LA TECNOLOGÍA CSP FRESNEL

EL ESTADO DE LA TECNOLOGÍA Y UNA VISIÓN GENERAL DEL MERCADO

Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Por encargo de:
Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania

Ministerio de Energía Gobierno de Chile

LA TECNOLOGÍA CSP FRESNEL - EL ESTADO DE LA TECNOLOGÍA Y UNA VISIÓN GENERAL DEL MERCADO

La Tecnología CSP Fresnel

EL ESTADO DE LA TECNOLOGÍA Y UNA VISIÓN GENERAL DEL MERCADO

Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Por encargo de:
Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania

Ministerio de Energía Gobierno de Chile

La Tecnología CSP Fresnel

EL ESTADO DE LA TECNOLOGÍA Y UNA VISIÓN GENERAL DEL MERCADO

Edición:
Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Signatura del proyecto a cargo:
Fomento de la Energía Solar en Chile
(Enfoque en Tecnologías de Concentración Solar)

Marchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
T +56 22 30 68 600
I www.giz.de

Responsable:
Rainer Schröer
E rainer.schroeer@giz.de

En coordinación:
Ministerio de Energía de Chile
Alameda 1449, Pisos 13 y 14, Edificio Santiago Centro II
Santiago de Chile
T +56 22 367 3000
I www.minenergia.cl

Título:
La Tecnología CSP Fresnel

Autores:
Dr. Andreas Häberle, Michael Berger,
Stephan Scherer, Johannes Farian
PSE AG
Emmy-Noether Str. 2
D- 79110 Freiburg
T +49 761 479 140
M info@pse.de
I www.pse.de

Aclaración:
El contenido de este informe está basado en un estudio elaborado por la GIZ Brasil, adoptado al contexto chileno.
Esta publicación ha sido preparada por encargo del proyecto "Fomento de la Energía Solar" implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania. El proyecto se financia a través de la Iniciativa Alemana de Tecnología para la mejora del Clima (DKTI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Publicas y Seguridad Nuclear (BMUB). Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ.

Santiago de Chile, 10.2014

La Tecnología CSP Fresnel

EL ESTADO DE LA TECNOLOGÍA Y UNA VISIÓN GENERAL DEL MERCADO

Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Por encargo de:

Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania

Ministerio de Energía
Gobierno de Chile

Índice

1. RESUMEN 7

2. ¿QUÉ SON LOS COLECTORES LINEALES FRESNEL? 8

2.1. Introducción a los Colectores Lineales Fresnel 8
2.2. Desarrollo Histórico 9
2.3. Diseño de los Reflectores Lineales Fresnel 10
2.4. Geometría y Área de Referencia 12
2.5. Eficiencia óptica 13
2.6. Eficiencia Térmica 14
2.7. Generación Térmica Bruta 14
2.8. Generación Térmica Neta 15
2.9. Beneficios y Desventajas de los Colectores Fresnel 15
2.9.1. Valores típicos de rendimiento 16

3. SITUACIÓN DEL MERCADO 17

3.1. Mercados de Destino 17
3.1.1. Generación de energía eléctrica a gran escala 17
3.1.2. Calor para procesos industriales 18
3.2. Datos financieros 19
3.2.1. Ejemplos de construcción 19
3.2.2. Comparación económica con los colectores parabólicos 19

4. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA 20

4.1. Bases 20
4.2. Estructura de Soporte 21
4.3. Unidad de Seguimiento 21
4.4. Unidad de Control 22
4.5. Espejos Primarios 22

4.5.1. Reflectores de los espejos primarios 22
4.5.2. Estructura trasera de los espejos primarios 22
4.6. Receptor 23
4.6.1. Absorbedor 23
4.6.2. Reflector secundario 23
4.6.3. Fluido de transferencia de calor 23

5. PERFILES DE EMPRESAS 24

5.1. Empresas desarrolladoras de tecnología Fresnel 24
5.1.1. Areva Solar 25
5.1.2. Novatec Solar 26
5.1.3. Industrial Solar 27
5.1.4. CNIM 28
5.1.5. Solar Euromed SAS 29
5.1.6. Feranova 30
5.1.7. Soltigua 31
M+W Group 33
Fichtner Solar GmbH 33

6. TENDENCIAS DEL DESARROLLO TECNOLÓGICO 34

6.1. Componentes para Colectores 34
6.1.1. Bases 34
6.1.2. Estructura de soporte 34
6.1.3. Unidad de seguimiento 35
6.1.4. Unidad de control 35
6.1.5. Espejos primarios 35
6.1.6. Receptor 36
6.2. Diseño de los Colectores 37
6.3. Conceptos del sistema 38
6.3.1. Fluido de transferencia de calor 38

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

6.3.2. Almacenamiento 39
6.3.3. Operación 39
6.3.4. Conceptos del sistema para la generación de energía eléctrica 39
6.3.5. Estandarización del concepto del sistema para el calor de procesos 39
6.4. Costos Marginales a largo plazo 39
6.5. Daños por Suciedad y Costos de Limpieza 39
6.5.1. Impacto sobre la generación térmica neta 40
6.5.2. Conceptos de limpieza 41
6.5.3. Parámetros de entrada necesarios para el cálculo del intervalo óptimo de limpieza 42
6.5.4. Conclusión 42

7. CSP FRESNEL EN CHILE 43

7.1. Condiciones Climáticas en Chile 43
7.2. Simulación de la Generación Térmica Bruta y de la Eficiencia Anual en Lugares Seleccionados de Chile 44
7.3. Demanda de Energía Térmica en Chile: Calor para Procesos Industriales 45

8. REFERENCIAS 47

9. ANEXO – OPCIONES DE SUMINISTRO LOCAL PARA LOS SISTEMAS FRESNEL 49

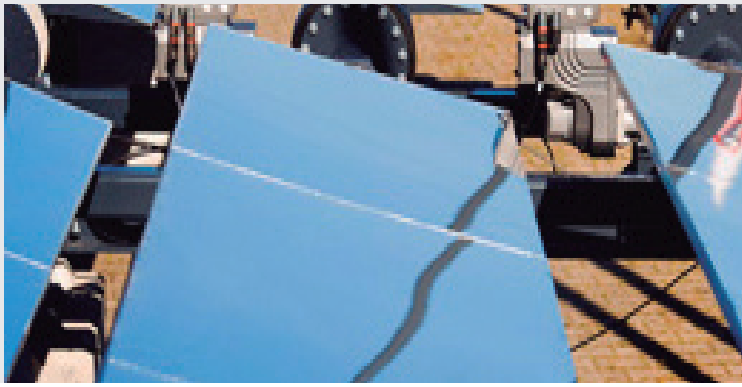
9.1. Base 49
9.2. Estructura de Soporte 49
9.3. Unidad de Seguimiento 49
9.4. Unidad de Control 50
9.5. Espejos Primarios 50

Siglas

CSP	Energía solar (térmica) de concentración (Concentrating Solar Power)
DMS	Tecnología basada en el uso de sales fundidas (Direct Molten Salt)
DNI	Radiación directa normal w/m^2 (Direct Normal Irradiation)
DSG	Generación directa de vapor (Direct Steam Generation)
EPC	Ingeniería, aprovisionamiento, construcción (Engineering, Procurement, Construction)
GHP	Generación térmica bruta (Gross Heat Production)
HTF	Fluido de transferencia de calor (Heat transfer fluid)
IAM	Modificador del ángulo de incidencia (Incidence Angle Modifier)
LFC	Colector(es) lineales Fresnel (Linear Fresnel Collector(s))
NHP	Generación térmica neta (Net Heat Production)
O&M	Operación y mantenimiento (Operation and Maintenance)
PCM	Material de cambio de fase (Phase Change Material)
PTC	Colector parabólico (Parabolic Trough Collector(s))

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

1. Resumen



Los colectores lineales Fresnel son una tecnología termosolar que genera calor mediante la concentración de la luz solar en un tubo receptor, desde donde un fluido caloportador lo transporta al consumidor. Este consumidor puede ser una turbina para generar electricidad o un proceso industrial.

La tecnología de los colectores lineales Fresnel es una tecnología joven. Si bien los primeros prototipos se construyeron en los años 1960, sólo durante la última década algunas empresas han empezado a desarrollar esta tecnología comercialmente y a realizar algunos proyectos.

El presente informe presenta la tecnología de los colectores lineales Fresnel y sus actores más importantes. El informe se enfoca en la tecnología de los colectores, haciendo sólo mención de otros asuntos relaciones tales como los aspectos del sistema y el potencial de aplicación.

En cada capítulo, un cuadro en color celeste resume el contenido del capítulo.

La primera parte titulada "¿Qué son los colectores lineales Fresnel?" contiene información teórica técnica. Los reflectores Fresnel se desarrollaron a partir del diseño del colector parabólico. Por consiguiente, este estudio en parte se refiere a los colectores parabólicos cuando explica los detalles del diseño Fresnel.

La sección titulada "Situación del Mercado" describe la situación económica actual de esta joven tecnología.

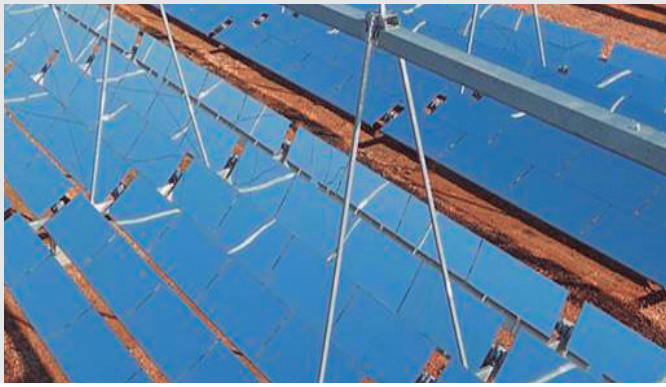
En "Estado de la Tecnología", nuevamente se destacan los temas tecnológicos, explicándose la situación actual de la tecnología.

En el capítulo "Perfiles de Empresas", los autores entregan una lista de todas las empresas que trabajan con tecnología Fresnel y que prestan servicios EPC, de los cuales tienen conocimiento. Asimismo, se describen con más detalle algunas de estas empresas.

En la sección "Tendencias del Desarrollo Tecnológico", los autores entregan su visión de los desarrollos tecnológicos que se esperan en la tecnología de los colectores Fresnel en el futuro cercano o más adelante.

El informe concluye con un capítulo sobre la situación en Chile con respecto a la tecnología CSP Fresnel y sobre asuntos relacionados, tales como las condiciones climáticas, el contenido local y el ensuciamiento y la limpieza de los colectores.

2. ¿Qué son los Colectores Lineales Fresnel?



2.1. INTRODUCCIÓN A LOS COLECTORES LINEALES FRESNEL

Los colectores Fresnel forman parte de las tecnologías de energía solar de concentración (CSP). Estas tecnologías usan espejos para concentrar la luz solar y, de esta manera, generar calor que se usa directamente en la industria o para la generación de energía eléctrica.

Un colector Fresnel consiste en varios espejos planos largos que siguen el movimiento del sol, reflejando la luz solar en un tubo receptor ubicado por encima de los espejos. Ver la ilustración 1.

Los colectores lineales Fresnel son colectores lineales de concentración. Estos colectores usan receptores y reflectores lineales montados por segmentos sobre heliostatos de seguimiento de un solo eje. Normalmente, estos reflectores modulares están alineados horizontalmente y siguen el sol de tal manera que la luz incida en el receptor sin que este último tenga que moverse. (Ver la ilustración 1).

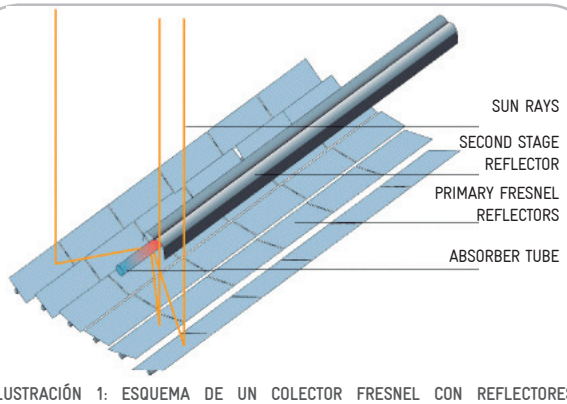


ILUSTRACIÓN 1: ESQUEMA DE UN COLECTOR FRESNEL CON REFLECTORES SECUNDARIOS (FUENTE: HÄBERLE ET AL. 2002)[1]

1 "Sun rays" = rayos del sol, "second stage reflector" = reflector secundario, "primary fresnel reflectors" = reflectores primarios Fresnel, "absorber tube" = tubo de absorción (nota de la traductora)

Parecidos a los campos de heliostatos en las torres solares, en los reflectores lineales Fresnel el área de apertura por unidad del receptor es mucho más grande que en el reflector ideal, es decir, en el colector parabólico. Las limitaciones mecánicas en cuanto al tamaño del reflector ideal (resultantes de la carga eólica y del peso) son similares tanto en el heliostato como en el colector parabólico. Obviamente, la ventaja de los sistemas con heliostatos consiste en que el tamaño de apertura de un sistema completo no depende del tamaño de los reflectores individuales. Esto significa que los heliostatos pueden ser pequeños pero conjuntamente cubrir una gran área de apertura. La desventaja de los sistemas con heliostatos es la menor eficiencia óptica por superficie del reflector, que básicamente resulta de la interferencia entre los segmentos individuales de los reflectores. Esta eficiencia no puede más que acercarse a la eficiencia óptica que tendría una geometría ideal del reflector (esto es, no segmentada).

Mientras que, en las últimas décadas, las torres solares, los platos solares y los colectores parabólicos han sido objetos de investigación y desarrollo, los conceptos lineales Fresnel volvieron a la agenda de algunas pocas empresas y grupos de investigación en todo el mundo sólo a fines de los años 1990.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

2.2. DESARROLLO HISTÓRICO

Augustin Jean Fresnel (1788-1827) inventó el llamado lente de Fresnel. Giovanni Francia transfirió el principio general desde los lentes a los reflectores, desarrollando el primer prototipo de un colector Fresnel en 1964.

No fue hasta 2006 que se construyeron las primeras plantas comerciales.

El nombre de los colectores lineales Fresnel deriva de Augustin Jean Fresnel (1788-1827) quien, entre muchas otras cosas, desarrolló los lentes de refracción que tienen la misma distancia focal que los lentes estándar pero usan sólo una parte del material. Los colectores Fresnel funcionan de manera similar, usando el principio de segmentar el aparato óptico pero aplicando este mismo principio a un espejo reflector parabólico en vez de un lente refractivo.

Un primer prototipo de un colector lineal Fresnel está documentado del investigador italiano Giovanni Francia en 1964 (ver la Ilustración 2).

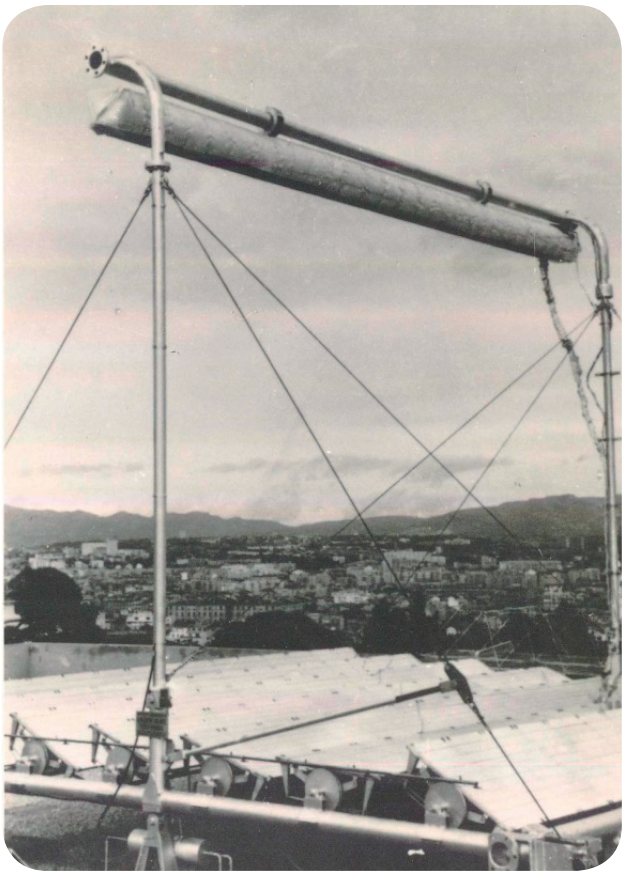


ILUSTRACIÓN 2: DE GIOVANNI FRANCIA (1911-1980) (FUENTE: ARCHIVO PRIVADO)

Francia describió temperaturas de hasta 450°C y la generación directa de vapor[2]. Algunas pocas instalaciones piloto de otros grupos siguieron en otros lugares del mundo, pero no se sabe de ninguna instalación que haya operado por un tiempo más largo. Sólo se puede especular sobre los problemas técnicos de estos proyectos. Un problema puede haber sido subestimar la dificultad de lograr y mantener una precisión de seguimiento suficiente.

