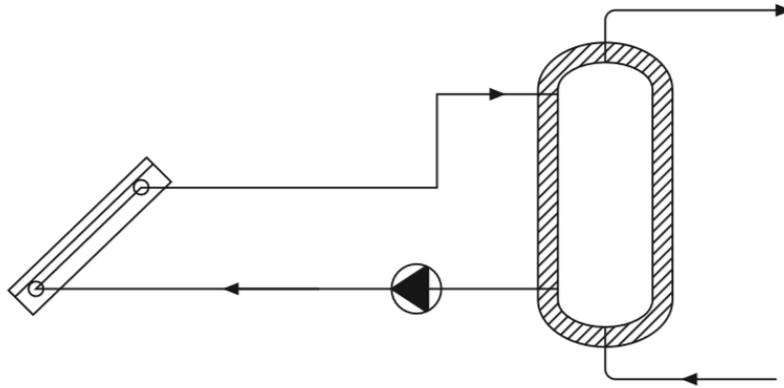


Figura 27. Esquema de una instalación cerrada (IDAE 2006) [15]

- **Circuito primario:** este primero se distribuye a través del captador y por tanto el fluido que circula por él es el encargado de absorber la radiación solar. Al no mezclarse el agua de consumo con este fluido, se le puede añadir un líquido anticongelante, permitiendo su uso en climas en los que las temperaturas puedan ser inferiores a cero grados. Por tanto una vez dicho fluido de trabajo ha aumentado su nivel térmico gracias a los rayos de sol se hace circular a través de un intercambiador en el cuál se produce el intercambio de calor entre este y el agua de consumo, la cual circula por el circuito secundario.
- **Circuito secundario:** por este circuito circula el agua destinada a uso y consumo por el usuario. Absorbe el calor en el intercambiador común a ambos circuitos y la distribuye a los puntos de consumo o al volumen de almacenamiento. Si esta agua no tuviera la temperatura suficiente como para ser usada, se hace circular por un sistema auxiliar, que podría ser una caldera que funcione con algún combustible o una resistencia eléctrica, con el objetivo de suministrarle el incremento térmico necesario.

Podrían existir más de dos circuitos, siendo siempre el último el que abastece a los puntos de consumo. [15]

2.2.2.3. Instalación con circulación natural de agua o termosifónica

Estos sistemas aprovechan la circulación natural del agua caliente, que por su menor densidad tiende a ascender, por lo que no necesitan bomba de impulsión alguna. Para que la circulación del agua sea apropiada tiene que haber una diferencia de altura mínima entre los colectores y el acumulador. Suelen ser utilizados en instalaciones pequeñas para que el fluido sea capaz de moverse con esta propia diferencia de densidades.

Los sistemas termosifónicos son muy utilizados en áreas geográficas donde el clima es cálido.



Figura 28. Instalación con circulación natural (Click Renovables)

2.2.2.4. Instalación con circulación forzada de agua

Este tipo de instalaciones son aquellas que constan de una bomba de impulsión activada por un motor, por lo que se necesita electricidad, así como llevar un control y mantenimiento del motor que la genere. Esta bomba hace que el fluido circule a más velocidad, logrando que se pierda menos calor. Además permite interrumpir el proceso de transmisión de calor si el agua del depósito está más caliente que la que procede de los captadores, por lo que es muy común este tipo de instalaciones en climas fríos. En el caso de que los intercambiadores se sitúen a menos altura que los colectores, se necesitará también una válvula antirretorno para evitar un efecto termosifónico nocturno.



Figura 29. Instalación con circulación forzada

Este sistema tiene numerosas ventajas y tiene un rendimiento superior al de circulación forzada, especialmente porque el fluido del circuito primario circula más rápido que en los de circulación natural, por lo que la transferencia de calor es mayor con el paso del tiempo. Por supuesto, se deben tener en cuenta los costes adicionales que implica la instalación de dicha bomba así como la energía necesaria para su funcionamiento. Aun así, el balance termoeconómico global suele indicar que los beneficios energéticos, y por tanto económicos, son mayores en instalaciones de este tipo.

2.2.3. Almacenamiento

La energía solar varía en función de la época del año y de la hora del día y normalmente, los momentos de mayor consumo energético no tienen por qué corresponder con aquellos en los que la radiación solar es más alta. De aquí radica la necesidad de acumular la energía producida para aprovechar al máximo la energía concedida por el sol y poder usarla en momentos en los que los rayos de sol sean muy débiles o incluso inexistentes. Para almacenar esta energía se suelen utilizar depósitos de almacenamiento, y en función de su forma y de las características de los materiales con los que haya sido fabricada, el calor se conservará más o menos tiempo.

Estos depósitos suelen ser cilíndricos para aprovechar el fenómeno de estratificación, que hace que el agua caliente (con menor densidad) tienda a ascender por encima de la fría. Por tanto, cuanto mayor sea la altura del depósito, mayor será la diferencia de temperatura entre la parte superior y la parte inferior del depósito.

El cálculo de la capacidad debe llevarse a cabo considerando la superficie de captación solar, ya que si el depósito fuera muy pequeño se desaprovecharía parte de la energía producida y si fuera demasiado grande en comparación con la superficie de captación, no se podrían alcanzar las temperaturas adecuadas para lograr el correcto funcionamiento de la instalación.

La elección del material del depósito es muy relevante, ya que no debe influir en la calidad del agua, y en función del material utilizado y las condiciones externas podría producirse o no corrosión. Son numerosos los materiales que pueden usarse para la fabricación de estos tanques, pero los más comunes son acero, acero inoxidable, aluminio, fibra de vidrio reforzado y plástico. Es muy importante no combinar dos materiales distintos en la instalación para evitar la formación de pares galvánicos. [15]

2.2.4. Sistema de apoyo convencional

Todas las instalaciones solares deben constar de un sistema de apoyo para poder abastecer al usuario de energía en momentos en los que la radiación solar no sea suficientemente alta como para cubrir la demanda de la instalación o en situaciones en las que la demanda sea mayor de lo prevista. Con estos sistemas de energía convencionales de apoyo se evitan las restricciones energéticas.

En instalaciones pequeñas suelen ser eléctricos, ya que la instalación de estos es barata y el consumo de gas no debe ser demasiado elevado. En instalaciones más grandes pueden usarse calderas de gas o gasóleo. Normalmente son de este segundo combustible porque cualquier instalación de gas lleva consigo muchas revisiones y controles, y si el uso no es habitual no merecerá la pena. Además estas calderas permiten adecuar fácilmente una instalación solar a la inicial, haciendo que la fuente de combustible que se tenía anteriormente se use únicamente como sistema de apoyo en ocasiones concretas.

Siempre se recomienda que estos sistemas de apoyo estén controlados por un mecanismo de control que los active automáticamente cuando sea necesario para lograr reducir al máximo el uso de combustibles fósiles. Para ello deben contar con una serie de válvulas y sondas de temperatura.

3 INSTALACIONES INDUSTRIALES CON ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

A lo largo de este tercer capítulo, se realizará un estudio de una serie de instalaciones asociadas al sector industrial que han incorporado o han instalado desde cero una planta de energía solar térmica. Se analizará el ahorro y el porcentaje de demanda que una instalación de este calibre es capaz de abastecer únicamente con energía solar. Esto permitirá conocer más de cerca las ventajas que lleva consigo integrar una planta de esta índole a un sector tan importante como es el industrial. Se ordenarán por orden de tamaño descendente para lograr que sea más sencilla la comparación de los parámetros a estudio.

3.1. Miraah Omán

En el desierto de Omán se encuentra la instalación solar dedicada a la producción de vapor más grande del mundo. En esta zona geográfica, la producción de vapor aprovechando la energía solar es muy eficiente debido a las altas temperaturas presentes durante todo el año. La empresa “Glasspoint” ha sido la encargada de dicha implantación. Esta instalación está situada junto al yacimiento petrolífero de “Amal West oilfield”, ya que el principal objetivo de esta es la extracción del crudo más pesado presente en el yacimiento mediante el método EOR (del inglés Enhanced Oil Recovery). Este método, conocido como “método de recuperación mejorada” en español, consiste en extraer el crudo remanente en el yacimiento mediante la introducción de calor en este (en este caso vapor de agua). Este vapor hace que la viscosidad del petróleo más pesado, que sería difícil extraer mediante procedimientos habituales, disminuya haciendo que este fluya más fácilmente a la superficie, favoreciendo así su extracción. Normalmente este método se suele aplicar una vez se ha extraído el crudo menos viscoso por dichos métodos convencionales, como son la gravedad, la presión natural o las técnicas de extracción artificiales habituales. [18]

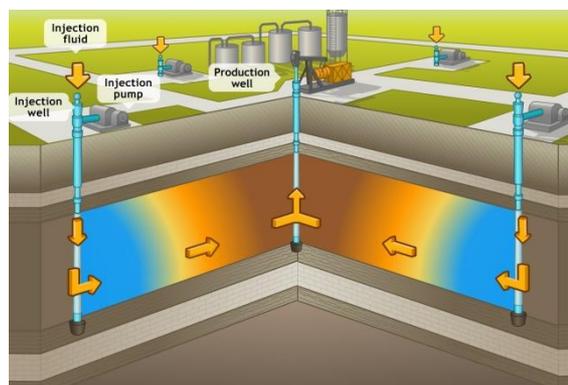


Figura 30. Extracción de petróleo por EOR (SNF)

De esta manera se ahorra parte del gas natural que se necesitaba para esta extracción pudiendo aprovecharse este en otros campos como la generación de energía eléctrica o el desarrollo industrial.

La petrolera estatal de Omán (PDO: Petroleum Development Oman) encomendó la instalación de dicha planta a la empresa americana “Glasspoint”, llegando a un acuerdo en julio de 2015. Este contrato se llevó a cabo tras el éxito de la planta piloto de 7 MW que la misma Glasspoint implantó en Amal para PDO en 2012. Esta estuvo funcionando durante más de dos años y entró dentro del presupuesto previsto. Dicha planta piloto producía 50 toneladas de vapor al día, lo que superó con creces las expectativas de PDO, verificando la fiabilidad del sistema y allanando el camino para lograr su expansión y dar fruto a lo que será la instalación solar con fines industriales más grande del

mundo. Además sirvió para mejorar el diseño y dar lugar a mejoras de construcción. [19]



Figura 31. Montaje de la planta de Miraah Omán (Glasspoint)

El proyecto usa la tecnología de concentración de energía solar, que mediante espejos curvos de gran tamaño concentra la energía solar en tubos paralelos a estos por los que circula agua. Este calor provoca que el agua hierva, produciendo vapor de agua que va a la red de distribución de vapor existente en el campo petrolífero para que los inyectores lo introduzcan dentro del campo petrolífero y así lograr la extracción del crudo. Este vapor producido con energía solar tiene la misma temperatura y presión que el vapor producido con gas natural, por lo que la calidad es idéntica.

La planta constará de 36 bloques de “invernaderos” de 6 metros de altura que albergan los espejos curvados de aluminio. Esta particularidad de la instalación hace que se reduzca la tasa de ensuciamiento en un 50% respecto a instalaciones de concentración convencionales, donde los espejos están expuestos y aproximadamente a un metro sobre el suelo. En esta zona los fuertes vientos en el desierto podrían cubrir los espejos regularmente de arena si no estuvieran situados en el interior de estos invernaderos, lo que afectaría negativamente a la instalación y a su rendimiento. Además tiene la ventaja de la implantación de las operaciones automatizadas de lavado.



Figura 32. Producción de vapor en Miraah Omán (Glasspoint)

Los espejos curvados que se encuentran en el interior de los invernaderos son de aluminio y están suspendidos con cables desde el techo. Constan de pequeños motores que tiran de los cables para ajustar la inclinación de estos a medida que el sol se mueve. Además el lavado automático que poseen reduce costes de limpieza y hace que se aprovechen y conserven mejor los recursos hídricos, que se caracterizan por no ser abundantes en este desierto.

La construcción de la planta se está llevando a cabo mediante un método secuencial, permitiendo comenzar a operar cada vez que se finaliza la construcción de un bloque, de manera que aunque actualmente no se haya terminado de construir toda la instalación se opera con los cuatro bloques que ya está instalado, el cual se terminó de construir en noviembre de 2017.

Una vez finalizada la construcción de toda la planta, la cual ocupará 3 km² de desierto omaní, el pico de salida de la instalación será de más de 1000 MW y producirá 6000 toneladas de vapor al día, lo suficiente para extraer 35000 barriles de petróleo diarios. Esto significa que la instalación permitirá ahorrar 5.6 billones de btu de gas natural anuales, con lo que se puede suministrar electricidad a unos 209000 habitantes de Omán. Esto permitirá que el país use el gas natural con otras finalidades, de manera que se diversifique la economía de la región y se creen más puestos de trabajo, además de que se evitará la emisión a la atmósfera de más de 300000 toneladas de CO₂ anuales, lo que equivale a retirar 60000 coches de las calles. Aun así, si se quisiera abastecer el yacimiento con el 100% de gas natural producido por la instalación solar, Miraah debería duplicar su tamaño.

Se prevé que se hayan construido otros ocho bloques en el año 2019. [20]

MIRA AH OMAN	
SUPERFICIE INSTALADA	210000 m ²
Nº COLECTORES	
POT. TÉRMICA	100 MWth
TIPO DE CAPTADOR	Captador Cilindro Parabólico
FABRICANTE	Glasspoint
ALMACENAMIENTO	-
PRODUCCIÓN ANUAL	210000 MWh

Tabla 5. Datos de la instalación Miraah Omán

3.2. Pampa Elvira Solar (División Gabriela Mistral)

La planta Pampa Elvira Solar, perteneciente a la división Gabriela Mistral de Codelco es una planta solar térmica de colectores planos ubicada en Chile. Esta destina la energía producida a partir del sol a satisfacer la demanda de procesos mineros intensivos mediante el uso de calor a baja temperatura. [18]



Figura 33. Vista aérea de la planta Pampa Elvira Solar (Codelco)

En el año 2008, Codelco inició los estudios previos con el objetivo de estudiar la viabilidad técnico-económica de la planta. Sólo un año después se inició la construcción de una planta piloto con 42 captadores. Tras los exitosos resultados obtenidos, a finales del año 2011 la empresa sacó a Licitación el futuro proyecto, el cual finalmente fue adjudicado al consorcio chileno-danés (Energía Llaima-Sunmark), ya que su especialidad es el diseño y desarrollo de plantas solares de dimensiones elevadas. Dicha alianza estratégica entre ambas empresas permitirá proveer a la minería de energía obtenida mediante energía solar. Además el consorcio ofreció a la División de Gabriela Mistral un servicio íntegro, ya que se haría cargo de la construcción, gestión y mantenimiento de la planta según las normativas técnicas y ambientales vigentes.

La instalación constaba en un principio de 2620 colectores de 15 m² cada uno, pero luego se llevó a cabo una ampliación del 12% debido a los exitosos resultados de la planta, dando lugar a un total de 2928 paneles provocando 44000 m² de superficie total de planta solar. La planta tiene 34 MW de potencia instalada, y produce 55000 MWh de energía al año, lo que se corresponde con el 70 % de la energía térmica requerida por la planta. Esto evita la emisión de 15000 toneladas de CO₂ al año y de otros gases efecto invernadero, reemplaza el 85% del combustible fósil (diésel en este caso) que se usaba anteriormente y evita 250 viajes de camiones que portaban combustible, lo que supone un ahorro energético y por tanto económico. Recaltar también que los colectores son un 99% reciclables.