Al final de los años 1990, dos grupos reiniciaron el desarrollo de la tecnología de los colectores lineales Fresnel: la empresa australiana Solar Heat and Power (SHP)[3] y la empresa belga Solarmundo[4]. Una nueva empresa llamada Novatec Biosol[5] entró al mercado en 2006, anunciando poco después que el primer sistema lineal Fresnel de 1,4MW estaba suministrando electricidad a la red eléctrica (ver la Ilustración 3).

La lógica comercial detrás de los colectores lineales Fresnel, en comparación con los colectores parabólicos para las aplicaciones CSP, se basa en la ventaja que se espera de su potencial de reducción de costos, debido a su diseño más sencillo, que compensaría el rendimiento óptico inferior.

ILUSTRACIÓN 3: PROYECTO PE 1 DE NOVATEC SOLAR GMBH (FUENTE: WWW.NOVATECSOLAR.COM, CONSULTADO EL 18 DE SEPTIEMBRE DE 2014)

La aplicación de colectores CSP en la generación de calor para los procesos industriales enfoca a otro segmento del mercado. En esta área, puede resultar necesario montar los colectores solares en el techo, lo que implica la importancia de cargas eólicas bajas y de factores altos de uso del suelo, en comparación con su aplicación en proyectos CSP. La empresa Industrial Solar GmbH ya ha instalado varios de estos sistemas lineales Fresnel en techos, sobre todo para aplicaciones de refrigeración solar, pero también para la generación directa de vapor (ver la Ilustración 4).

2 Silvi, C. The Pioneering Work on Linear Fresnel Reflector Concentrators (LFCs) in Italy. Proceedings SolarPaces 2009, Berlín
3 Posteriormente, SHP cambió de nombre a AUSRA y, luego, a AREVA Solar
4 Posteriormente, Solarmundo se cedió a Solar Power Group
5 Posteriormente, Novatec Biosol cambió de nombre a Novatec Solar

ILUSTRACIÓN 4: COLECTOR FRESNEL MONTADO EN EL TECHO POR INDUSTRIAL SOLAR GMBH PARA UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN SOLAR EN LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS DE SEVILLA, ESPAÑA (FUENTE: RITTER XL SOLAR GMBH, INFORMACIÓN AL 9 DE MAYO DE 2011)

2.3. DISEÑO DE LOS REFLECTORES LINEALES FRESNEL

El diseño de los colectores lineales tiene por objeto cosechar la mayor cantidad de energía posible. Es un procedimiento de optimización que incluye el sistema de seguimiento (esto es, los colectores siguen el movimiento del sol), la geometría de los reflectores y el receptor.

La idea básica detrás del diseño de los reflectores Fresnel consiste en segmentar un reflector parabólico, alinear las piezas horizontalmente y permitir que cada uno siga el sol individualmente. Mientras que la posición del sol en el cielo cambia durante el día, el absorbedor queda fijo, girando los espejos primarios lentamente en un eje para reflejar la luz solar directa en el absorbedor en cada momento.

A diferencia de lo que ocurre en los colectores parabólicos, en este caso el ángulo entre el sol, el espejo y el absorbedor cambia constantemente (ver la Ilustración 6). Por lo tanto, el control de seguimiento se realiza de circuito abierto, usando un algoritmo astronómico de la posición solar para calcular los ángulos de consigna de los espejos en cada momento.

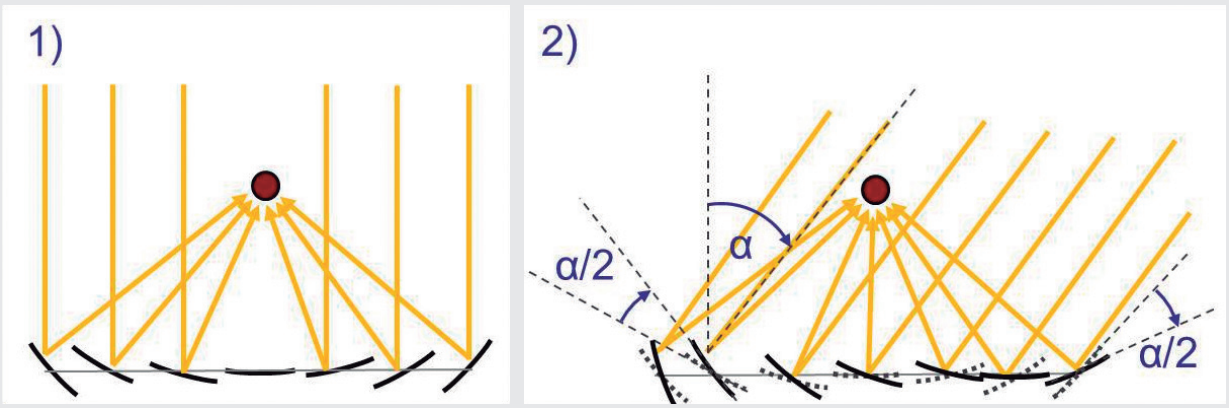


ILUSTRACIÓN 5: PRINCIPIO DE SEGUIMIENTO: PARA ALCANZAR UN CAMBIO α DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA, TODOS LOS ESPEJOS PRIMARIOS DEBEN GIRAR A $\alpha/2$

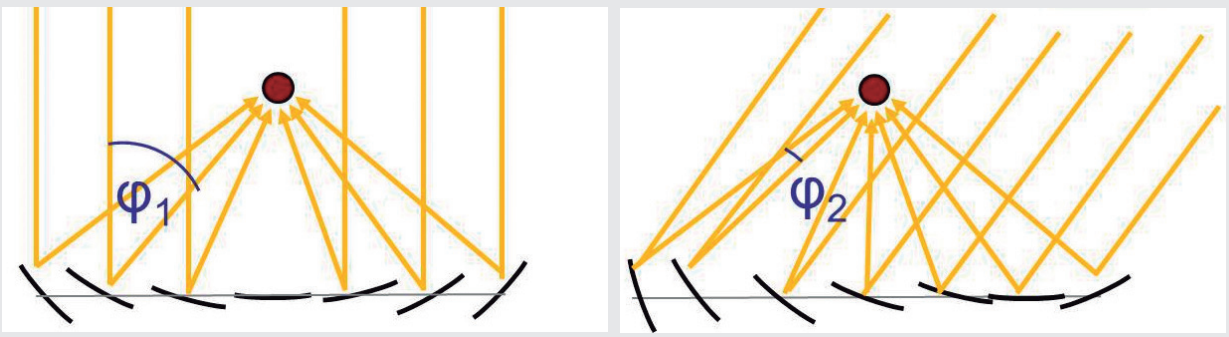


ILUSTRACIÓN 6: PRINCIPIO DE SEGUIMIENTO DE LOS COLECTORES LINEALES FRESNEL; EL ÁNGULO ENTRE EL SOL, EL ESPEJO Y EL ABSORBEDOR CAMBIA CON LA POSICIÓN DEL SOL

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

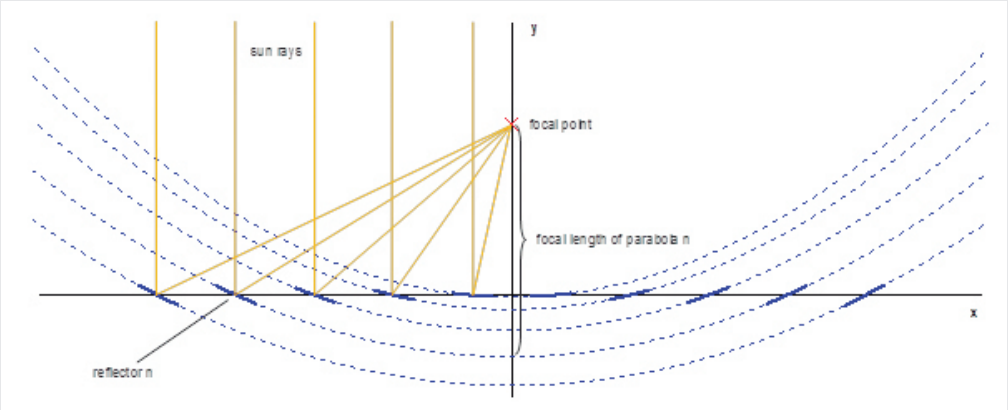


ILUSTRACIÓN 7: REFLECTORES FRESNEL IDEALES PARA LA RADIACIÓN PERPENDICULAR[6]

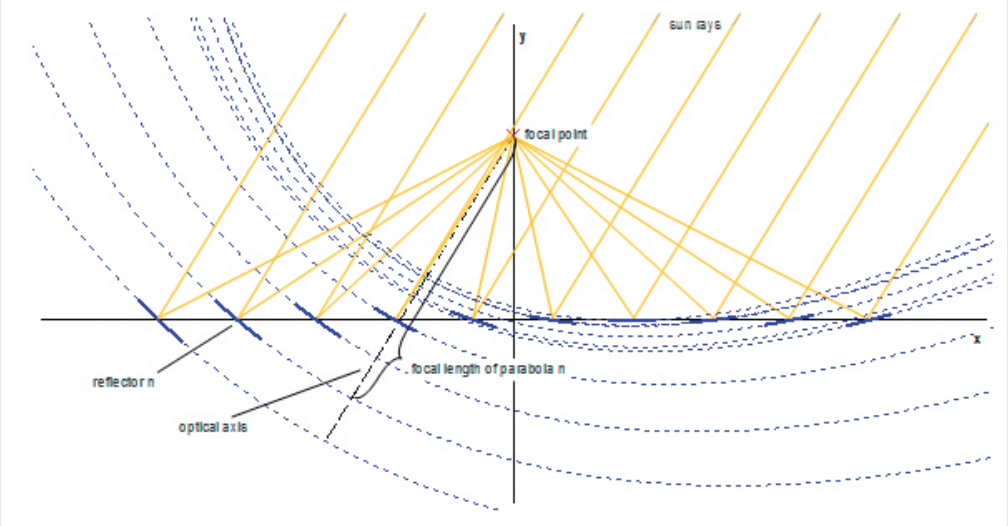


ILUSTRACIÓN 8: REFLECTORES FRESNEL IDEALES PARA LAS INCIDENCIAS ATÍPICAS[7]

Mirado más de cerca, resulta evidente que el diseño de los segmentos reflectores es óptimo cuando éstos no forman parte de la misma parábola, sino que pertenecen a diferentes parábolas cuya distancia focal aumenta en la medida en que crece su distancia del centro del segmento reflector (ver la Ilustración 7).

Adicionalmente, la forma ideal de los heliostatos cambia en la medida en que siguen el sol, ya que idealmente se trataría de diferentes segmentos de diferentes parábolas para diferentes ángulos del sol. Los segmentos de parábola se deben encontrar cerca del eje óptico para una reflexión casi normal, pero lejos del centro para los ángulos de reflectividad alta. Idealmente, cada reflector debería ser capaz de adoptar la forma de segmentos de parábolas con diferentes distancias focales y a diferentes distancias del eje óptico (ver la Ilustración 8).

En la práctica, la construcción de un colector lineal Fresnel requiere hacer concesiones con respecto al diseño geométrico ideal, para que el esfuerzo que implica su realización quede dentro de lo razonable. Por ejemplo, idealmente la forma de los reflectores se ajusta para diferentes inclinaciones. Si la forma es fija, se produce un error óptico llamado astigmatismo en cualquier ángulo de incidencia distinto al ángulo de diseño. Por lo tanto, el arte de ingeniería consiste en encontrar el compromiso óptimo en cuanto a la construcción, el material y el rendimiento total.

Un efecto interesante del principio de seguimiento solar es el hecho que, para cada heliostato, el seguimiento progresivo de los espejos es idéntico, siempre y cuando el eje de giro del heliostato se encuentra en el plano de los reflectores (ver la Ilustración 9 y la Ilustración 10). En la práctica, esto significa que el simple acoplamiento mecánico de los espejos adyacentes permite efectuar el seguimiento de un campo de espejos entero mediante un solo motor.

6 "Sun rays" = rayos del sol, "focal point" = punto focal, "focal length of parabola n" = distancia focal de la parábola n, "reflector" = reflector (nota de la traductora)
7 "sun rays" = rayos del sol, "focal point" = punto focal, "reflector" = reflector, "focal length of parábola n" = distancia focal de la parábola n, "optical axis" = eje óptico (nota de la traductora)

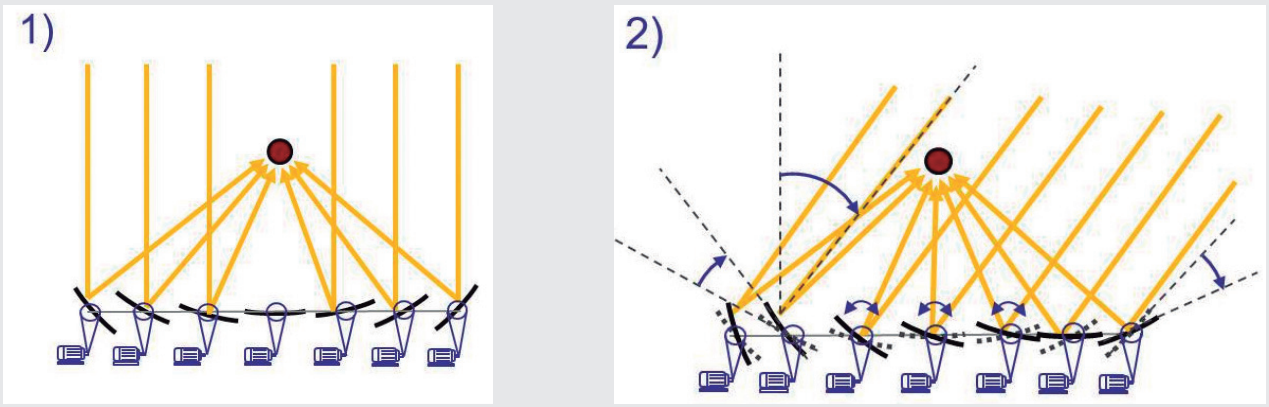


ILUSTRACIÓN 9: SEGUIMIENTO POR MOTORES INDIVIDUALES POR FILA

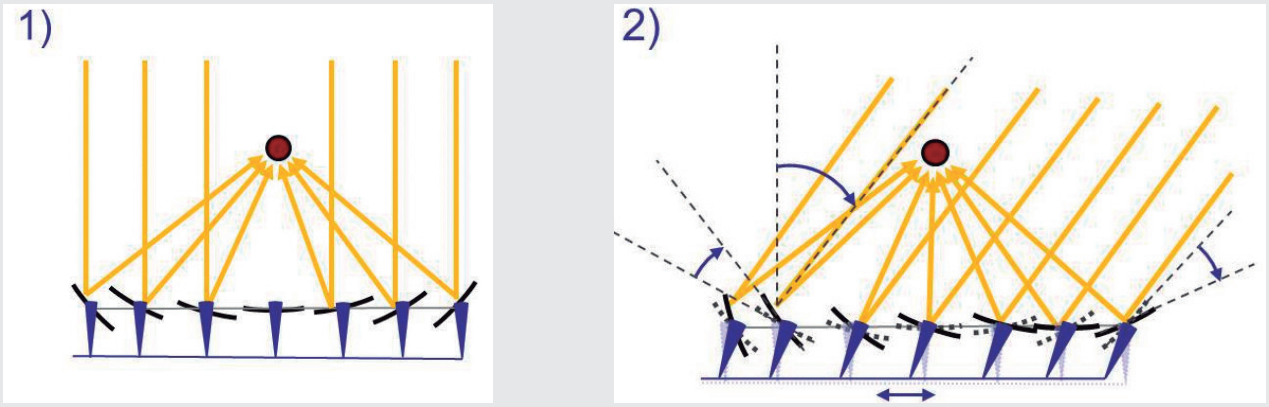


ILUSTRACIÓN 10: SEGUIMIENTO POR UN SOLO MOTOR CON FILAS DE ESPEJOS ACOPLADAS MECÁNICAMENTE

2.4. GEOMETRÍA Y ÁREA DE REFERENCIA

La eficiencia del colector se ve afectada por las pérdidas ópticas que dependen de la geometría del colector y de su posición geográfica.

En la discusión sobre la eficiencia, es importante definir el área de referencia del colector.

En la discusión sobre el rendimiento y de la eficiencia, es importante definir el área de referencia. El área de referencia para los colectores parabólicos se define como la proyección de la forma del reflector. Sería útil encontrar una definición similar para los colectores lineales Fresnel. Sin embargo, en el reflector Fresnel la proyección de la forma cambia con el ángulo de incidencia, de modo que la definición anterior no sería útil. De acuerdo con una definición intermedia, el ancho de la apertura de un colector Fresnel se define como la suma de las proyecciones Ai de sus reflectores primarios en su posición horizontal (ver la Ilustración 11). Mientras que el área de apertura sirve de área de referencia para la eficiencia y las cifras de la generación térmica, el área bruta B sigue siendo un valor importante para la planificación y la ingeniería de este tipo de plantas. Entonces la altura h del colector se define como la altura del centro del absorbedor por encima de los campos de los espejos primarios.

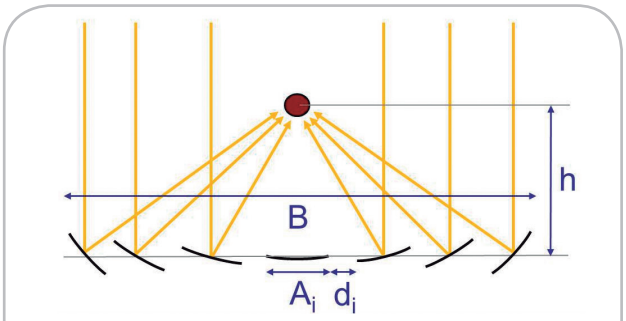


ILUSTRACIÓN 11: EL ANCHO DE APERTURA ES LA SUMA DEL ANCHO EFECTIVO DE CADA ESPEJO PRIMARIO A=∑Ai Y DEL ANCHO BRUTO B DEL COLECTOR FRESNEL. LA DIFERENCIA ENTRE A Y B ES LA SUMA DE LOS ESPACIOS ∑di. LA ALTURA DEL COLECTOR FRESNEL TÍPICAMENTE SE DEFINE POR LA ALTURA H DEL CENTRO DEL TUBO ABSORBEDOR ENCIMA DEL CAMPO DE LOS ESPEJOS PRIMARIOS

Según la definición anterior, el rendimiento óptico típico del colector Fresnel en relación con el área de apertura es inferior al rendimiento de un colector parabólico con los mismos parámetros materiales. Esto no es sorprendente, dado el carácter aproximado del enfoque Fresnel.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

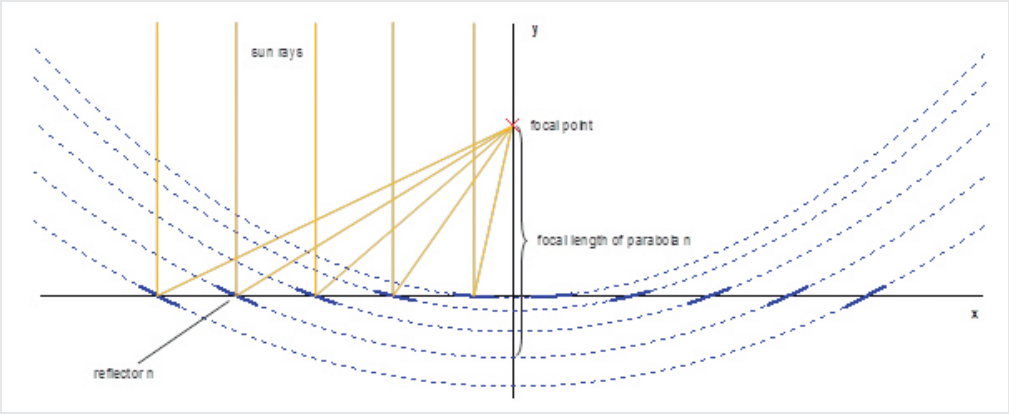


ILUSTRACIÓN 12: PÉRDIDAS POR COSENO, SOMBREAMIENTO Y BLOQUEO DE LOS REFLECTORES ADYACENTES[8]

Las pérdidas ópticas se deben a que el área de apertura no es perpendicular a los rayos incidentes y que, por lo tanto, el área activa se reduce por el coseno del ángulo de incidencia de cada reflector. Otro factor importante de la pérdida óptica es el hecho que las estructuras de soporte se ensombrecen mutuamente y que los reflectores también se bloquean mutuamente (ver la Ilustración 12).

2.5. EFICIENCIA ÓPTICA

La eficiencia óptica, si bien es un indicador importante, no es el único indicador de la calidad de un colector. La eficiencia depende también de la dirección de la luz solar directa: típicamente entre el 55% y el 65% en el cenit del sol, el 0% con la luz solar horizontal y valores intermedios de cierta complejidad, según el funcionamiento del modificador del ángulo de incidencia.

La eficiencia óptica η de un colector Fresnel depende del ángulo de incidencia de la radiación solar directa. Por definición, η0 es la eficiencia óptima bajo una incidencia normal (esto es, con el sol en su cenit) y bajo condiciones ideales (por ej., estando totalmente limpios los reflectores primarios, los reflectores secundarios y el tubo receptor de vidrio).

La dependencia angular del rendimiento óptico se describe mediante el modificador del ángulo de incidencia (IAM) biaxial, definiéndose como la proporción entre la eficiencia óptica a un cierto ángulo de incidencia y el rendimiento óptico bajo una radiación perpendicular. La Ilustración 13 muestra un ejemplo del modificador del ángulo de incidencia biaxial de un colector lineal Fresnel, tanto en dirección longitudinal como en dirección transversal, bajo una radiación directa normal. Para este tipo de colector es típica la forma zigzag del IAM transversal que se debe a la sombra del receptor que se mueve, uno a uno, sobre los espejos primarios y los espacios entre éstos.[9]

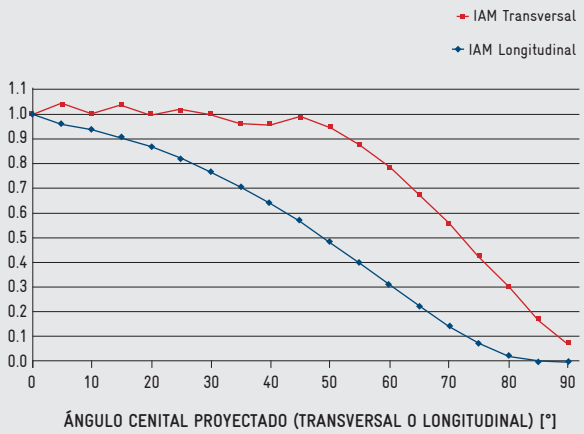


ILUSTRACIÓN 13: MODIFICADOR DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA (IAM) TÍPICO DE UN COLECTOR LINEAL FRESNEL, BAJO UNA RADIACIÓN DIRECTA NORMAL. EL EJE VERTICAL NO TIENE DIMENSIONES, YA QUE EL IAM ES UN FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA EFICIENCIA SIN DIMENSIONES.[9]

8 "cosinus" = coseno, "shading" = sombreamiento, "blocking" = bloqueo (nota de la traductora)

9 El IAM transversal puede ser más largo que 1.0, si el receptor tapa del sol el espejo primario central cuando el sol está en su cenit. En este caso, la eficiencia aumenta al moverse la sombra del receptor a un espacio entre dos filas de espejos.

2.6. EFICIENCIA TÉRMICA

La eficiencia térmica es otro factor importante: mientras menor la pérdida térmica, mejor el rendimiento total del sistema. Se han realizado grandes esfuerzos para aumentar la eficiencia térmica de los colectores Fresnel. Típicamente, la eficiencia térmica alcanza entre el 50% y el 65% bajo una radiación ideal.

Las pérdidas de calor $\dot{Q}$pérdida del fluido térmico en un colector solar se deben a los mecanismos de radiación, convección y conducción, y pueden describirse por una dependencia parabólica de la diferencia de temperatura entre la temperatura del absorbedor y la temperatura ambiente (ΔT).

$$\dot{Q}\text{pérdida} = u_0 \, A \, \Delta T + u_1 \, A \, \Delta T^2$$

Ecuación 1

Con A siendo al área de apertura y ΔT la diferencia de temperatura entre la temperatura del absorbedor y la temperatura ambiente, u_0 y u_1 son los coeficientes lineales y cuadráticos de la pérdida de calor, aplicados a fin de estimar las pérdidas reales de calor.

Con estas pérdidas de calor, la eficiencia térmica (η) bajo una radiación perpendicular puede mostrarse en curvas características como, por ejemplo, en la Ilustración 14. Puesto que la pérdida de calor no depende de la radiación pero la potencia del colector sí depende linealmente de ella, la influencia negativa de la pérdida de calor sobre la eficiencia es proporcionalmente inversa a la radiación G.

2.7. GENERACIÓN TÉRMICA BRUTA

La generación térmica bruta del colector es un valor teórico que ayuda a comparar los diferentes diseños de colectores y las diferentes ubicaciones geográficas. Normalmente, este valor se simula mediante software especial.

Es importante tener presente que la curva de la eficiencia es válida solamente en los casos de una radiación perpendicular que, en la mayoría de los lugares del mundo, no se da nunca. Incluso entre los dos trópicos, el sol está exactamente perpendicular sólo dos veces al año. Esto significa que la potencia de salida del colector en un lugar dado sólo puede estimarse combinando la curva de eficiencia, la dependencia angular (IAM) y la orientación con la posición geográfica, los datos de radiación correspondientes y la temperatura operativa. Estos datos son muchos como para hacer el cálculo a mano, pero éste se puede hacer fácilmente con la ayuda de programas de simulación tales como TRNSYS, Greenius o T*SOL. El resultado es un valor correspondiente a la producción térmica bruta anual que se espera en el lugar estudiado, y este valor bien puede servir de base para comparar los diferentes diseños y modelos de colectores de los diferentes fabricantes.

La producción térmica bruta muestra la cantidad de calor que se puede producir en el colector, teórico e idealmente, incluyendo solamente las pérdidas de calor al interior del colector, pero sin considerar cualesquiera pérdidas asociadas a la puesta en marcha, pérdidas en la tubería exterior u otras pérdidas del sistema. Para analizar la viabilidad económica, la cifra más confiable que debería considerarse es aquélla correspondiente a la producción térmica neta (ver el capítulo 2.8).

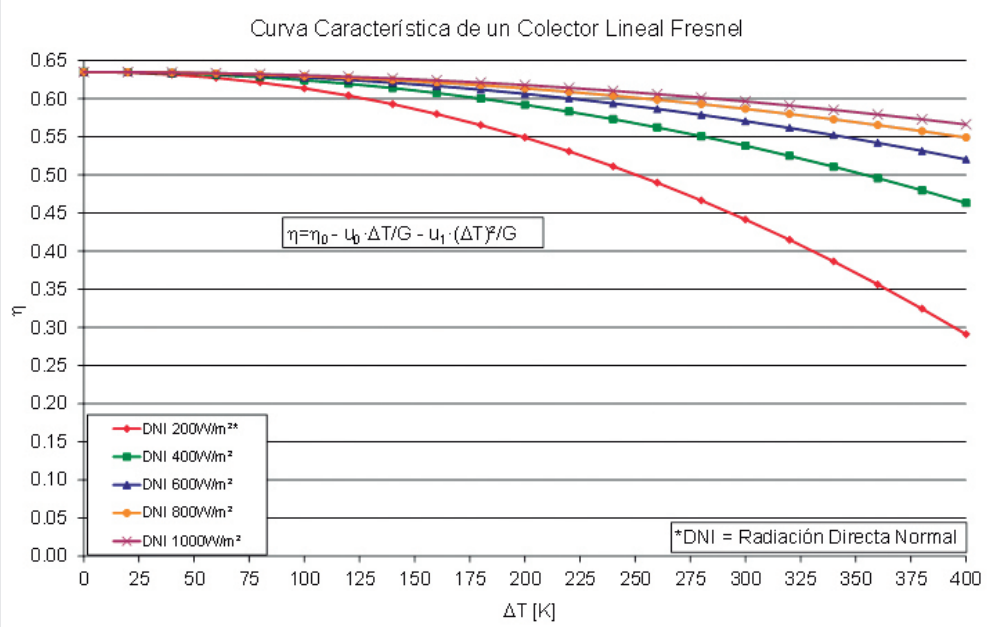


ILUSTRACIÓN 14: CURVA CARACTERÍSTICA DE UN COLECTOR LINEAL FRESNEL

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

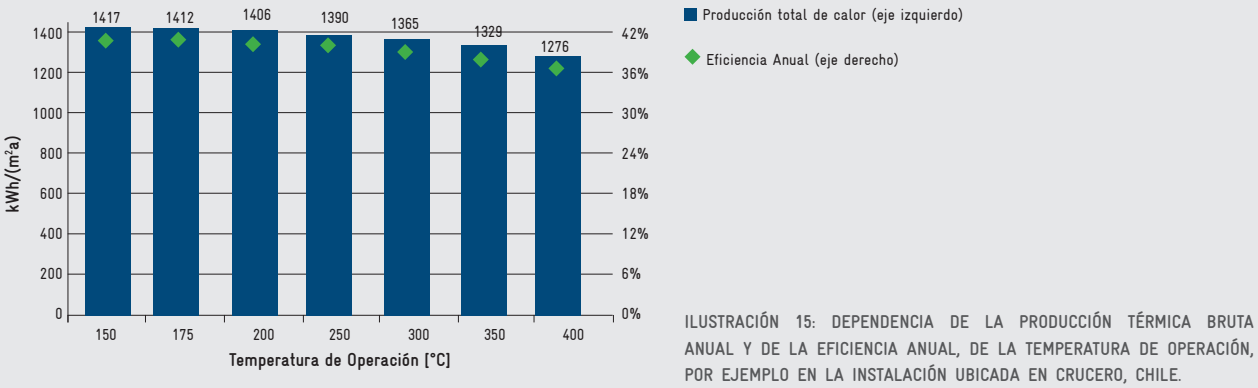


ILUSTRACIÓN 15: DEPENDENCIA DE LA PRODUCCIÓN TÉRMICA BRUTA ANUAL Y DE LA EFICIENCIA ANUAL, DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN, POR EJEMPLO EN LA INSTALACIÓN UBICADA EN CRUCERO, CHILE.

La producción térmica bruta puede variar en diferentes lugares, por varias razones. La latitud geográfica tiene un impacto en la eficiencia, siendo los lugares entre los trópicos los lugares que ofrecen la mayor eficiencia. El clima tiene una gran influencia simplemente por la cantidad de insolación, siendo los climas secos y soleados los climas más apropiados. Las características microclimáticas (por ej., la cercanía de grandes ciudades) pueden influir en la producción térmica de un colector solar de concentración, por ejemplo si una alta concentración de aerosoles y vapor en el aire reduce la cantidad de radiación directa. También influye la orientación del colector que puede discrepar hasta en un 10% entre la orientación óptima (normalmente, la orientación norte-sur) y la orientación menos conveniente. La temperatura de operación también influye en los resultados, en cuanto aumenta las pérdidas de calor (ver la Ilustración 15).

2.8. GENERACIÓN TÉRMICA NETA

Para el análisis económico de un proyecto, la generación térmica neta es más significativa que la producción térmica bruta. Se trata del calor utilizable que sale del sistema entero.