El campo de 27.5 MWth ha llegado a alcanzar un rendimiento específico de 1112 kWh por metro cuadrado de superficie, pero al estar situada en el desierto el polvo y una mezcla de sal, arcilla y silicatos influyen negativamente en la eficiencia. La planta se construyó teniendo en cuenta la dirección predominante del viento, pero por supuesto se producen variaciones inevitables que afectan a la capacidad de absorción de energía solar al haber torbellinos de rachas superiores a 130 km/h. Este factor ha sido uno de los principales a estudio, ya que su efecto tiene una gran influencia negativa en el rendimiento de captación.

Los colectores captan la radiación y calientan una mezcla de agua y anticongelante transformando la energía solar en térmica. El fluido se distribuye a distintas temperaturas a través de los más de 3500 metros de conductos disponibles entre las distintas etapas del sistema y puntos del proceso. La planta consta además de un depósito de almacenamiento de 17 metros de alto y otros 17 metros de diámetro. Este no es más que un tanque de calor estratificado que almacena agua a distintas temperaturas y abastece de manera precisa el calor que se requiere para el proceso de electroobtención. Como apoyo a este sistema existe otro de respaldo formado por calentadores que

permitan generar energía necesaria si hubiera algún contratiempo. Por último se realiza el proceso de electroobtención del cobre. Este requiere calor a una temperatura constante de unos 50 °C en los distintos puntos de demanda. En este proceso, el electrolito que contiene el cobre en forma de sulfato de cobre (CuSO₄) previamente concentrado en un circuito de extracción por solventes, se lleva a las celdas de electroobtención (pequeñas piscinas) en cuyo interior tienen ánodos (+) y cátodo (-). En estas celdas se aplica una corriente eléctrica continua y muy baja que entra por el polo positivo (ánodo) y sale por el polo negativo (cátodo). El cobre de la solución de sulfato de cobre es atraído por la carga negativa del cátodo, depositándose en la superficie de acero inoxidable de este. [21]

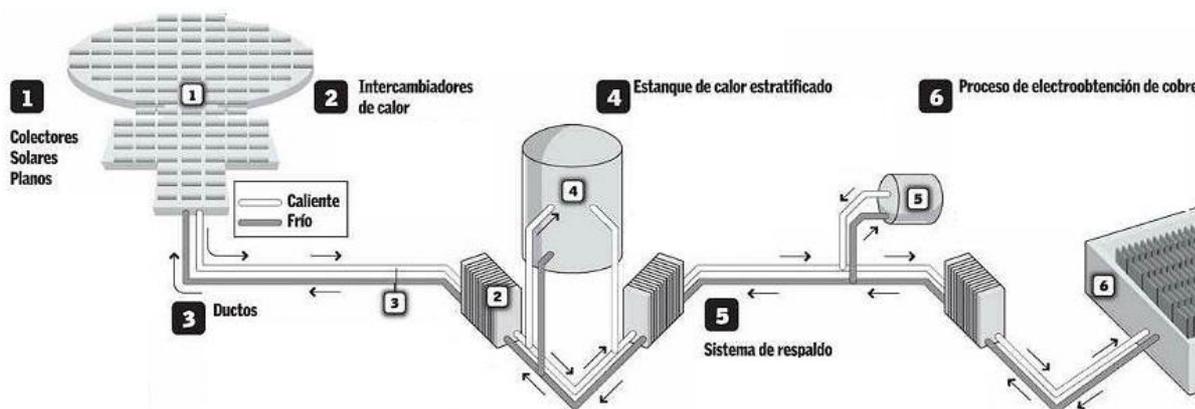


Figura 34. Proceso de electroobtención del cobre en la instalación (Codelco)

La eficiencia del proceso se puede ver afectada por una serie de factores como pueden ser la densidad de corriente, recirculación del agua, procesos de lavados de cátodo, pérdidas de calor en electrolitos o parámetros meteorológicos. [22]

Este método de obtención de energía provoca mejoras operacionales asociadas al control y a la estabilidad de la temperatura del electrolito así como en la calidad y reducción de costes de producción.

PAMPA ELVIRA SOLAR	
SUPERFICIE INSTALADA	44000 m ²
Nº COLECTORES	2928
POT. TÉRMICA	27.5 MWth
TIPO DE CAPTADOR	Captador Plano
FABRICANTE	Llaima-Sunmark
ALMACENAMIENTO	4300 m ³
PRODUCCIÓN ANUAL	51800 MWh

Tabla 6. Datos de la instalación Pampa Elvira Solar

3.3. Princess Nora Bint Abdul Rahman University in Riyadh

En enero de 2010 Millennium Energy Industries se adjudicó el proyecto de la implantación de una de las plantas de energía solar más grandes del mundo por parte de la universidad femenina de Arabia

Saudi “Princess Nora Bint Abdul Rahman“. La instalación consta actualmente de una superficie útil de 36300 m² de captadores planos dispuestos con el objetivo de calentar agua caliente para climatización e incluso para agua caliente sanitaria. Las primeras pruebas se hicieron durante el año 2010, pero no fue hasta julio de 2011 cuando la instalación diseñada por AEE Intec comenzó a funcionar. [18]

La planta se encuentra en el campus de 8 km² de la propia universidad, la cual acoge a más de 40000 usuarios, ya que consta de 15 edificios, varios laboratorios y un hospital con 700 habitaciones, por lo que la demanda de calefacción es muy alta. La potencia térmica de la planta es de 25 MWth en verano y 17 MWth en invierno, lo que hace que con la energía solar se pueda abastecer más del 80% de la demanda durante los meses de verano y el 55% en los meses de noviembre a febrero. El sistema consta de calderas de apoyo para suministrar la demanda restante.



Figura 35. Vista del campo de captadores de la Universidad de mujeres de Riyadh (Solar Thermal World)

Los 726 colectores solares instalados tienen un área de 50 m² y son del tipo GK3000. Este tipo de captadores son ideales para instalaciones solares de grandes dimensiones. La tasa de absorción de estos es del 95%. Después de los seis meses de prueba de la instalación, se colocaron además seis tanques de 150 m³ que almacenan agua caliente a 110 °C cuando hay exceso de energía solar. [21]

La planta funciona de manera que el agua caliente que sale de los captadores se impulsa por los conductos de retorno del circuito de climatización, aportando esta el calor necesario a las bombas de calor que climatizan los edificios.

Durante los 25 años de vida útil de la planta, se prevee que se ahorren unos 52 millones de litros de combustible, lo que provoca que se reduzcan las emisiones de CO₂ a la atmósfera en 125 millones de kilogramos.

PNUW SOLAR PLANT	
SUPERFICIE INSTALADA	36300 m ²
Nº COLECTORES	726
POT. TÉRMICA	25 MWth
TIPO DE CAPTADOR	Captador Plano
FABRICANTE	Greenonetec
ALMACENAMIENTO	900000 m ³
PRODUCCIÓN ANUAL	65000 MWh

Tabla 7. Datos de la instalación PNUW

3.4. Prestage Foods

La planta de energía solar que abastece “Prestage Foods” está situada en Carolina del norte (EEUU) y empezó a operar en 2012. Prestage Foods es un negocio familiar que emplea a más de 700 personas y cuyo producto principal es la venta de pavo y cerdo, situándose entre las empresas líderes de venta de estos productos durante más de 25 años. [18]

El objetivo principal de la instalación solar es la obtención de agua caliente requerida para el proceso de tratamiento de aves que serán preparadas posteriormente para el consumo humano.

La instalación opera de manera que el calor absorbido por los colectores solares se transfiere mediante el fluido de intercambio (agua en este caso) al tanque de almacenamiento mediante un intercambiador de calor. En este depósito se almacena agua caliente que servirá para calentar el agua de consumo que entra posteriormente en un tercer circuito mediante un segundo intercambiador. El agua entrante se calienta entre 21 y 38°, dependiendo del calor que hayan conseguido absorber los captadores. Esta agua final será recalentada por una caldera para lograr que esté a los 60° que necesita el proceso para llevar a cabo el tratamiento y proceso de limpieza de las aves.

Además, FLS ha acoplado un tanque con agua caliente en buenas condiciones sanitarias a través del cual pasan las aves antes de ser procesadas.



Figura 36. Vista aérea de la planta de Prestage Foods (Prestage Farms)

La planta de energía termo solar se construyó en tres fases, constando cada una de ella de 700 paneles. Las dos primeras fases se finalizaron en 2011 y la tercera en 2012, año en el que empezó a operar. El proyecto fue desarrollado por la FLS Energy, una de las empresas líderes del país en servicios solares. Consta de 2100 paneles planos que logran que el área de captación sea de 7804 m². Es la propia empresa FLS quien opera la instalación y vende a Prestige la energía que necesita para calentar los casi 380000 litros de agua al día repartidos en diez tanques. La producción térmica anual es de 26.6 billones de BTU. [21]



Figura 37. Colectores de la planta de Prestage Foods (Prestage Farms)

PRESTAGE FOODS	
SUPERFICIE INSTALADA	7804 m ²
Nº COLECTORES	2100
POT. TÉRMICA	5463 KWth
TIPO DE CAPTADOR	Captador Plano
FABRICANTE	FLS Energy
ALMACENAMIENTO	946 m ³
PRODUCCIÓN ANUAL	7796.7 MWh

Tabla 8. Datos de la instalación Prestage Foods

3.5. La Parreña de Peñoles (Copper Mine)

La instalación solar de La Parreña de Peñoles está ubicada en La Parreña y es sólo una de las minas del grupo Peñoles, el cual es la segunda compañía minera más grande de México. Fue fundada en 1887 y se dedica principalmente a fundición y refinación de metales no ferrosos para obtener productos químicos. La mina de La Parreña es fundamentalmente una mina de cobre, por lo que necesita grandes cantidades de calor para procesos implicados en la minería y extracción del mismo. Fue el éxito de la implantación de la instalación de energía solar en la mina Gabriela Mistral de Chile, citada anteriormente, la que hizo que Peñoles se planteara la instalación de una planta de tecnología similar. [18]

La empresa danesa *Arcon-Sunmark* fue la encargada de dicha implantación, ya que es una de las compañías más destacadas en el ámbito de la energía solar. La instalación fue terminada y puesta en marcha en septiembre de 2016.

La instalación consta de 456 colectores solares teniendo un total de 6270 m² de captación. Tiene además un depósito de almacenamiento de 660000 litros (660 m³) destinado al almacenamiento del calor excedente para que pueda ser utilizado en otro momento. El campo solar cubre 58% de la energía total requerida para los procesos de extracción de cobre, lo que conlleva una considerable reducción de costes energéticos y de emisiones de CO₂ al necesitarse menos combustible.



Figura 39. Vista aérea de la planta de La Parreña (Arcon-Sunmark)



Figura 38. Captadores de la planta solar de La Parreña (Arcon-Sunmark)

La instalación tiene un periodo período de retorno de tan sólo 4 años y una vida útil de 25 años, por lo que durante 21 años la empresa se beneficiará de energía solar sin coste alguno.

Tras el éxito del proyecto, la empresa tiene prevista la construcción de un parque eólico de 199500 KW destinado a la producción energética para abastecer la planta. Al finalizarse será el mayor parque eólico de la industria minera hasta la fecha.

La energía solar como fuente de energía dentro de la industria minera tiene un gran futuro debido a los beneficios económicos y ambientales que implica, por lo que se espera que cada vez sean más las industrias que acoplen este tipo de plantas a sus instalaciones. [21]

LA PARREÑA	
SUPERFICIE INSTALADA	6270 m ²
Nº COLECTORES	456
POT. TÉRMICA	4400 KWth
TIPO DE CAPTADOR	Captador Plano
FABRICANTE	Arcon-Sunmark
ALMACENAMIENTO	660 m ³
PRODUCCIÓN ANUAL	8600 MWh

Tabla 9. Datos de la instalación La Parreña

3.6. Estadio piloto para la copa del mundo (FIFA)

En el año 2010 Qatar propuso su candidatura para ser anfitrión de la copa del mundo de 2022 y finalmente lo consiguió. Su propuesta llevaba incorporada una serie de estadios y edificios a los que

se le habían incorporado mecanismos para uso de energías renovables, y concretamente, energía solar. El objetivo sería priorizar el uso de energías limpias para reducir las emisiones en un evento tal como la copa del mundo, en la que se espera la llegada de más de tres millones de personas. Todos los estadios utilizarán energías renovables o de bajo consumo siempre que sea necesario. [18]



Figura 40. Planta piloto para la copa del mundo de fútbol 2022 (Solar Thermal World)

La instalación de tipo Fresnel está situada en Doha (Qatar) y empezó a operar en septiembre de 2010, únicamente cinco meses más tardes de que le fuera adjudicado el proyecto a la empresa. Tiene una superficie total de 1400 m^2 y su objetivo proporcionar calor a una enfriadora destinada a la climatización del estadio piloto, el cual tiene una capacidad de 500 personas. El proyecto nació como un reto para la empresa que se ha encargado de su montaje, Mirroxx GmbH, ya que es su proyecto más grande hasta la fecha. Debe paliar las altas temperaturas que se darán en el país durante el tiempo que dure el mundial.

El sistema consta de once espejos de cuatro metros de largo y ocho metros de ancho. La instalación solar puede proporcionar temperaturas de hasta $400 \text{ }^\circ\text{C}$, y está diseñada para generar una potencia de 790 kWth . Los espejos son de placa plana y constan de seguimiento en un único eje, existiendo once espejos de cuatro metros de largo y ocho metros de ancho. Estos concentran la radiación solar en alguno de los 70 tubos absorbedores presurizados a 16 bares, a los que se les ha hecho el vacío para lograr reducir las pérdidas por convección y radiación. Los espejos son de vidrio blanco templado y llevan encima un reflector de aluminio pulido, lo que consigue una eficiencia óptica del 62 %.

Cada una de las filas dispone de un motor de 7 W que permite el seguimiento de la trayectoria del sol.

La instalación dispone también de un volumen de almacenamiento de 40 m^3 bajo la cubierta para utilizar la energía térmica por la noche o en días menos soleados. [23]

La tecnología Fresnel de dicha empresa fue lanzada hace cinco años como un spin-off del instituto Fraunhofer de Sistemas de Energía Solar y la instalación de Qatar ha servido para demostrar la



Figura 41. Vista aérea de la planta piloto de la FIFA (Solar Thermal World)

viabilidad de un proyecto de este calibre, que combinan estética e ingeniería para lograr la implantación de la energía solar en edificios nuevos.

FIFA STADIUM	
SUPERFICIE INSTALADA	2000 m ²
Nº COLECTORES	42
POT. TÉRMICA	790 KWth
TIPO DE CAPTADOR	Captador tipo Fresnel
FABRICANTE	Mirroxx GmbH
ALMACENAMIENTO	40 m ³
PRODUCCIÓN ANUAL	

Tabla 10. Datos de la instalación FIFA Stadium

3.7. Honeywell technology solutions

La planta solar de Honeywell Technology Solutions, la cual es la subsidiaria de la estadounidense Honeywell, está ubicada en Hyderabad (India) y está operando desde el año 2013. El principal objetivo de esta instalación sería reducir el consumo eléctrico destinado a iluminación y climatización, ya que este gasto representaba más de la mitad del consumo eléctrico total en las industrias de la India, ya que estaban afectadas por unas tarifas muy altas. [18]

Esta planta piloto de 823 m² de extensión está operativa desde el año 2013 y fue instalada por el fabricante indio Thermax. Funciona de tal manera que la enfriadora, la cual está conectada a los captadores solares, logra refrigerar a partir del agua de salida de los colectores a casi 170 °C por medio de aire a unos 22 °C durante aproximadamente seis meses al año.