Para calcular los plazos del retorno sobre la inversión con respecto a un caso específico, hay que considerar las pérdidas del sistema, tales como, por ejemplo, las pérdidas asociadas a la puesta en marcha, pérdidas en el sistema de tuberías o pérdidas por purga. Este nivel de detalle en el cálculo requiere una especificación detallada del sistema, la que generalmente se puede realizar sólo después de una primera ingeniería y del diseño del sistema completo.

2.9. BENEFICIOS Y DESVENTAJAS DE LOS COLECTORES FRESNEL

La CSP Fresnel es una tecnología solar prometedora con muchas ventajas técnicas y económicas. Tal como las otras tecnologías solares, la CSP Fresnel aprovecha la luz solar que es limpia y gratis, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles.

La CSP Fresnel tiene varias ventajas, en comparación otras tecnologías CSP. Los beneficios resultan de los costos de producción menores, cargas inferiores de viento, una limpieza más fácil y menor estrés termal, y compensan el hecho que el rendimiento por m² no es tan alto como, por ejemplo, en los colectores parabólicos CSP.

En la discusión sobres los pros y los contras de las diferentes tecnologías de colectores, es importante distinguir entre objetivos comerciales y técnicos. A continuación se analizan las características técnicas de los colectores Fresnel, suponiendo un diseño comercialmente razonable.

En comparación con los colectores parabólicos, las características más importantes de un colector Fresnel son las siguientes:

- **Receptor fijo:** Puesto que el receptor es fijo, no se requieren ni mangueras flexibles ni rótulas esféricas para conectar el receptor. Sin embargo, los extremos del receptor sí se moverán por expansión térmica. El movimiento máximo depende de la temperatura máxima de operación y del largo total del receptor. Este movimiento diario puede fácilmente ser de varios metros en un receptor con un largo de varios cientos de metros. Sin embargo, los equipos industriales estándar incluyen los respectivos compensadores.

- **Iluminación desde abajo:** El receptor siempre está iluminado desde abajo, independientemente del ángulo del sol. Esto significa que la dirección del estrés térmico en el receptor no cambia durante el día. Sobre todo, no se produce un doblamiento lateral en el receptor por causa del estrés térmico.
  La iluminación desde abajo es una ventaja importante en la generación directa de vapor, por lo menos para aquellos patrones de flujo en que no se puede garantizar el enfriamiento constante de la parte superior del tubo (flujo estratificado o slug).
- **Carga eólica baja:** La baja carga de viento se considera como una ventaja, ya que directamente lleva a estructuras metálicas más livianas, una menor influencia del viento durante la operación y una reducción del número de daños causados por altas velocidades de viento.
- **Amplio uso del suelo:** El diseño óptimo de un reflector Fresnel se ajusta, en la mayor medida posible, a todos los parámetros geométricos, tales como la altura del receptor, las distancias entre los espejos, el tamaño de los espejos, la cantidad de espejos, etc. El diseño resultante típicamente tiene una potencia con picos térmicos más altos por área de suelo, en comparación con las plantas de colectores parabólicos, por un factor aproximado de 1,5.
- **Limpieza de los espejos:** Con respecto al rendimiento y a los costos, la limpieza de los espejos es uno de los factores más importantes de la operación y del mantenimiento. El hecho que los espejos primarios son básicamente planos y que todos los reflectores primarios se pueden colocar de manera horizontal tiene la ventaja que se trata de una superficie de fácil acceso, que también puede limpiarse usando robots que consumen muy poca agua.

Por supuesto, cabe considerar también algunas desventajas de los colectores Fresnel:

- **Rendimiento óptico inferior:** El sombreamiento/bloqueo de los reflectores primarios reduce el rendimiento óptico por área de apertura.
- **Se requiere una mayor precisión de seguimiento:** El movimiento de un rayo reflejado por el heliostato es el doble del movimiento angular del heliostato mismo. Esto significa que, para lograr el mismo nivel de concentración, el reflector Fresnel debe ser controlado con una precisión dos veces más alta que un colector parabólico. En consecuencia, también la forma del reflector tiene que ser dos veces más precisa.
- **Producción anual de energía:** La producción anual de energía por capacidad instalada es inferior, pero esta desventaja es compensada en parte por la mayor capacidad por área de suelo.

En resumen, las ventajas técnicas anteriores se traducen en beneficios comerciales que tienen que compensar las desventajas comerciales que resultan de los inconvenientes técnicos. Por consiguiente, debe efectuarse un procedimiento de optimización multidimensional que finalmente lleva a una tecnología altamente competitiva.

2.9.1. Valores típicos de rendimiento

Si bien existen muchas diferencias en cuanto a ciertos detalles de los distintos colectores Fresnel que se ofrecen en el mercado, algunos parámetros de rendimiento son bastante parecidos en todos ellos.

Los colectores Fresnel que se ofrecen en el mercado se diferencian en su aplicación de destino (ver la sección 3) y también en muchos detalles técnicos. Algunos de éstos serán tratados en las siguientes secciones (4 y 5). Al mismo tiempo, algunos parámetros de rendimiento son bastante similares en todos los colectores Fresnel, y sus valores típicos se describen a continuación.

- **Potencia térmica nominal y eficiencia térmica en el punto de operación:** Estos valores dependen de la eficiencia óptica, posición del sol y de las pérdidas térmicas que se producen a temperatura de operación. Un valor típico de la potencia nominal es 550W/m², a una radiación directa normal de 900W/m² y una temperatura de operación de 200°C; un valor típico de la eficiencia nominal es entre el 55% y el 65%. La eficiencia óptica depende de la posición longitudinal y transversal del sol (ver la Ilustración 13, pág. 15); la eficiencia térmica depende de la temperatura del fluido caloportador y de la radiación solar (ver la Ilustración 14, pág. 16).
- **Factor de concentración total:** Es importante definir con precisión la concentración geométrica. Si el cálculo se hace sobre la base de la proporción entre el área de apertura y la circunferencia del tubo absorbedor, los valores típicos se sitúan entre 25 y 50. Pero si, en cambio, la definición se basa en el diámetro del tubo absorbedor, el valor sería tres (π, para ser preciso) veces más alto.
- **Pérdidas térmicas en W/m:** Obviamente, estas pérdidas dependen del tipo de receptor y de la diferencia de temperatura. Los valores típicos se sitúan entre 50W/m y 450W/m del largo del absorbedor.
- **Temperatura máxima de operación.**

Para el vapor sobrecalentado, esta temperatura alcanza alrededor de 540°C.

- **Velocidad máxima del viento durante la operación y velocidad eólica máxima:** Los valores típicos se sitúan entre 25m/s y 50m/s.
- **Precisión del seguimiento:** Típicamente, cualesquiera imprecisiones no exceden 0,1°.
- **Tiempo de la instalación:** Los valores típicos para las plantas CSP grandes alcanzan 20 minutos hombre por m² del área de apertura.
- **Peso del colector:** El valor típico alcanza alrededor de 25kg/m² del área de apertura, sin las bases.
- **Material para la estructura de soporte:** En la mayoría de los casos, la estructura se hace de acero. El material de la estructura trasera de los espejos generalmente también es acero; a veces se usa también aluminio. Los reflectores generalmente están hechos de espejos de vidrio.
- **Concepto de limpieza para los reflectores y absorbedores:** Típicamente, en las plantas más grandes se usan robots autónomos (ver el capítulo 6.5). El consumo de agua asciende a 0,03l/m² por ciclo de limpieza.
- **Consumo específico de energía auxiliar:** Un valor típico es de 1Wh/m²/día.
- **Degradación máxima del rendimiento total del sistema por año** Un valor típico es del 0,2% por año.
- **Diseño del soporte del absorbedor en los "extremos fríos y calientes":** Típicamente, el absorbedor se diseña con soportes móviles y mangueras flexibles.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

3. Situación del Mercado

3.1. MERCADOS DE DESTINO

Existen dos principales aplicaciones para la tecnología Fresnel: la generación de energía eléctrica a gran escala y la generación de calor para los procesos industriales. En ambas aplicaciones, las primeras plantas comerciales están funcionando con éxito.

Actualmente, el desarrollo de los colectores Fresnel se enfoca en dos mercados principales: la generación solar de energía eléctrica a gran escala y el uso directo en la industria del calor generado por energía solar.

3.1.1. Generación de energía eléctrica a gran escala

Actualmente, el mercado más interesante es la generación de energía eléctrica CSP a gran escala. Grandes campos de colectores generan vapor que impulsa las turbinas en los bloques con una potencia de muchos cientos de MW (ver la Ilustración 16). Las empresas que trabajan con la tecnología Fresnel se están poniendo al día en esta área, en que actualmente se destaca la tecnología de los colectores parabólicos en términos de experiencia de operación y rentabilidad.

Lo más probable es que la generación directa de vapor será la aplicación más común de los colectores lineales Fresnel, pero también vale la pena considerar otros fluidos de transferencia de calor (como, por ej., las sales fundidas) para esta tecnología, por lo menos hasta que existan posibilidades de almacenamiento latente o químico a una escala comercial suficiente como para almacenar adecuadamente el vapor generado.

En zonas con escasez de agua, será importante usar tecnologías de bajo consumo de agua. Esto significa que el diseño para la protección contra el calor incluirá torres de enfriamiento en seco y que la limpieza de los espejos Fresnel básicamente planos deberá realizarse mediante dispositivos automatizados de limpieza con un bajo consumo de agua.

La mayor competencia económica de la CSP a gran escala es la generación tradicional de energía eléctrica en las centrales eléctricas a partir de combustibles fósiles. Además, existe una competencia entre las tecnologías renovables. En los últimos años, especialmente la generación de energía fotovoltaica ha experimentado una enorme reducción del precio, lo que significa un reto para la CSP.

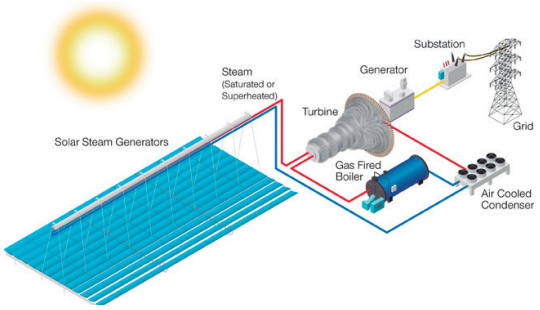


ILUSTRACIÓN 16: LOS COMPONENTES MÁS IMPORTANTES DE LA CSP, INCLUYENDO LA UNIDAD DE RESPALDO ALIMENTADA CON GAS (FUENTE: AREVA GROUP, INFORMACIÓN AL 9 DE OCTUBRE DE 2014)[10]

10 "Solar steam generators" = generadores de vapor solar, "steam (saturated or superheated)" = vapor (saturado o sobrecalentado), "turbine" = turbina, "gas fired boiler" = caldera a gas, "generator" = generador, "substation" = subestación, ""grid" = red, "air cooled condenser" = condensador refrigerado por aire (nota de la traductora)

3.1.2. Calor para procesos industriales

Otro mercado de destino es la generación solar de calor para los procesos de producción industrial y la generación de frío. La cogeneración a pequeña escala o los sistemas de trigeneración también pueden clasificarse dentro de este mercado del "calor para procesos industriales". Estas aplicaciones serán cada vez más interesantes en el futuro.

El calor para procesos industriales sigue siendo un mercado mucho menos desarrollado para las tecnologías solares, en comparación con la CSP, pero con el tiempo esta aplicación tendrá un potencial comercial importante.

El calor de procesos representa aproximadamente 2/3 del consumo final de energía de la industria europea (Ecoheatcool, 2006). La industria requiere calor en un amplio rango de temperaturas, empezando a 50°C, por ej., para la calefacción de espacios, la limpieza o el lavado. Las temperaturas de operación entre 100°C y 250°C se requieren típicamente en la industria alimenticia, textil o química, y temperaturas hasta superiores a 1.500°C se requieren en los procesos metalúrgicos, entre otros.

La mayor parte de este calor está por debajo de 400°C y, por lo tanto, dentro del rango accesible para las tecnologías termosolares de última generación. Sin embargo, en comparación con otras aplicaciones de colectores termosolares, ya sean de concentración o no, esta aplicación sigue siendo la menos desarrollada con la menor cantidad de proyectos realizados.

Al evaluar las aplicaciones de calor de procesos, cabe considerar no solamente que los típicos niveles de temperatura del calor para los procesos industriales son inferiores a aquéllos requeridos para la generación de energía eléctrica, sino también que el rango de potencia es inferior. Los típicos sistemas pueden tener una potencia de sólo un par de cientos de kW y, en la mayoría de los casos, su potencia térmica máxima no excede de varios MW. Por supuesto, existen excepciones, pero una regla general es que el típico proyecto de calor de procesos es mucho más pequeño que los cientos de MW necesarios para la generación de energía eléctrica. La temperatura de operación más baja y del tamaño menor de la instalación hacen posible el uso de colectores más pequeños que también pueden montarse en el techo (ver la Ilustración 17).

En un estudio realizado conjuntamente por el "Programa de Calefacción y Refrigeración Solar" de la AIE (SHC Task 33) y el programa de SolarPACES "Calor Solar para los Procesos Industriales" (Task 4), se hizo una extrapolación del potencial solar para el calor de procesos industriales de 5 países europeos, deduciendo que Europa tiene un potencial total de energía termosolar de entre 100 y 125GWth (ver la tabla 1).

Si bien los primeros proyectos pioneros se realizaron en los años 1970, sólo en la primera década del siglo XXI varias empresas nuevas definieron el calor para los procesos industriales como su mercado de destino, desarrollando nuevos productos apropiados para este fin, en su mayoría pequeños colectores parabólicos y algunos colectores Fresnel.

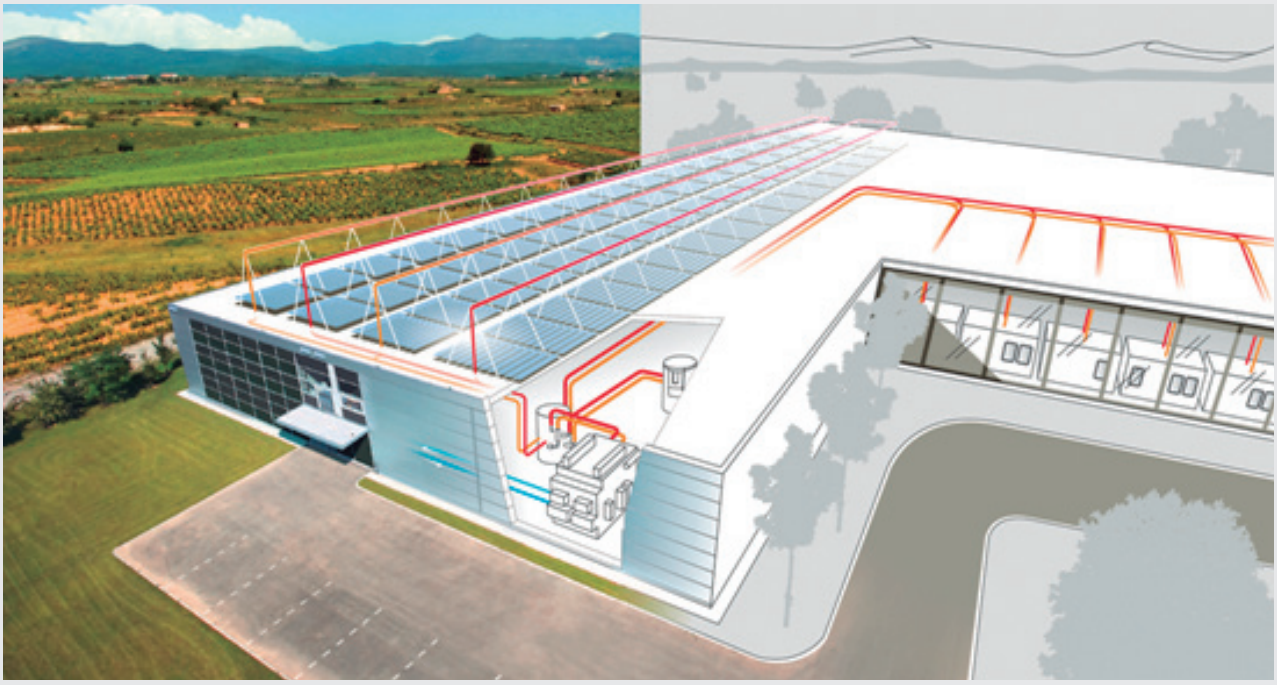


ILUSTRACIÓN 17: COLECTORES FRESNEL PARA LA GENERACIÓN DE CALOR DE PROCESOS Y SU INTEGRACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN INDUSTRIAL (FUENTE: SITIO WEB DE INDUSTRIAL SOLAR GMBH, ESTADO: VENCIDO)

TABLA 1: DEMANDA DEL CALOR INDUSTRIAL Y POTENCIAL DEL CALOR SOLAR PARA PROCESOS, EN PAÍSES SELECCIONADOS Y EN LOS PAÍSES EU25 (ADAPTACIÓN DE VANNONI ET AL., 2008)

PAÍS	DEMANDA DE CALOR INDUSTRIAL (PJ/AÑO)	POTENCIAL DE CALOR SOLAR PARA PROCESOS (PJ/ AÑO)	POTENCIAL DE CALOR SOLAR PARA PROCESOS (GWTH)	POTENCIAL DE CALOR SOLAR PARA PROCESOS (MILLONES DE M² DE SUPERFICIE DE COLECTORES)
Austria	137	5.4	3	4,3
España	493	17	5,5 – 7	8 – 10
Portugal	90	4	1,3 – 1,7	1,9 – 2,5
Italia	857	31,8	10	14,3
Países Bajos	46	1,95	0,5 – 0,7	0,8 – 1
EU 25	6.881	258,2	100 – 125	143 – 180

3.2. DATOS FINANCIEROS

A fin de compensar su menor rendimiento, los colectores lineales Fresnel tienen que alcanzar aproximadamente el 55% del objetivo de costo por m², en comparación con los colectores parabólicos.