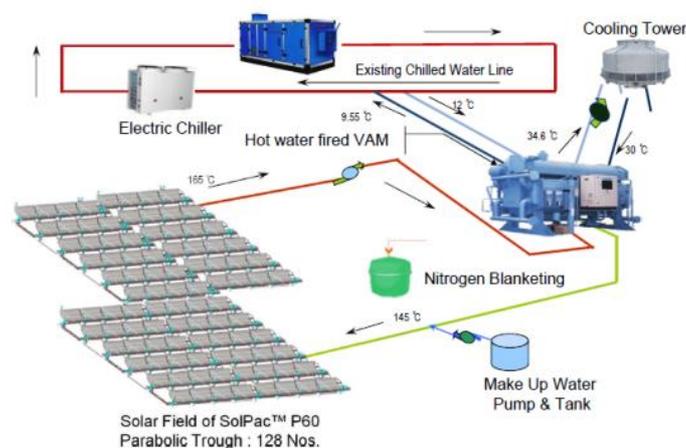


Figura 42. Diagrama del enfriamiento térmico (Honeywell)

El área de captación está formada por 128 colectores de tipo cilindro parabólicos de 6.41 m² cada uno. En los meses lluviosos de invierno los captadores se giran para evitar daños.

Actualmente la planta está funcionando con una eficiencia del 90 % considerando una irradiancia máxima, y aunque actualmente sólo se trate de un proyecto piloto se prevee hacer de esto una

instalación de gran envergadura a pesar de que el periodo de recuperación es bastante alto. Únicamente en los cinco años que lleva operativa la planta se han ahorrado más de 1.5 millones de kWh. [24]



Figura 43. Vista aérea de la planta solar de Honeywell (Honeywell)

HONEYWELL TECHNOLOGY SOLUTIONS	
SUPERFICIE INSTALADA	823 m ²
Nº COLECTORES	128
POT. TÉRMICA	700 KWth
TIPO DE CAPTADOR	Captador cilindro parabólico
FABRICANTE	Thermax
ALMACENAMIENTO	0
PRODUCCIÓN ANUAL	218.61 MWh

Tabla 11. Datos de la instalación Honeywell

3.8. Captador Fresnel de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla

En la cubierta del edificio de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla se ubica una instalación de captación solar tipo Fresnel de 480 m² de extensión y 352 m² de superficie reflectora. Dicha instalación es una planta piloto experimental fabricada por la compañía alemana Industrial Solar GmbH para refrigeración mediante radiación solar, la cual recibe apoyo de una caldera de gas natural. Fue puesta en marcha en 2008. [18]

El objetivo de la planta es calentar agua para introducirla posteriormente en una máquina de absorción, la cual producirá frío. La instalación está orientada hacia el sur pero tiene una leve desviación de unos 12 ° hacia el oeste provocada por limitaciones de espacio.



Figura 44. Captador Fresnel de la ESI Sevilla (Bibing)

La instalación consta únicamente de un tubo receptor de 64 metros de longitud ubicado encima de los espejos a una altura de 4 metros. Este tubo se encuentra rodeado por una cubierta de vidrio que logra el vacío. Este concentrador consta además de un receptor secundario cuyo objetivo es aprovechar mejor la radiación procedente de los espejos aumentando la eficiencia óptica del sistema y sirviendo como protector sobre el tubo receptor.

El sistema consta de 176 reflectores de vidrio dispuestos en 11 filas de espejos de 4 metros cada uno. Tienen una reflectividad de 0.92 y una relación de concentración de 25.

La estructura de la instalación es de acero y posee un seguimiento en un solo eje para aprovechar al máximo la radiación solar. Cada mecanismo de arrastre mueve 8 espejos, por lo que consta de 22 mecanismos. [17]

CAPTADOR FRESNEL ESI SEVILLA

SUPERFICIE INSTALADA	352 m ²
Nº COLECTORES	176
POT. TÉRMICA	198 KWth
TIPO DE CAPTADOR	Captador tipo Fresnel
FABRICANTE	Industrial Solar GmbH
ALMACENAMIENTO	0
PRODUCCIÓN ANUAL	218.61 MWh

Tabla 12. Datos de la instalación Fresnel ESI Sevilla

3.9. L'Oreal Pune

La industria cosmética L'Oreal Pune (India) ha apostado por la implantación de energías renovables desde sus inicios en el año 2004. En 2007 se instalaron paneles solares, los cuales han permitido reducir las emisiones de CO₂ en 93 toneladas al año mediante la implantación de uno de los sistemas de calentamiento solar de agua más grandes de la India. [18]



Figura 45. Captadores de la planta de L'Oreal en Pune (L'Oreal)

La instalación tiene una extensión de 970 m² y 640 m² de superficie reflectora ubicados en dos cubiertas de la fábrica. Está formada por 320 captadores planos por los que circula agua, la cual se usa para precalentar unos 32 m³ diarios de agua para la limpieza de los recipientes de la planta, reduciendo en un 7% el consumo total de energía de la industria. [21]

Fue la empresa india Racold Solar la encargada del diseño y la implantación de la planta solar.

Existen cuatro depósitos de 2000 litros de almacenamiento y un tanque principal de 32000 litros destinados al almacenamiento de agua caliente. Además la industria consta de una caldera de gas natural para paliar los días menos soleados, la cual antes de la construcción del campo solar, era de diesel. Desde la instalación se han ahorrado más de 170 litros de diesel diarios, lo que en cinco años hace un total de 210800 litros, es decir unos 240000 euros. Estos ahorros han hecho que el periodo de recuperación del capital se haya recuperado en el cuarto año.

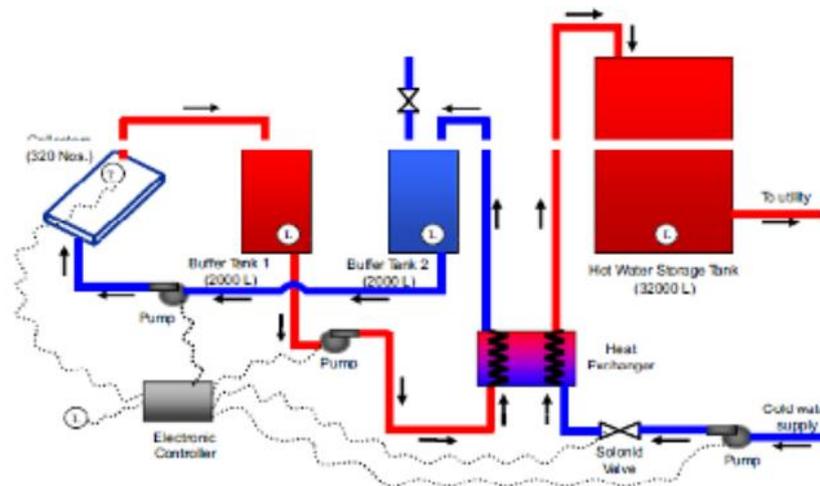


Figura 46. Esquema de la instalación de la planta de L'Oreal en Pune (L'Oreal)

Esta empresa es una de las que más ha invertido en energías renovables y en eficiencia energética a nivel mundial, sirviendo como ejemplo a otras grandes industrias para afrontar problemas ambientales mediante energías renovables. [25]

L'OREAL PUNE

SUPERFICIE INSTALADA	640 m ²
Nº COLECTORES	320
POT. TÉRMICA	448 KWth
TIPO DE CAPTADOR	Captador Plano
FABRICANTE	Racold Solar
ALMACENAMIENTO	32 m ³
PRODUCCIÓN ANUAL	218.61 MWh

Tabla 13. Datos de la instalación L'Oreal Pune

4. ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE INSTALACIONES SOLARES INDUSTRIALES

La energía solar es actualmente una de las energías renovables en vías de desarrollo. Por este motivo son constantes los análisis y estudios centrados en mejorar la eficiencia de cualquier tipo de instalación intentando adaptarlas al medio en el que se encuentran lo máximo posible.