3.2.1. Ejemplos de construcción

La información disponible sobre las estructuras de precios de los proyectos Fresnel no es suficiente como para publicarla dentro del presente informe. A nivel internacional, son muy pocos los proyectos realizados y aquéllos realizados generalmente no reflejan los precios de mercado.

Además, actualmente las empresas que trabajan con tecnología Fresnel no están en condiciones de entregar información detallada sobre las estructuras de precios de sus productos, porque cada proyecto bajo análisis aún requiere de ingeniería individual y las empresas aún no definen los precios estándar de venta.

La información sobre tres plantas de CSP Fresnel, instaladas recientemente, indica un nivel de precios de aproximadamente 3,0 – 5,5€/Wel, correspondientes a los costos de la inversión del campo solar, o de 0,02 – 0,03€/kWhth por la producción térmica.

3.2.2. Comparación económica con los colectores parabólicos

Un amplio estudio por Morin et al. (2012) comparó los costos teóricos de la generación de energía eléctrica en las plantas CSP mediante colectores lineales Fresnel (LFC) o colectores parabólicos. Hasta la fecha, los colectores parabólicos son la tecnología CSP más comercial y, por lo tanto, se las considera como punto de referencia. Con respecto a los colectores lineales Fresnel, casi no existen datos sobre los costos. Por esto, los autores determinaron que el umbral de rentabilidad se alcanza cuando los costos son equivalentes a los costos de la generación de energía eléctrica mediante una planta de colectores parabólicos de referencia.

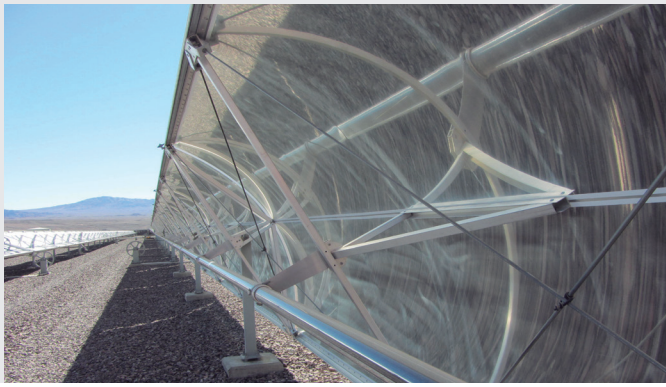
El estudio cambió los supuestos sobre el rendimiento de colectores y los costos de operación y mantenimiento, a fin de reflejar los diferentes diseños de la tecnología de colectores parabólicos. Los cálculos se hicieron usando modelos de rendimiento de simulación de costos y horas.

El principio de los colectores lineales Fresnel, consistente en colocar los espejos horizontalmente, lleva a una eficiencia óptica menor en relación con la apertura. Esta reducción de la eficiencia tiene que compensarse por el menor costo por m² de la apertura, en comparación con los colectores parabólicos. El colector lineal Fresnel es un colector con un importante potencial de reducción de costos, principalmente por los espejos más económicos y las ventajas estructurales.

De acuerdo con los supuestos sobre el rendimiento óptico y térmico, y sobre los costos de operación y mantenimiento, los costos de la inversión (según la apertura) de un campo de colectores lineales Fresnel tienen que situarse entre el 28% y el 79% del costo por un campo de colectores parabólicos, para alcanzar el umbral de rentabilidad. Un valor medio razonable es el 55%.

Las cifras de los costos relativos dependen de la definición de la superficie de referencia, esto es, de la apertura, y no la superficie de los espejos (ni el uso del suelo). La superficie de los espejos de los colectores parabólicos es aproximadamente un 10% mayor que la apertura de los colectores parabólicos. En los colectores lineales Fresnel, la apertura y la superficie de los espejos son casi iguales. El área de apertura se eligió como la base de la comparación, debido a que existen definiciones establecidas de apertura, tanto para los colectores lineales Fresnel como para los colectores parabólicos. En los colectores lineales Fresnel, el umbral de rentabilidad sería más alto si como punto de referencia para ambas tecnologías se tomara la superficie de los espejos.

4. Estado de la Tecnología



4.1. BASES

Cada colector Fresnel tiene seis componentes importantes: la base, la estructura de soporte, los espejos primarios, las unidades de control y seguimiento, y el receptor que consiste en los tubos absorbedores y, según el caso, un reflector secundario.

Más abajo, un capítulo especial se dedicará a cada uno de estos componentes más importantes.

Normalmente, el colector se fija en el suelo mediante cimientos de hormigón. Como alternativa, en un número creciente de plantas se usan tornillos de tierra.

Actualmente, existen dos diseños principales de cimentación para el montaje en tierra de los colectores Fresnel. La mayoría de los prototipos existentes y de los proyectos realizados cuenta con cimientos de hormigón. Sin embargo, según los autores, en el futuro se usarán cada vez más los tornillos de tierra, donde sea posible.

Las ventajas de los tornillos de tierra incluyen el costo más bajo y el menor impacto ambiental (Anne Jaulain et al., 2012). También resulta más rápida la instalación con los tornillos de tierra que con cimentaciones de hormigón. Por el otro lado, la utilidad de los tornillos de tierra puede verse limitada en los lugares con una alta carga de viento, condiciones de suelo difíciles y ambientes corrosivos como, por ejemplo, en las instalaciones en la costa.

ILUSTRACIÓN 18: FOTO A LA IZQUIERDA: SOLTIGUA, ITALIA: CIMIENTOS CON PUNTAS DE CONCRETO (FUENTE: SITIO WEB DE SOLTIGUA, CONSULTADO EL 4 DE MARZO DE 2013). FOTOS A LA DERECHA: TORNILLOS DE TIERRA, CIMENTACIÓN FÁCIL Y RENTABLE CON UN IMPACTO AMBIENTAL MÍNIMO (FUENTE: CATÁLOGO DE PRODUCTOS KRINNER; NOVATEC SOLAR AG, CONSULTADO EL 18 DE SEPTIEMBRE DE 2014)

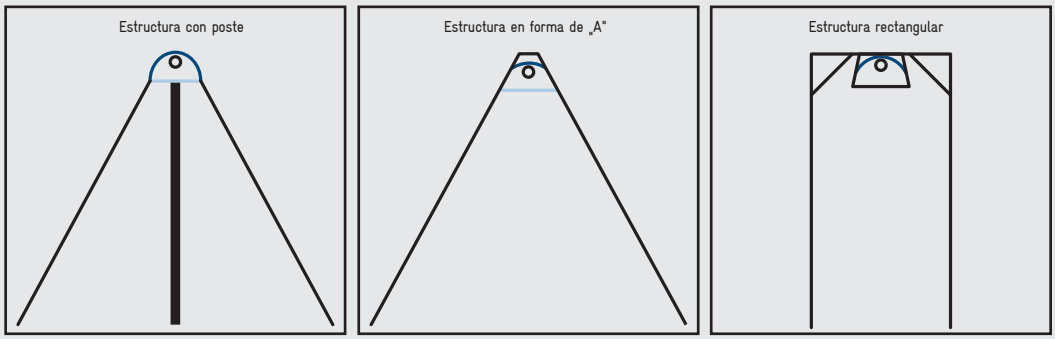


ILUSTRACIÓN 19: TIPOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

4.2. ESTRUCTURA DE SOPORTE

La estructura de metal soporta el receptor a una altura de varios metros, además de fijar el campo de espejos cerca del suelo.

La estructura sujeta los espejos, los soportes de éstos, los motores para los fines de seguimiento, y el receptor. La estructura marca los límites del campo de espejos. Se pueden usar elementos adicionales como, por ejemplo, las pasarelas de mantención y los soportes para la conducción de tuberías.

Existen tres tipos de diseño: La estructura con poste, en que una vara central soporta el receptor siendo estabilizada por cables de acero (ver la Ilustración 3, pág. 9). Esta estructura es la más liviana de los tres tipos de estructura. Luego existe la estructura tipo A (ver la Ilustración 4, pág. 10), hecha por vigas rígidas de acero, al igual que el tercer tipo de diseño que es la estructura rectangular (ver la Ilustración 20 abajo). Las últimas dos requieren más material, pero son más fáciles de instalar que la estructura con poste.

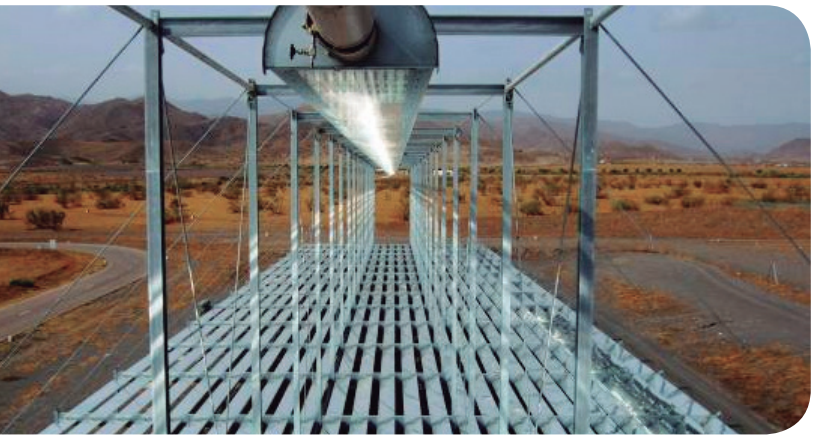


ILUSTRACIÓN 20: SOPORTE RECTANGULAR DEL COLECTOR "FRESDEMO" INSTALADO POR SOLAR POWER GROUP EN LA PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA EN ESPAÑA (ARCHIVO PRIVADO)

4.3. UNIDAD DE SEGUIMIENTO

Existen dos conceptos para controlar el seguimiento de los espejos: (a) Cada espejo es impulsado por su propio motor y control; o (b) las filas adyacentes de espejos se acoplan mecánicamente y comparten un motor.

Se aplican dos principios de seguimiento para lograr el posicionamiento preciso de los espejos, de acuerdo con el movimiento del sol durante el día.

Para las plantas PE1 y PE2, dos de las primeras plantas termosolares comerciales con tecnología Fresnel, Novatec Solar AG usó barras de acoplamiento para acoplar varias filas de espejos (ver el principio en la Ilustración 10, pág. 13). Sin embargo, la mayor parte de los otros sistemas usa un motor por fila de espejos (ver el principio en la Ilustración 9, pág. 13).

Usar un motor por fila de espejos hace más flexible su control y posicionamiento. Una ventaja de esta alternativa consiste en que permite configurar libremente los posicionamientos. Es decir, los espejos se pueden colocar, por ejemplo, en posición invertida para los fines de almacenamiento, o en posiciones de mantenimiento, tormenta o limpieza. En términos generales, esta alternativa permite un rango de giro de 360° para cada fila individual. Por el otro lado, las filas mecánicamente acopladas permiten mover grandes áreas de espejos primarios con un solo motor, por lo que este concepto probablemente será menos costoso.

ILUSTRACIÓN 21: FOTO A LA IZQUIERDA: EL PROTOTIPO DE NOVATEC SOLAR CON UNA BARRA QUE ACOPLA VARIAS FILAS DE ESPEJOS (FUENTE: SITIO WEB DE NOVATEC SOLAR, CONSULTADO EL 18 DE SEPTIEMBRE DE 2014). FOTO A LA DERECHA: FERANOVA: CADA FILA DE ESPEJOS TIENE SU PROPIO MOTOR (FUENTE: SITIO WEB DE FERANOVA GMBH, CONSULTADO EL 10 DE OCTUBRE DE 2012).

4.4. UNIDAD DE CONTROL

El control de circuito abierto permite posicionar cada espejo. Un control central se encarga de los procedimientos de encendido y apagado, y se usa como interfaz para el operador del sistema.

Un gran campo solar requiere una integración inteligente y un cableado bien hecho para conectar todos los sensores y actores, a través de distancias largas. Es uso de subsistemas modulares y descentralizados, con inteligencia local en los tableros de distribución ubicados en el campo cerca de los motores, puede reducir la necesidad de contar con un cableado hasta el control central.

El concepto de circuito abierto se usa para posicionar los espejos primarios, esto es, se calcula el posicionamiento ideal de cada espejo teniendo en cuenta su posición geométrica en relación a la posición actual del sol. Los sensores miden la posición real y permiten que la unidad de control compare la posición real con la posición teóricamente deseada.

El operador del sistema usa una unidad de control central como interfaz para controlar la estrategia de operación, esto es, el encendido y el apagado, y para mantener fijas las temperaturas de operación, etc.

4.5. ESPEJOS PRIMARIOS

Los espejos primarios – los espejos planos y largos que reflejan y concentran la luz solar hacia el receptor arriba – representan el mayor componente del colector. Típicamente, estos espejos están hechos de vidrio, vidrio laminado u hojas de aluminio, y cuentan con una estructura trasera de acero o aluminio.

4.5.1. Reflectores de los espejos primarios

Los colectores Fresnel de última generación están equipados con espejos de vidrio monolítico, laminados de vidrio-vidrio u hojas de aluminio. La elección del material del reflector tiene un fuerte impacto sobre el diseño de la estructura trasera de los espejos primarios.

4.5.2. Estructura trasera de los espejos primarios

La estructura trasera de los espejos primarios tiene que cumplir varias funciones:

- Soportar el peso de los espejos,
- Compensar el torque que resulta de la rotación de largas filas acopladas de espejos primarios,
- Soportar las fuerzas del viento en los espejos primarios,
- En el caso de espejos de vidrio: compensar las diferentes dilataciones térmicas del vidrio y del metal,
- En el caso de vidrio plano: compensar la fuerza de doblado del vidrio plano.

Puesto que existen múltiples opciones de producción industrial masiva de las partes estructurales que soportan el espejo, varios conceptos se han realizado y se están optimizando permanentemente. Los conceptos que predominan son las estructuras con láminas de metal (ver la Ilustración 22), estructuras de marco soldado (ver la Ilustración 23) y los diseños de un solo tubo de torque (ver la Ilustración 33, pág. 45).

ILUSTRACIÓN 22: DISEÑO CON LÁMINAS DE METAL (FUENTE: SITIO WEB DE NOVATEC SOLAR, CONSULTADO EL 1 DE MARZO DE 2008)

ILUSTRACIÓN 23: MARCO ESPACIAL (FUENTE: SITIO WEB DE AUSRA SOLAR, CONSULTADO EL 1 DE OCTUBRE DE 2008)

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

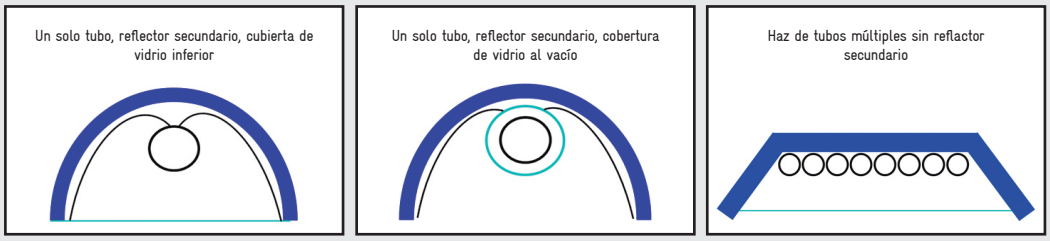


ILUSTRACIÓN 19: TIPOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

4.6. RECEPTOR

El absorbedor es el componente más importante del receptor de un colector Fresnel. Generalmente, consiste en un tubo de acero montado en la línea de foco de la luz solar que los espejos reflejan hacia arriba. Su función consiste en convertir la luz solar en calor. Los absorbedores requieren un buen aislamiento térmico y, en algunos diseños, usan un reflector secundario que ayuda a concentrar todos los rayos de sol en el absorbedor.

Según la aplicación, se usan diferentes fluidos de transferencia de calor: Para la producción de electricidad: aceite o vapor térmico; para el calor de procesos: agua a presión, vapor o aceite térmico.

El receptor es la parte del colector que convierte la luz acumulada en calor. Su principal componente es el absorbedor. Se requiere un fluido de transferencia de calor para llevar el calor a la aplicación. En algunos diseños, el receptor además cuenta con reflectores secundarios.

4.6.1. Absorbedor

Normalmente, el absorbedor del colector lineal Fresnel consiste en un solo tubo de acero con revestimiento selectivo o en un conjunto de tubos de acero. La mayoría de los fabricantes usa receptores de un solo tubo, con un tubo de absorción de mayor diámetro y un espejo secundario que refleja en el tubo absorbedor los rayos de luz desviados.

Las pérdidas de calor se reducen colocando el receptor dentro de una caja aislante con una cubierta transparente en su lado que mira hacia los reflectores primarios. Como alternativa, se puede usar un tubo de vacío parecido a los receptores de los colectores parabólicos. Está muy difundida la utilización de los tubos absorbedores de vacío, porque su uso se ha probado por mucho tiempo en los colectores parabólicos, por lo que se encuentran disponibles en buena calidad en el mercado, además de ofrecer la ventaja de reducir las pérdidas térmicas.

4.6.2. Reflector secundario

Los diseños con un solo tubo absorbedor usan los espejos secundarios para concentrar en el tubo absorbedor los rayos desviados. Como material para los espejos se usan láminas de aluminio o reflectores de vidrio espejado.

La óptica no formadora de imágenes aumenta la concentración por el concentrador secundario, por un factor de aproximadamente 2. En otras palabras, se agranda el área de destino del receptor, lo cual reduce los requisitos en cuanto a la precisión óptica de los reflectores primarios.

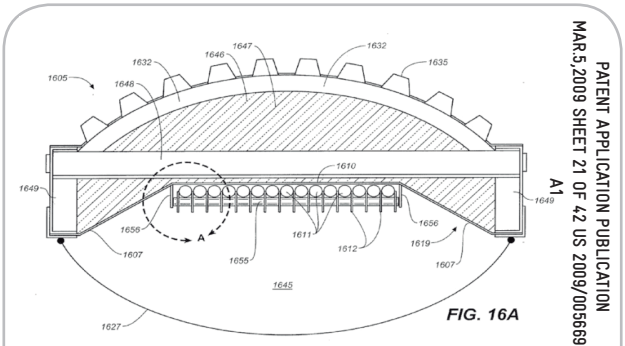


ILUSTRACIÓN 25: DISEÑO DE UN RECEPTOR CON TUBOS MÚLTIPLES (FUENTE: SITIO WEB DE AREVA, CONSULTADO EL 8 DE DICIEMBRE DE 2011)

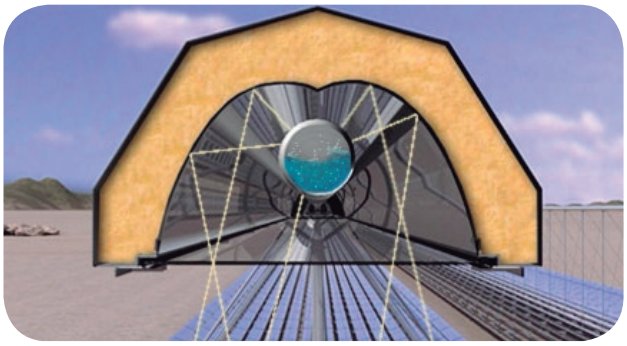


ILUSTRACIÓN 26: DISEÑO DE UN RECEPTOR CON UN SOLO TUBO, CON UN REFLECTOR SECUNDARIO Y LA CUBIERTA DE VIDRIO EN EL LADO INFERIOR (FUENTE: SITIO WEB DE NOVATEC SOLAR, CONSULTADO EL 10 DE OCTUBRE DE 2014)

4.6.3. Fluido de transferencia de calor

Para las aplicaciones de calor para los procesos industriales, los colectores Fresnel – al igual que otros colectores de concentración – se operan a temperaturas más bajas (generalmente < 250°C), y como fluidos caloportadores se usan el agua a presión, vapor directo o aceite térmico, según los requisitos del cliente con respecto a la temperatura de operación. Mientras que el agua a presión generalmente se usa como portador de calor para temperaturas de hasta aproximadamente 220°C, el aceite térmico se prefiere para las temperaturas superiores a 250°C. Por el otro lado, el vapor se usa como portador de calor especialmente en las plantas en que ya se encuentra instalada una red de vapor y donde las instalaciones solares se agregan para ahorrar en los costos de combustible.

En las centrales eléctricas, los colectores Fresnel actualmente generan el vapor directamente en los tubos absorbedores, pero se están instalando los primeros sistemas con tecnología DMS.

5. Perfiles de Empresas

5.1. Empresas desarrolladoras de tecnología Fresnel

Las empresas suministradoras de la tecnología de colectores Fresnel representan una industria muy joven, con pocos líderes en el mercado y muchas empresas emergentes en diferentes fases de desarrollo.

Actualmente, existen empresas en etapas muy diferentes en cuanto al desarrollo tecnológico de las tecnologías lineales Fresnel. La tabla 2 enumera todas las empresas conocidas por los autores[11].

De la lista anterior, los autores eligieron 7 empresas que ellos consideran avanzadas con respecto al volumen o al número de proyectos de CSP Fresnel realizados o en construcción. A continuación, estas empresas se describen con más detalle.

TABLA 2: LISTA ALFABÉTICA DE LOS PRODUCTORES DE COLECTORES LINEALES FRESNEL

NOMBRE	PAÍS	SITIO WEB
AIRA Termosolar	España	www.airatermosolar.es/
Alsolen	Francia	www.alsolen-alcen.com/fr
AM Brain	Alemania	www.am-brain.de/
Areva Solar	USA/Francia	www.areva.com/
BBEnergy	Sudáfrica	www.bbe.co.za/energy/solar/
Chromasun	USA	www.chromasun.com
CNIM	Francia	www.cnim.com
Elianto CSP	Italia	www.eliantocsp.com
FERA Srl	Italia	www.ferasolar.it
Feranova	Alemania	www.feranova.com
Fresnex	Austria	www.fresnex.com
Glayx Tech	Italia	www.glayx.com
Heliodynamics	UK	www.heliodynamics.com
Himin Solar Energy Group	China	www.himin.com
Hitachi Zosen	Japón	www.hitachizosen.co.jp/english/news/2013/04/000876.html
Industrial Solar	Alemania	www.industrial-solar.de
INERSUR	España	www.inersur.com
KGDS Renewable Energy Private Limited (KGDS)	India	http://solar.kgisl.com
Lanzhou Dacheng	China	www.lzdcsolar.com/en/
Mulk Enpar	India	www.mulkre.com
Novatec Solar – oficina regional en Chile[12]	Alemania	www.novatecsolar.com
SkyFuel	USA	www.skyfuel.com
Solar Euromed SAS	Francia	www.solareuromed.com
Solar Power Group – con actividades en Chile[13]	Alemania	www.solarpowergroup.com
Solar Space Frame Industrial	Tailandia	http://solarspaceframe.com/CLFR.htm
Soltigua	Italia	www.soltigua.com

11 Favor tener presente que esta lista contiene la información con que cuentan los autores y no pretende ser exhaustiva.

12 Novatec Solar, Monseñor Eyzaguirre 620, Ñuñoa, Santiago, Tel. +56 9 881 04 408

13 Esta empresa está desarrollando una planta CSP Fresnel para Mejillones (central eléctrica de carbón).

5.1.1. Areva Solar

Empresa	AREVA SOLAR
Sitio web	www.areva.com/EN/solar-220/areva-solar.html
Producto Fresnel	Colectores para la CSP, sólo en instalaciones grandes
Altura del colector	27m sobre el nivel de los espejos
Ancho del colector	106m
Tipo de receptor	Tubos múltiples, hoja de vidrio en la parte inferior, sin reflector secundario
Número de filas de espejos por serie	33
Ancho del espejo	2,2m
Apertura del área seguida por un solo motor	300m²
Personal en CSP/Fresnel	>100

Proyectos de referencia:

- 2004/2008 Central eléctrica de carbón en Liddell, Australia, complementada con energía solar. Primera fase: 1 MWel, segunda fase: 3Mwel.
- 2008 Kimberlina, Bakersfield, CA, USA; 5MWel, vapor sobrecalentado en 2010.
- 2013 Proyecto Sundt Solar Boost, Tucson, AZ, USA; aumento de potencia de 5MW para una central eléctrica de carbón.
- 2013 Proyecto Kogan Creek, Australia; aumento de potencia de 44MW para una central eléctrica de carbón.
- 2013/2014 Reliance Power, Dhursar, Rajastán, India. 2 x 125MWel.

La empresa Areva Solar con sede en California, USA, es la única empresa que usa un tipo de receptor con tubos múltiples sin vacío. La empresa aplica el concepto de vapor directo de un solo paso, para producir vapor sobrecalentado. Con una altura de instalación de aproximadamente 30m, el colector Areva es lejos el más alto. Además, con el proyecto en Rajastán, Areva asumió el liderazgo en cuanto a la superficie total de reflectores instalados.

En Albuquerque, NM, USA, Areva está operando un circuito de ensayo con sales fundidas como fluido caloportador, desarrollando el concepto de la tecnología basada en el uso de sales fundidas (DMS).

ILUSTRACIÓN 27: AREVA SOLAR: PLANTA DE RAJASTÁN (FUENTE: POWER MAGAZINE, CONSULTADO EL 12 DE MAYO DE 2013)

ILUSTRACIÓN 28: AREVA SOLAR: PLANTA DE RAJASTÁN (FUENTE: IBÍD.)

5.1.2. Novatec Solar

Empresa	NOVATEC SOLAR
Sitio web	www.novatecsolar.com
Producto Fresnel	Colectores para la generación de energía eléctrica y calor de procesos
Altura del colector	7,4m sobre el nivel de los espejos
Ancho del colector	16,56m
Tipo de receptor	Vapor saturado: un solo tubo absorbedor, hoja de vidrio en la parte inferior, reflector secundario. Vapor sobrecalentado: un solo tubo absorbedor con una caja de vidrio al vacío, reflector secundario.
Número de filas de espejos por serie	16
Ancho del espejo	0,7m
Apertura del área seguida por un solo motor	256,8m²
Personal en CSP/Fresnel	45

Proyectos de referencia:

- 2009 PE 1, Puerto Errado, España, 1,4MWel
- 2012 PE 2, Puerto Errado, España, 30MWel
- 2012 Liddell, Australia, integración en una central de carbón, 9Wth

El diseño de planta más reciente, de la empresa alemana Novatec, cuenta con vapor sobrecalentado a una temperatura máxima de 540°C, 100bar, con un colector tipo "Supernova". El tipo de colector NOVA-1 está diseñado para la producción directa de vapor saturado y usa un solo tubo absorbedor sin vacío, con un reflector secundario y una hoja de vidrio en su parte inferior.

Un circuito de ensayo para la tecnología DMS en la central española PE 1 de Novatec empezó a funcionar en septiembre de 2014.

Según informa Novatec, en el año 2013 su planta PE 2 estuvo disponible en un 99,9%. Esta planta opera de manera totalmente automatizada, encendiéndose con una sola pulsación de un botón. La limpieza de los espejos primarios se realiza con un robot de limpieza (ver la Ilustración 48).

Según Novatec, las cifras de los costos de vapor solar ascienden a unos 2 a 3€cent/kWh en los lugares con buena radiación directa normal.

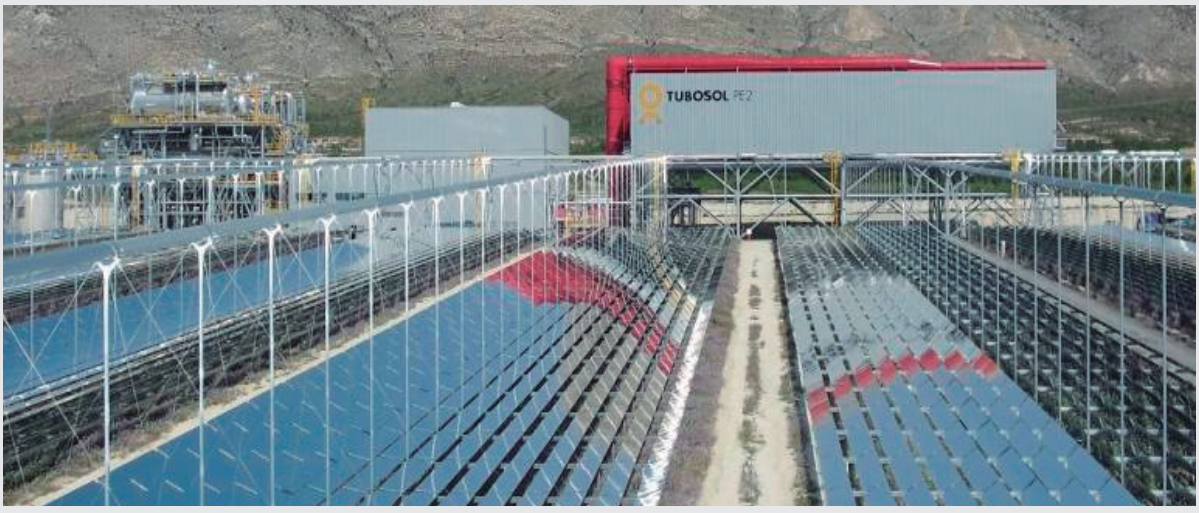


ILUSTRACIÓN 29: PLANTA PE 2, DE 30 MWEL, NOVATEC (FUENTE: RECHARGE NEWS, INFORMACIÓN DEL 8 DE OCTUBRE DE 2012)

5.1.3. Industrial Solar

Empresa	INDUSTRIAL SOLAR
Sitio web	www.industrial-solar.de
Producto Fresnel	Colectores para calor de procesos
Altura del colector	4m
Ancho del colector	7,5m
Tipo de receptor	Un solo tubo de vacío con un reflector secundario
Número de filas de espejos por serie	11
Ancho del espejo	0,5m
Apertura del área seguida por un solo motor	24m²
Personal en CSP / Fresnel	16

Industrial Solar sólo ofrece colectores para la generación de calor para los procesos industriales y para los proyectos de refrigeración solar. El fluido caloportador preferido es el agua, ya sea dentro de un circuito de agua a presión o dentro de una configuración de generación directa de vapor, con el objeto de directamente suministrar vapor saturado al cliente. La empresa también ofrece el aceite térmico como fluido caloportador, si el cliente requiere temperaturas más altas.