El objetivo de este cuarto apartado del trabajo es relacionar los distintos modelos expuestos previamente entre sí a través de una serie de ratios y parámetros. Este tipo de análisis son los que permiten innovar en nuevas instalaciones como es el caso de la planta de Miraah, que ha incorporado “invernaderos” en cuyo interior ha colocado los colectores para eliminar las pérdidas por ensuciamiento que se dan en zonas desérticas como es el caso de Omán.

4.1. Parámetro 1: Potencia / Superficie

La comparación de dos de los parámetros más importantes de una instalación, como son la potencia térmica y la superficie de colectores instaladas (es decir, la superficie real de captación), permiten demostrar la “eficiencia” de la instalación.

Los datos obtenidos a partir de los recogidos en el punto anterior son los siguientes:

POTENCIA TÉRMICA / SUPERFICIE [$\text{kW}_{\text{th}}/\text{m}^2$]	
1. MIRAAB OMÁN	0,476
2. PAMPA ELVIRA SOLAR	0,689
3. PNUW	0,625
4. PRESTAGE FOODS	0,700
5. LA PARREÑA DE PEÑOLES	0,702
6. FIFA	0,395
7. HONEYWELL	0,851
8. ESI	0,563
9. L'OREAL PUNE	0,700

Tabla 14. Parámetro Potencia-Superficie

El promedio de las diez plantas solares analizadas previamente es de 0,63, siendo la planta de la FIFA la que presenta la menor producción de potencia por unidad de superficie, seguido por la planta de Miraah y por la de la escuela. Estas tres instalaciones coinciden, en que junto a la Planta de Tabernas, son las únicas que no usan captadores planos para recibir la radiación solar, por lo que se procederá a analizar los sistemas solares con concentración y sin concentración de manera independiente.

- **Sistemas solares con concentración:** este tipo de tecnología concentra la radiación solar en un único punto mediante una correcta orientación de los paneles solares. Las instalaciones

objeto de estudio que concentran la energía solar son:

- Miraah Omán: tecnología Fresnel
- FIFA: tecnología Fresnel
- Honeywell: cilindro parabólico
- ESI: tecnología Fresnel

En el gráfico inferior se puede visualizar de una manera muy intuitiva el valor de este primer parámetro para el caso de las instalaciones solares con concentración descritas anteriormente.

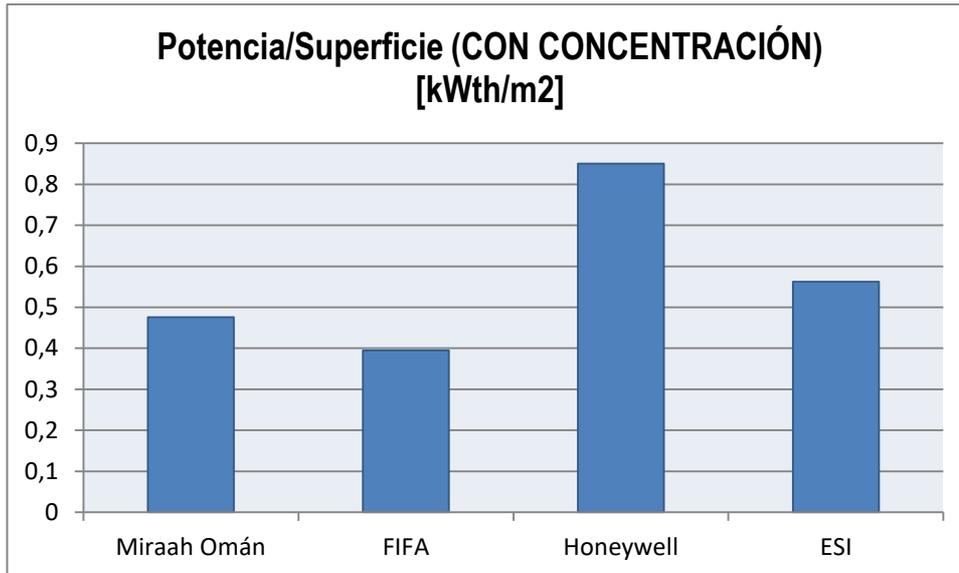


Figura 47. Representación del parámetro Potencia-Superficie para sistemas con concentración

Tal y como se citó previamente, es la instalación de la FIFA la que tiene un menor parámetro potencia-superficie. Posiblemente el motivo de esto será que dicha planta se trata de una planta piloto y que actualmente sirve como prueba, por lo que aun quedarían detalles y factores por mejorar, algo que se tendrá en cuenta para la instalación del campo solar definitivo.

- **Sistemas solares sin concentración:** este tipo de tecnología no concentra la radiación solar, si no que calienta un fluido de trabajo que sirve de transmisor de la energía. Las instalaciones objeto de estudio que no concentran energía son las siguientes:
 - Pampa Elvira Solar: captador plano
 - PNUW: captador plano
 - Prestage Foods: captador plano
 - Parreña de Peñoles: captador plano
 - L'Oreal Pune: captador plano

A continuación, en la Figura 50 se visualiza de manera idéntica al caso anterior el parámetro relativo a la relación de potencia-superficie en plantas solares sin concentración, cuyos valores son mayores que aquellos que sí concentran la energía solar.

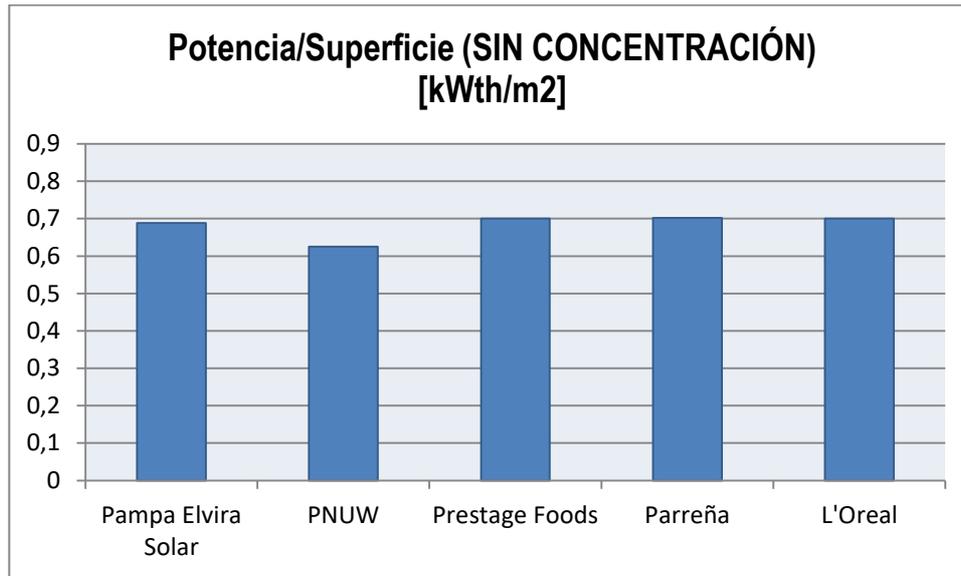


Figura 48. Representación del parámetro Potencia-Superficie para sistemas sin concentración

En los sistemas que no concentran la energía solar, la media de dicho parámetro tiene un valor de 0,68, mientras que en aquellas instalaciones que sí la concentran es de 0,57. Esto coincide con la información recogida a lo largo del estudio, ya que los captadores planos son muy versátiles y generalmente proporcionan al cliente una gran seguridad a la hora de incorporarlos a una instalación nueva o ya implantada.