El principio de diseño preferido son las instalaciones en el techo de edificios industriales (ver la Ilustración 17). Todos los componentes de los colectores se pueden manejar sin necesidad de maquinaria pesada, lo cual es un factor importante en la instalación en techos. La producción de los espejos primarios se realiza en el lugar con personal local.

Industrial Solar es la empresa con el número más alto de proyectos Fresnel realizados a nivel mundial. Desde 2005, la empresa ha instalado proyectos en Alemania, Italia, España, Túnez, Abu Dabi, Catar y Sudáfrica.

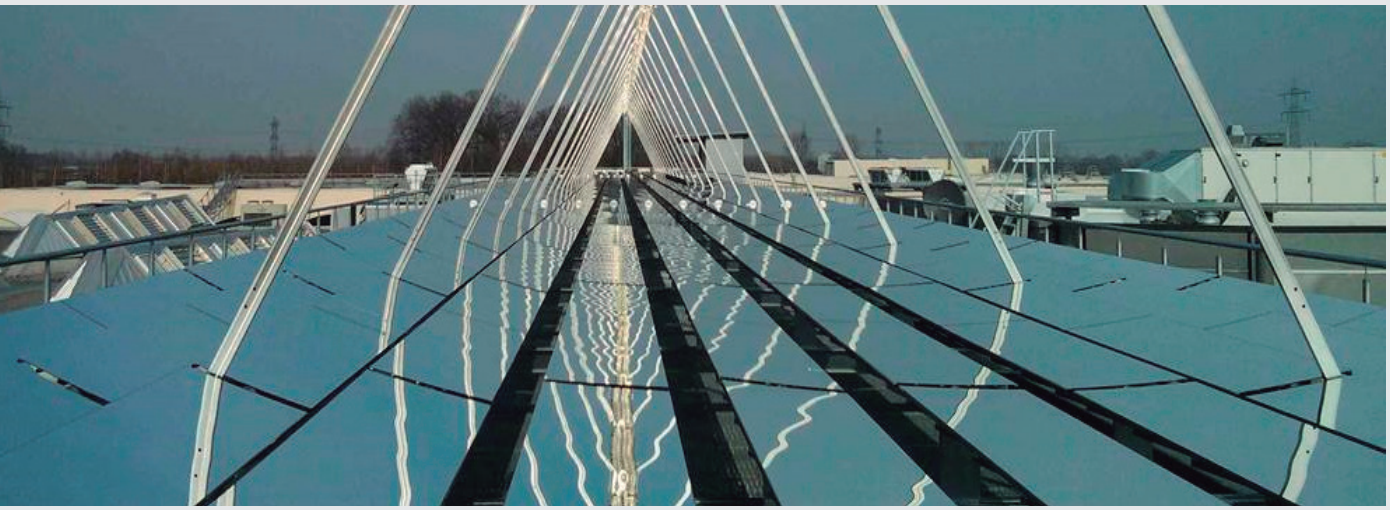


ILUSTRACIÓN 30: INSTALACIÓN EN EL TECHO DE UN EDIFICIO INDUSTRIAL, DE INDUSTRIAL SOLAR (FUENTE: SITIO WEB DE INDUSTRIAL SOLAR GMBH, CONSULTADO EL 10 DE OCTUBRE DE 2014)

5.1.4. CNIM

Empresa	CNIM
Sitio web	www.cnim.com
Producto Fresnel	Centrales eléctricas "llave en mano"
Altura del colector	Información no disponible
Ancho del colector	Información no disponible
Tipo de receptor	Un solo tubo sin vacío, con reflector secundario y hoja de vidrio en la parte inferior
Número de filas de espejos por serie	14
Ancho del espejo	1m
Apertura del área seguida por un solo motor	900m²
Personal en CSP / Fresnel	15

Desde 2010, CNIM opera un módulo de demostración con 360kWth en La Seyne-sur-Mer (cerca de Tolón, Francia).

Se proyecta que una primera planta de demostración se construirá durante el verano de 2014 y que su puesta en marcha será a fines del 2014. Una primera planta comercial (9MWel) está en proceso de desarrollo en la región de Cerdaña, Francia (el contrato de compra de energía con el gobierno francés se firmó en el verano de 2012). La construcción está prevista para 2015/2016 y la puesta en marcha para 2016.

ILUSTRACIÓN 31: CNIM (FUENTE: SITIO WEB DE CNIM ENERGY, CONSULTADO EN FEBRERO DE 2014)

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

5.1.5. Solar Euromed SAS

Empresa	SOLAR EUROMED SAS
Sitio web	www.solareuromed.com
Producto Fresnel	Generación de energía eléctrica y de calor para procesos industriales
Altura del colector	Información no disponible
Ancho del colector	Información no disponible
Tipo de receptor	Un solo tubo sin vacío, con un reflector secundario
Número de filas de espejos por serie	12
Ancho del espejo	Información no disponible
Apertura del área seguida por un solo motor	Información no disponible
Personal en CSP / Fresnel	50

Solar Euromed es una empresa familiar con sede en Dijon, Francia. Su primer prototipo de 250kWth, construido en 2012, lleva el nombre "Augustin Fresnel". Una característica especial del diseño de los colectores es que la estructura trasera de los espejos consiste en un perfil de aluminio extruido (ver la Ilustración 22). "Alba Nova 1" es un proyecto de 12MW a ser instalado en Córcega.

ILUSTRACIÓN 32: PROTOTIPO DE SOLAR EUROMED (FUENTE: SITIO WEB DE SOLAR EUROMED SAS, CONSULTADO EL 24 DE FEBRERO DE 2014)

5.1.6. Feranova

Empresa	FERANOVA GMBH
Sitio web	www.feranova.com
Producto Fresnel	Generación de energía eléctrica y de calor para procesos industriales
Altura del colector	Información no disponible
Ancho del colector	Información no disponible
Tipo de receptor	Información no disponible
Número de filas de espejos por serie	10 a 20 filas
Ancho del espejo	Información no disponible
Apertura del área seguida por un solo motor	Información no disponible
Personal en CSP / Fresnel	Información no disponible

Feranova es una empresa con sede en Alemania que usa espejos tipo sándwich, hechos de aluminio, y un receptor con un tubo de vacío. Una primera planta piloto se construyó en 2013 en una fábrica de cemento en Turquía.

ILUSTRACIÓN 33: ESPEJOS PRIMARIOS (FUENTE: SITIO WEB DE PRONOVA, CONSULTADO EN OCTUBRE DE 2014)

ILUSTRACIÓN 34: INSTALACIÓN DE FERANOVA EN TURQUÍA EN 2013 (FUENTE: SITIO WEB DE FERANOVA, CONSULTADO EN OCTUBRE DE 2014)

5.1.7. Soltigua

Empresa	SOLTIGUA
Sitio web	www.soltigua.com
Producto Fresnel	Generación de energía eléctrica y de calor para procesos industriales
Altura del colector	Información no disponible
Ancho del colector	5,24m
Tipo de receptor	Tubo de acero inoxidable con revestimiento selectivo
Número de filas de espejos por serie	Información no disponible
Ancho del espejo	Información no disponible
Apertura del área seguida por un solo motor	Información no disponible
Personal en CSP / Fresnel	Información no disponible

Soltigua es una empresa familiar italiana que construyó su primer prototipo Fresnel en 2010.

Usando un solo tubo absorbedor sin vacío con un reflector secundario, la empresa anunció una eficiencia térmica del 52% (temperatura de entrada 165°C, temperatura de salida 180°C, radiación directa normal 900W/m^2, temperatura de ambiente 30°C) [fuente: "Parabolic or Fresnel?" artículo en www.soltigua.com/download/, de mayo 2011].

En 2012, Soltigua ganó un proyecto de demostración, financiado por la Comisión Europea, para la generación de calor para procesos industriales en una empresa productora de ladrillos en Italia. El proyecto considera un área de apertura de 2.640m^2, una parte con aceite térmico como fluido caloportador (alrededor de 1000m²) que se puso en marcha en 2012, y otra parte con vapor directo (alrededor de 1600m²) que se puso en marcha en 2013.

ILUSTRACIÓN 34: INSTALACIÓN DE FERANOVA EN TURQUÍA EN 2013 (FUENTE: SITIO WEB DE FERANOVA, CONSULTADO EN OCTUBRE DE 2014)

5.2. EMPRESAS EPC

La mayoría de las plantas existentes de CSP Fresnel fueron planificadas y construidas por las mismas empresas que suministran esta tecnología. Otra opción consiste en contratar a una empresa EPC (ingeniería, aprovisionamiento, construcción). Existen varias empresas EPC para las tecnologías CSP (ver la lista abajo). Sin embargo, son pocas las que tienen experiencia en la tecnología Fresnel.

En el negocio internacional de las centrales eléctricas llave en mano, las empresas EPC (ingeniería, aprovisionamiento, construcción) muchas veces actúan de contratista principal. También para los proyectos CSP, las empresas EPC son una opción viable. En la realidad, sin embargo, la mayor parte de las centrales eléctricas CSP – especialmente, las plantas a pequeña escala – normalmente la realizan las mismas empresas que suministran esta tecnología, sin hacer uso de una empresa EPC externa. **Todos los proveedores de tecnología solar enumerados en la sección 5.1. anterior también ofrecen contratos EPC.**

La siguiente tabla incluye las empresas EPC más importantes que cuentan con conocimientos específicos en CSP[14]:

Generalmente, casi todas las empresas EPC con experiencia en la CSP distinta a las tecnologías Fresnel son capaces de ejecutar con éxito cualquier proyecto de CSP Fresnel.

A continuación, se presenta en más detalle a la empresa M+W Group que, según los autores, es la única empresa EPC externa a nivel mundial que recientemente participó en una planta comercial Fresnel. También se entrega una descripción de Fichtner Solar GmbH que, si bien no es una empresa EPC sino una empresa de ingeniería, cuenta con experiencia especializada por su participación en proyectos recientes.

Tabla 3: Lista de empresas EPC (ingeniería, aprovisionamiento, construcción) con experiencia en CSP

NOMBRE	PAÍS	SITIO WEB
Abener / Abengoa / Teyma – presencia en Chile	España	www.abener.es, www.abengoasolar.com, www.teymausa.com
Acciona	España	www.acciona.com
Bechtel	USA	www.bechtel.com
China Huadian	China	en.chec.com.cn
Cobra	España	www.grupocobra.com
Comsa Emte	España	www.comsaemte.com
Elecnor	España	www.elecnor.com
Fichtner Solar GmbH*	Alemania	www.fichtnersolar.com
Habtoor Leighton Specon	Dubái	habtoorspecon.com
Kraftanlagen München	Alemania	www.ka-muenchen.de
Lauren	USA	www.laurenec.com
M+W Group	Alemania	www.mwgroup.net
Orascom	Egipto	www.orascomci.com
Sener	España	www.sener.es
Solar Reserve	USA	www.solarreserve.com
TSK Flagsol	Alemania	www.Flagsol.com

* Empresa de ingeniería con experiencia en Fresnel; no es una empresa EPC.

14 Favor tener presente que esta lista contiene la información con que cuentan los autores y no pretende ser exhaustiva.

Empresa	M+W GROUP

M+W Group (www.mwgroup.net) es la empresa más conocida de EPC Fresnel. Este grupo desarrolló y construyó la planta de CSP Fresnel PE 1 en Murcia, España, conjuntamente con Novatec como el proveedor de la tecnología. M+W Group es propiedad del grupo austríaco Stumpf, con actividades en muchas áreas como, por ejemplo, la electrónica, fotovoltaica, las ciencias de la vida y la automatización. La oficina central de M+W se encuentra en Stuttgart, Alemania.

Algunas características de M+W Group:

- Ofrece servicios tanto en colectores parabólicos como en tecnología Fresnel.
- Rango de potencia preferido: 1-30 MW.
- Ofrece EPC también para los proyectos de generación de calor de procesos.
- Personal: 8000 (todo el grupo).
- Volumen de ventas en 2012: más de € 2 mil millones.

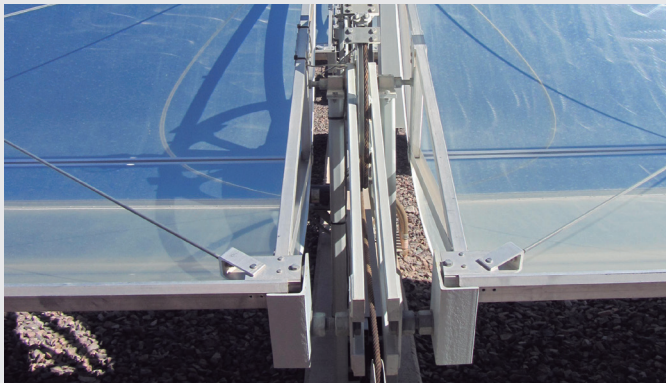
Empresa	FICHTNER SOLAR GMBH

Fichtner Solar GmbH es una empresa alemana de ingeniería independiente con una fuerte participación en los proyectos de CSP Fresnel. Su gama de servicios incluye los estudios de factibilidad, diseños conceptuales, procesos de due diligence técnico, preparación de documentos de especificación y licitación, negociación de contratos, gestión de proyectos durante la construcción, monitoreo de rendimiento/operaciones y verificación del cumplimiento del proyecto.

Algunas características de la empresa Fichtner Solar GmbH:

- Rango de potencia preferido: entre 1 y varios cientos de MW.
- Ofrece servicios también para los proyectos de generación de calor de procesos.
- Personal: en total, 1800; solar, 20-35.
- Volumen de ventas en 2012: en total, € 200m, solar € 6-15m (valores estimados).

6. Tendencias del Desarrollo Tecnológico



Se están realizando grandes esfuerzos e inversiones en el desarrollo y la investigación para mejorar aún más los colectores Fresnel y su factibilidad económica.

Se pueden observar los siguientes objetivos más importantes:

- **Reducir los costos de los componentes y sistemas mediante la estandarización y una economía de escala.**
- **Aumentar cada vez más el grado de fabricación local.**
- **Disminuir el uso de materiales (acero).**
- **Incrementar las temperaturas de operación para mejorar la eficiencia de las turbinas.**

Este capítulo se enfoca en las tendencias de desarrollo tecnológico de los colectores Fresnel dentro de los próximos 1, 3 y 5 años (futuro inmediato / cercano / eventual).

Tanto los colectores solares de concentración como los sistemas que los incluyen son el tema de muchas actividades de investigación y desarrollo. Algunas de estas actividades están relacionadas con los colectores solares de concentración en general, principalmente en el área del desarrollo de materiales (espejos, tratamiento de la superficie del espejo, superficies optimizadas de los tubos absorbedores), diseño general del sistema, bloque de potencia, fluidos de transferencia de calor y conceptos de almacenamiento. Si bien algunas de estas actividades no se refieren exclusivamente a la tecnología Fresnel, el presente capítulo incluirá algunas de ellas.

6.1. COMPONENTES PARA COLECTORES

El colector consiste de seis grandes grupos de componentes: base, estructura de soporte, unidad de seguimiento, unidad de control, espejos primarios y el receptor consistente en los tubos de absorción y, opcionalmente, un reflector secundario.

6.1.1. Bases

En general, las bases se optimizan para cada proyecto de acuerdo con las necesidades locales. Para cada proyecto, se desarrolla un diseño que considera las diferentes condiciones de suelo y las cargas de viento, a fin de encontrar la solución de cimentación más eficiente en términos de materiales y costos.

Si bien los sistemas montados en tierra ya usan diferentes estrategias para realizar sistemas de cimentación rentables, es probable que la integración de los colectores Fresnel en edificios industriales para aplicaciones de calor de procesos también lleve a algunos nuevos desarrollos en el futuro.

Cabe esperar que la ingeniería integrada de edificios industriales y colectores resulte en una estructura integrada de soporte, por ejemplo donde las principales vigas del edificio además sirven de base para el colector.