Por tanto, se concluye afirmando que, por norma general, se necesitaría menos superficie para obtener la misma potencia en sistemas solares que no concentran la energía solar, concretamente mediante el uso de captadores planos.

4.2. Parámetro 2: Volumen acumulación / Superficie

De las diez plantas llevadas a estudio, únicamente seis disponen de depósitos de almacenamiento para acumular energía producida y poder usarla cuando la radiación solar sea muy baja o inexistente. Como se citó previamente, la capacidad de el o los depósitos debe llevarse a cabo teniendo en cuenta la superficie de captación, ya que sobredimensionar un depósito o minimizarlo conllevaría pérdidas energéticas, lo que se traduciría en pérdidas económicas.

VOLUMEN DE ACUMULACIÓN / SUPERFICIE[m ³ /m ²]	
1. MIRAAB OMÁN	0
2. PAMPA ELVIRA SOLAR	0,248
3. PNUW	0,098
4. PRESTAGE FOODS	0,121
5. LA PARREÑA DE PEÑOLES	0,105
6. FIFA	0,020
7. HONEYWELL	0
8. ESI	0
9. L'OREAL PUNE	0,050

Tabla 15. Parámetro Volumen de acumulación-Superficie

El promedio de este segundo parámetro, teniendo en cuenta únicamente aquellas instalaciones que tienen acumulación, es de 0,107, valor muy similar al de la minera de Copper Mines.

Además todas las instalaciones tienen en común que almacenan el fluido de trabajo en los acumuladores de la misma manera. Como se puede observar en la Figura 49, la acumulación de la universidad de Arabia Saudí está muy por encima de la media, y destaca por la gran cantidad de acumulación con respecto a la superficie. Esto es debido a que el fin de la energía térmica obtenida por los captadores solares, es tanto para calefacción como para agua caliente sanitaria y debe abastecer a una gran cantidad de edificios diferentes repartidos por el campus. Sin embargo, todas las demás tienen una relación volumen de acumulación–superficie relativamente similar.

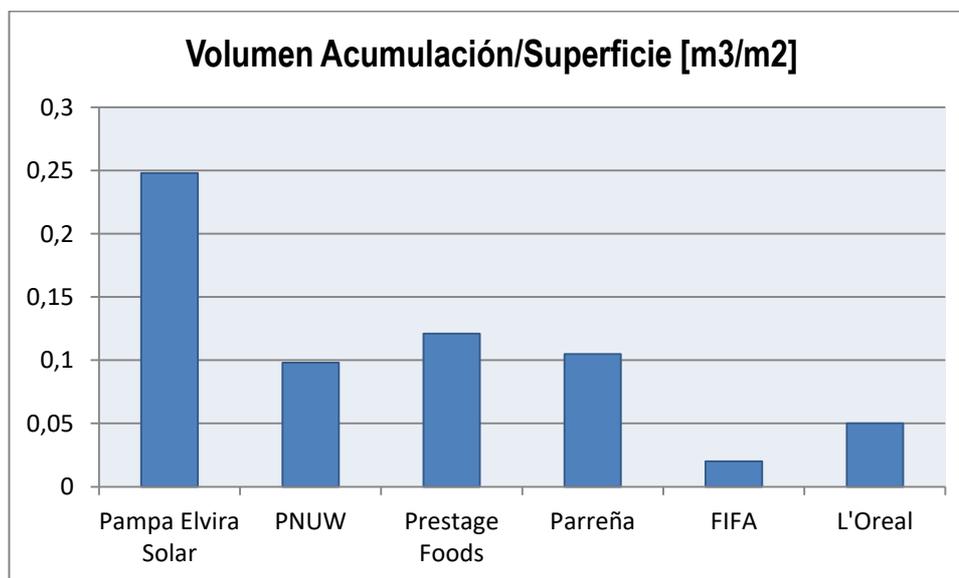


Figura 49. Representación del parámetro Volumen de acumulación-Superficie

Por último, se debe recalcar que el valor de este segundo parámetro para la planta de la FIFA es también el más pequeño con una notable diferencia. Esto podría ser debido de nuevo a la índole de esta planta solar (planta piloto) y a su ubicación, ya que se ubica en una zona donde hay sol

prácticamente todo el día por lo que la necesidad de acumulación no es muy elevada.

4.3. Parámetro 3: Producción anual / Potencia

Para el estudio de este tercer parámetro se considera la potencia anual de las instalaciones y la potencia térmica de cada una. Únicamente hay dos plantas (FIFA y ESI Sevilla) de las que no se han podido obtener datos de la producción anual, por lo que no serán consideradas.

Este parámetro permite relacionar el número de horas que trabaja la planta en función de las necesidades. Por este motivo, los resultados obtenidos se encuentran dentro del ratio esperado, ya que son las plantas más grandes como la de Miraah Omán y la situada en la universidad las que tienen una mayor demanda, y por tanto las que trabajarán un mayor número de horas.

PRODUCCIÓN ANUAL / POTENCIA [MWh/kW _{th}]	
1. MIRAHAH OMÁN	2,1
2. PAMPA ELVIRA SOLAR	2,6
3. PNUW	1,88
4. PRESTAGE FOODS	1,43
5. LA PARREÑA DE PEÑOLES	1,95
6. FIFA	-
7. PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA	0,24
8. HONEYWELL	0,31
9. ESI	-
10. L'OREAL PUNE	0,49

Tabla 16. Parámetro Producción Anual-Potencia

En la figura inferior, se muestra un diagrama de barras en la que se exhibe la gran diferencia de horas de trabajo entre instalaciones enormes y otras de mucho menor tamaño, referido tanto a potencia como a superficie.

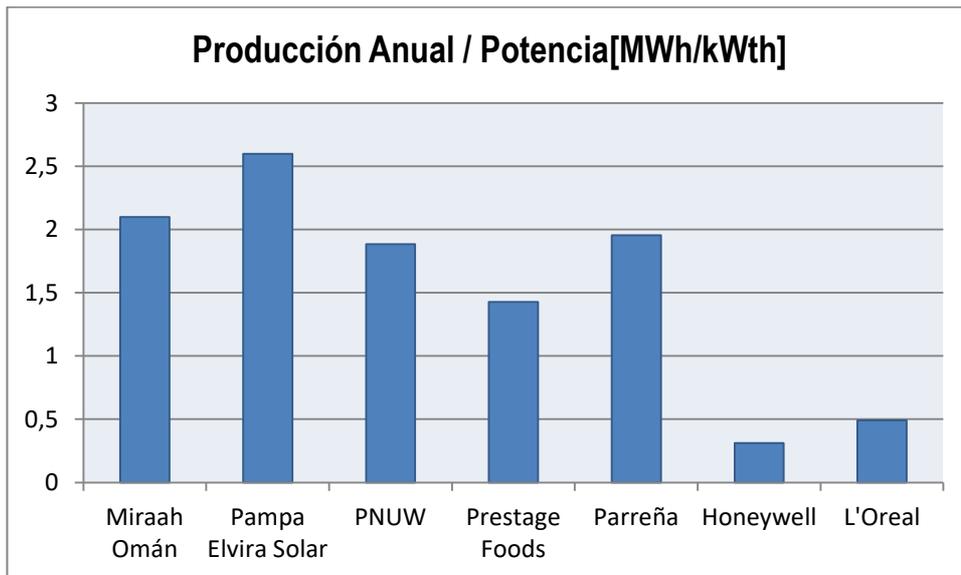


Figura 50. Representación del parámetro Producción Anual-Potencia

Las instalaciones solares de Honeywell y L'Oreal, ambas ubicadas en la India, son por tanto las que tendrían un menor valor de este parámetro. Esto es debido fundamentalmente a las horas de funcionamiento de la planta. Estos tiempos podrían estar condicionados por la ubicación de la planta.

5. CONCLUSIONES

La energía solar térmica ha sufrido un enorme desarrollo en los últimos años promovido, fundamentalmente, por una gran cantidad de políticas públicas. Además, la versatilidad de instalaciones de esta índole ha hecho que el progreso haya sido muy rápido.

Como se ha citado anteriormente, cada vez son más las industrias que intentan acoplar una instalación solar de este tipo para ahorrar combustibles, reducir residuos y emisiones y obteniendo una rentabilidad para el propio cliente, ya que las plantas de esta índole apenas tienen mantenimiento. Para ello se precisa del análisis termoeconómico previo.

Las temperaturas que se pueden alcanzar con la energía solar aún tienen limitaciones, pero como se ha explicado, tan solo en España el 94% de las industrias implantadas podrían obtener al menos parte de la energía necesaria con la procedente de los rayos de Sol, ya que sólo el 6 % precisa de temperaturas por encima de 250 °C. En el resto del mundo se podrían abastecer el 59% de las industrias con este tipo de energía, dato que también es muy atractivo.

Con los datos previamente citados y tras el análisis de las diez instalaciones expuestas anteriormente repartidas por todo el mundo, se pueden llegar a una serie de conclusiones:

- Fue a partir de los años 90, cuando el precio de los combustibles fósiles empezó a oscilar irregularmente de nuevo. Esto unido a la concienciación de la sociedad y a la mayor posibilidad de adquisición de recursos hizo que se comenzara a emplear más recursos por lograr el desarrollo de esta.
- Actualmente son los captadores planos los que han tolerado mejor el desarrollo de este tipo de energía renovable. Por norma general son los más versátiles y los que proporcionan más seguridad al cliente a la hora de plantearse la implantación de una instalación de energía solar con fines industriales.
- La mayoría de instalaciones industriales disponen de depósitos de acumulación, ya que permiten almacenar energía solar térmica que pueda usarse cuando la demanda sea mayor que la producción y que evita que se desaproveche energía. Aun así, no todas constan de esto, ya que también depende de la finalidad que tenga la planta; por ejemplo, las plantas destinadas a generación de vapor no suelen contar con depósitos de acumulación, si no que en el caso de que tuvieran estos se usaría como depósitos de inercia para calentar a algún otro circuito desde el que finalmente se obtendrá vapor. La decisión de si la instalación constará o no de acumulación condiciona en gran medida el diseño del área de captación de la planta solar.
- La relevancia de la ubicación de los campos solares también queda demostrada. Las instalaciones analizadas se encuentran ubicadas en espacios amplios en los que se da un clima cálido. Es cierto que también existen instalaciones de esta índole situadas en zonas nórdicas, aunque la potencia generada por estas últimas es menor.
- El análisis termoeconómico inicial de instalaciones solares con fines industriales es fundamental y prácticamente imprescindible. Estos análisis son los que plantearán los contratiempos, ventajas e inconvenientes que se pueden presentar durante el diseño, la

ejecución y la explotación de proyectos de esta índole. Principalmente se analizará la ubicación, necesidades de potencia y viabilidad técnica, económica y legal. De esta manera se generarán soluciones adaptadas a cada instalación, como puede ser el acoplamiento de “invernaderos” en los paneles de la planta de Miraah Omán, la cual está ubicada en el desierto y evitará en gran parte ensuciamiento.

- En cuanto a los parámetros estudiados, se observa que el que mayor regularidad posee sería la potencia térmica de la planta en función de la superficie. Esto demuestra que actualmente la tecnología que lidera los sistemas de captación está muy igualada y no existen muchas discrepancias entre distintos tipos de captadores. Esto exhibe por tanto que sería uno de los campos en los que se debería invertir para conseguir mejorar su eficiencia y lograr aumentar la capacidad de la planta empleando menos superficie.

REFERENCIAS

- [1] «BP Statistical Review of World Energy 2017,» BP, 13 Julio 2017. [En línea]. Available: https://www.bp.com/es_es/spain/prensa/notas-de-prensa/2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017.html. [Último acceso: 11 Agosto 2018].
- [2] «IDAE,» Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2017. [En línea]. Available: www.idae.es. [Último acceso: 14 Agosto 2018].
- [3] A. B. Colombo, «La Energía Solar Térmica,» 2013. [En línea]. Available: https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/4252/Solar_Thermal_Energy_SPA_final.pdf?sequence=2. [Último acceso: 15 Agosto 2018].
- [4] I. L. Bravo, de *Instalaciones Fotovoltaicas*, Sevilla, 2016, pp. 4-53.
- [5] M. A. S. Pérez, *Sistemas termosolares de concentración*, Sevilla, 2012.
- [6] A. R. L. Martínez, *Historia de la Energía Termosolar*, Renovetec.
- [7] «OCDE,» Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, [En línea]. Available: www.oecd.org. [Último acceso: 24 Agosto 2018].
- [8] H. Schweiger, «Evaluación del potencial de la energía solar térmica en el sector industrial,» 2011.
- [9] IDAE, «Área Tecnológica: Energía Solar Térmica,» Madrid, 2012.
- [10] C. Vannoni, R. Battisti y S. Drigo, «Potential for Solar Heat in Industrial Processes,» Roma, 2008.
- [11] «Agencia Andaluza de la Energía,» [En línea]. Available: www.agenciaandaluzadelaenergia.es. [Último acceso: 29 10 2018].
- [12] ESTIF, «Solar Industrial Process Heat. State of the Art,» 2006.
- [13] N. Cottret, «Solar Heat for Industrial Process,» 2014.
- [14] F. Cortés, C. Murray, I. Muñoz y W. Platzer, «Estudios de Tecnología Solar Térmica para Producción de Calor en la Industria,» Santiago de Chile, 2016.
- [15] IDAE, «Energía Solar Térmica,» Madrid, 2006.
- [16] J. J. G. Macho, «Apuntes Energía Solar 4º GITI. Elementos de un captador solar plano,» Sevilla, 2016.
- [17] «Captador Solar Fresnel,» Escuela de Ingenieros (Universidad de Sevilla), Sevilla.
- [18] «Solar Heat for Industrial Processes,» [En línea]. Available: <http://ship-plants.info/>. [Último acceso: Agosto 2018].

- [19] «PDO,» [En línea]. Available: www.pdo.co.om. [Último acceso: 11 Agosto 2018].
- [20] «Power Technology,» [En línea]. Available: www.power-technology.com. [Último acceso: 11 Agosto 2018].
- [21] «Solar Thermal World,» [En línea]. Available: www.solarthermalworld.org. [Último acceso: 2 Septiembre 2018].
- [22] «Ser Chile,» [En línea]. Available: www.sercchile.cl. [Último acceso: 13 Agosto 2018].
- [23] «Gulf Time,» [En línea]. Available: www.gulf-time.com. [Último acceso: 6 Octubre 2018].
- [24] «Honeywell,» [En línea]. Available: www.honeywell.com. [Último acceso: 6 Agosto 2018].
- [25] «L'Oreal,» [En línea]. Available: www.loreal.co.in. [Último acceso: 16 Septiembre 2018].
- [26] Autor, «Este es el ejemplo de una cita,» *Tesis Doctoral*, vol. 2, n° 13, 2012.
- [27] O. Autor, «Otra cita distinta,» *revista*, p. 12, 2001.
- [28] «Plataforma Solar de Almería,» Ministerio de Ciencias, Innovación y Universidades, [En línea]. Available: www.psa.es. [Último acceso: 6 Septiembre 2018].