6.1.2. Estructura de soporte

Actualmente, existen varios conceptos de diseño para los colectores Fresnel, de los cuales destacan los tres conceptos descritos en la sección 4.2. Independientemente de las diferentes estrategias de diseño (sistemas más grandes para los montajes de tierra, sistemas más pequeños para el montaje en techos), las empresas están desarrollando diseños más exactos y más sencillos. Entre los objetivos más importantes están la reducción del material y del sombreamiento.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

ILUSTRACIÓN 36: DISEÑO TIPO PUENTE COLGANTE (FUENTE: SITIO WEB DE ALCEN, SUBSIDIARIA DEL GRUPO ALSOLEN, CONSULTADO EN OCTUBRE DE 2014)

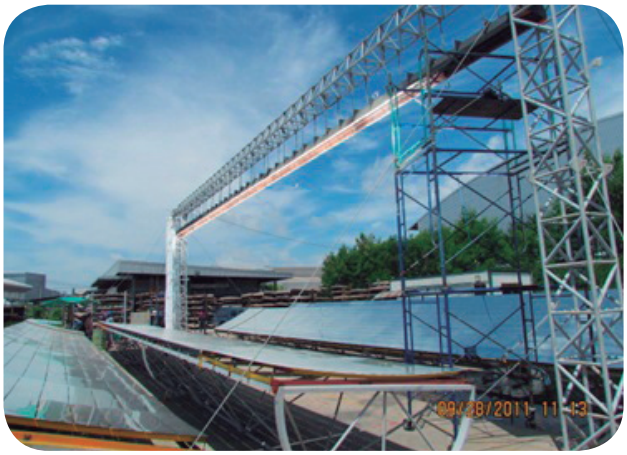


ILUSTRACIÓN 37: MARCO ESPACIAL (FUENTE: SOLARSPACEFRAME.COM, CONSULTADO EL 9 DE AGOSTO DE 2011)

Las fotos abajo muestran dos nuevos enfoques interesantes. Si bien el diseño tipo puente colgante llama la atención por su aparente falta de peso, está por verse si a largo plazo ofrece estabilidad y precisión suficientes para el montaje del receptor. El diseño tipo marco espacial para el montaje del receptor es un enfoque directo que permite cubrir grandes distancias. Su rentabilidad está por comprobarse.[15]

6.1.3. Unidad de seguimiento

Con respecto al mecanismo de seguimiento, se pueden distinguir dos grandes principios: Por un lado, están los conceptos con un gran número de pequeños motores que necesitan poco espacio y potencia, y que son baratos (por motor). Por el otro lado, están los conceptos con menos motores. Estos dispositivos son más grandes y más caros (por motor), pero probablemente más baratos en total. Si están integrados en las filas de espejos, requieren más espacio, por lo que los espacios entre los espejos tienen que ser más grandes. En algunos casos, si se acopla mecánicamente un gran número de espejos, se requieren estructuras más rígidas para soportar los espejos.

Cabe esperar que en los próximos años aparezcan en el mercado los proveedores especializados en componentes, para entregar soluciones adaptadas para el seguimiento Fresnel.

6.1.4. Unidad de control

En el futuro cercano, se usarán cada vez más los sistemas comunes de control industrial (por ej. Siemens, Allen Bradley), debido a su mayor disponibilidad y al diseño más sencillo de su interfaz entre el control del colector y el sistema de control del cliente (por ej., en un parque industrial con una demanda de calor para procesos industriales).

Hasta la fecha, sólo se han realizados proyectos con controles de circuito abierto. Cabe esperar que en el futuro haya también conceptos con controles de circuito cerrado.

15 Según PSE AG, la fecha correcta es noviembre de 2014 (nota de la traductora).

6.1.5. Espejos primarios

Reflectores de los espejos primarios

Actualmente, están disponibles en el mercado tanto los colectores Fresnel con espejos de vidrio monolítico como aquéllos con laminados de vidrio-vidrio u hojas de aluminio. En cuanto a los reflectores alternativos, se está estudiando su reflectividad especular y su fiabilidad por 30 años de uso al aire libre. La elección del material del reflector tiene un fuerte impacto en el diseño de la estructura trasera de los espejos primarios.

En el futuro cercano, habrá una variedad de conceptos diferentes, incluyendo los reflectores con una superficie delantera de aluminio, vidrio fino o los reflectores poliméricos. A largo plazo, habrá también revestimientos de superficie con propiedades autolimpiantes y/o altamente resistentes al rayado.

Estructura trasera de los espejos primarios

Los espejos primarios constituyen la mayor parte del material y peso de un colector Fresnel. Por lo tanto, mejorar su diseño y reducir su costo es un tema central.

Se seguirán perfeccionando los conceptos existentes y establecidos para aumentar la precisión de los espejos y reducir los costos de material y fabricación. Otro objetivo es el aumento de la fabricación local, a fin de reducir los gastos de transporte.

La Ilustración 38 muestra una estructura trasera de aluminio extruido que podría llegar a ser una alternativa útil, si aumentan las tasas de producción.

ILUSTRACIÓN 38: ESTRUCTURA TRASERA DE ALUMINIO EXTRUIDO (FUENTE: TV / VIDEO PUBLICITARIO, SOLAR EUROMED, INFORMACIÓN DE OCTUBRE DE 2014)

6.1.6. Receptor

Reflector secundario

Los conceptos de diseño con un solo tubo de absorción usan los espejos secundarios para reflejar en el tubo de absorción los rayos desviados. Como material para los espejos se usan las láminas de aluminio o los reflectores de vidrio espejado. Actualmente, los desarrollos de algunos proveedores apuntan a aumentar la reflectividad y la resistencia mecánica.

Una idea de desarrollo a largo plazo tiene por objeto integrar, total o parcialmente, el reflector secundario dentro de una envoltura más grande de vidrio de vacío.

Materiales y diseño del absorbedor

Areva Solar es el único fabricante establecido que usa receptores de varios conductos con tubos de absorción de pequeños diámetros, y sin reflectores secundarios, en los colectores de las plantas generadoras de vapor directo. Por el otro lado, Areva Solar también está trabajando en el desarrollo de receptores para un concepto basado en el uso de sales fundidas. En este concepto, se usarían tubos de vacío y reflectores secundarios [Areva Solar, Solarpaces 2012].

La mayor parte de los productores de colectores usa receptores de un solo conducto, con un tubo de absorción de un diámetro más amplio y un espejo secundario que refleja en el tubo de absorción los rayos de luz desviados.

Se usan con frecuencia los tubos absorbedores de vacío, porque hace mucho tiempo que su calidad se ha demostrado en los colectores parabólicos, por lo que se encuentran disponibles en buena calidad en el mercado. Sólo los productores / proveedores mismos siguen desarrollando los tubos de vacío. Se ha logrado mejorar tanto la estabilidad térmica de los revestimientos selectivos como la eficiencia óptica y térmica de los receptores de vacío.

También se está trabajando en el mejoramiento de los revestimientos de los tubos sin vacío y de los receptores de varios tubos, para que resistan a las altas temperaturas de operación.

Es probable que aparecerán en el mercado en el futuro cercano algunos productores/proveedores nuevos de tubos receptores con y sin vacío.

Para las centrales termosolares, los productores de colectores Fresnel los están desarrollando para temperaturas más altas, de hasta 600°C, para mejorar la eficiencia de las turbinas. Los tubos absorbentes de vacío con revestimientos selectivos, resistentes a temperaturas altas, se usan para reducir las pérdidas térmicas (Novatec y Areva). Actualmente, como portador de calor al interior del absorbedor, se están estudiando los conceptos de generación directa de vapor y los conceptos basados en el uso de sales fundidas (Novatec y Areva).

ILUSTRACIÓN 39: FOTO A LA IZQUIERDA: TUBO ABSORBEDOR DE VACÍO PARA VAPOR SOBRECALENTADO (FUENTE: PRESENTACIÓN DE NOVATEC SOLAR, 4° FORO SAUDÍ DE ENERGÍA SOLAR, 9 DE MAYO DE 2012). FOTO A LA DERECHA: ABSORBEDOR DE TUBOS MÚLTIPLES (FUENTE: SITIO WEB DE AREVA SOLAR).

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

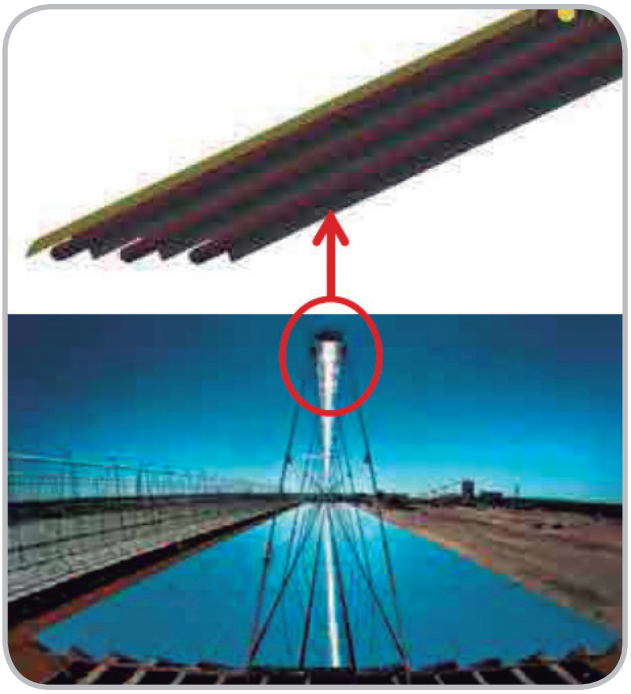


ILUSTRACIÓN 40: IDEA DE UN CONCEPTO BASADO EN EL USO DE SALES FUNDIDAS, DE AREVA SOLAR, CON VARIOS TUBOS EVACUADOS DE ABSORCIÓN Y REFLECTORES SECUNDARIOS (FUENTE: IBÍD.)

Para las aplicaciones que generan calor para procesos industriales, los colectores Fresnel – al igual que otros colectores de concentración – se operan a temperaturas más bajas (generalmente <250°C). Como fluidos caloportadores se usan el agua a presión, el vapor directo o el aceite térmico, según los requisitos de cliente en cuanto a la temperatura de operación. Mientras que es común el uso de agua a presión como portadora de calor en el rango de temperaturas por debajo de 220°C, se prefiere el aceite térmico para las temperaturas de hasta 350°C. Por el otro lado, se usa vapor como portador de calor especialmente si la instalación permite incorporar redes de vapor ya existentes.

6.2. DISEÑO DE LOS COLECTORES

Apertura

En el corto plazo, no se esperan grandes avances en el diseño de la apertura, puesto que ya existen diseños buenos y probados. Sólo se realizarán algunos ajustes menores para evitar/reducir el sombreamiento y bloqueo.

El concepto de los colectores lineales compactos Fresnel consiste en la distribución alternante de espejos primarios adyacentes y receptores múltiples (ver la ilustración abajo). Este concepto aún no se está comercializando, pero sí se han realizado algunos estudios al respecto.[16]

Otras optimizaciones teoréticas han sido propuestas por Chaves y Collares-Pereira (ver Chaves 2010) y podrían ser realizadas en el futuro. Sin embargo, la optimización del diseño de la apertura, por ejemplo la búsqueda de una mayor eficiencia óptica mediante el ajuste del ancho del espejo o de las distancias entre los espejos o de las curvaturas de cada fila de espejos, entre otros, muchas veces tiene desventajas económicas en términos de uso del suelo y de los costos de la inversión en medios de producción y logística.

Material

El desarrollo futuro llevará a una optimización con respecto al uso de materiales (kg/m²) en general. Lo más probable es que existirán diseños diferentes para las áreas con una alta carga de viento (costa)

16 "mirrors pointing to receiver 1" = espejos dirigidos hacia el receptor 1, "mirrors alternating inclinations" = espejos con inclinaciones alternantes, "mirrors pointing to receiver 2" = espejos dirigidos hacia el receptor 2 (nota de la traductora).

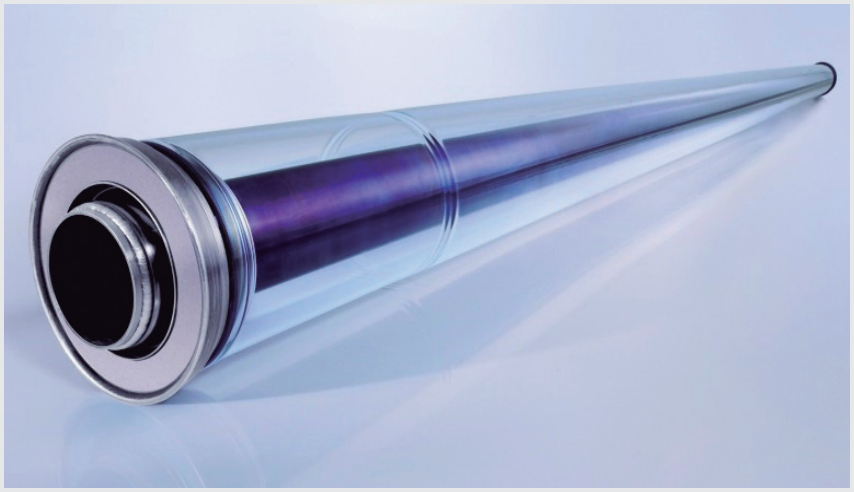


ILUSTRACIÓN 41: FOTO A LA IZQUIERDA: RECEPTOR DE UN COLECTOR FRESNEL DE INDUSTRIAL SOLAR QUE USA UN SOLO TUBO ABSORBEDOR DE VACÍO (FUENTE: FOTO EN DOHA, INSTALACIÓN DE REFRIGERACIÓN SOLAR DE 700 KW, NOVIEMBRE DE 2010). FOTO A LA DERECHA: TUBO ABSORBEDOR DE VACÍO EN UN COLECTOR DE CALOR PARA PROCESOS INDUSTRIALES (FUENTE: SITIO WEB DE SCHOTT SOLAR, CONSULTADA EN OCTUBRE DE 2014).

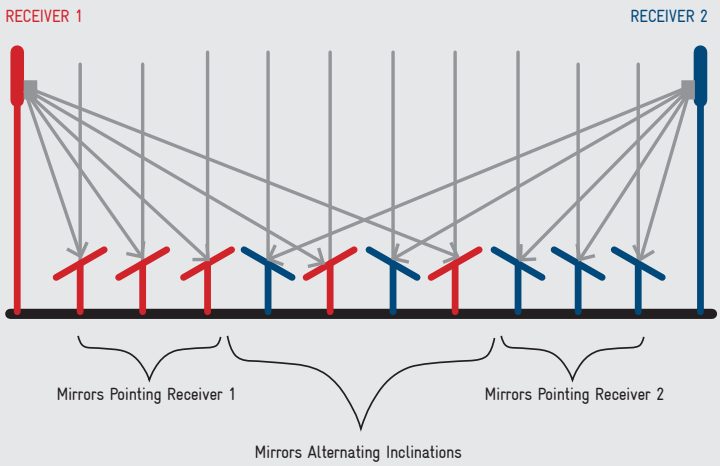


ILUSTRACIÓN 42: ESQUEMA DEL REFLECTOR LINEAL COMPACTO FRESNEL (FUENTE: MONTES, 2012)[16]

Producción

El aumento de los volúmenes de producción resultará en una mayor automatización y producción en masa de los componentes y, además, permitirá mejorar el aseguramiento de la calidad. Aumentará cada vez más la producción a nivel local, lo que reducirá el costo de transporte y llevará a una mayor creación de valor local.

Instalación

La instalación será cada vez más fácil y rápida, debido a la simplificación del diseño y el menor número de piezas. La transferencia de tecnología permitirá instalar los sistemas con mano de obra local en vez de especialistas altamente calificados.

Mantenimiento

En cuanto al mantenimiento, se distinguirá entre las piezas de desgaste y los repuestos.

Las piezas de desgaste son aquellas piezas que tienen que reemplazarse después de un cierto tiempo de operación: juntas, correas, y posiblemente los soportes y las juntas de expansión.

Los repuestos son aquellas piezas que se reemplazan en caso de alguna falla, por ejemplo los motores, sensores, bombas, PLC, UPS.

Limpieza

En comparación con otros sistemas solares, los sistemas para la limpieza de los colectores Fresnel ya están muy avanzados, debido al diseño simplificado con filas largas y uniformes de espejos planos. Ya existen robots de limpieza automática con un bajo consumo de agua [Novatec Solar], y otros proveedores seguirán en esta línea.

Finalmente, el tratamiento superficial de los espejos primarios hará que las superficies sean menos adherentes, por lo que las necesidades de limpieza serán más bajas (superficies autolimpiantes).

Estandarización

La estandarización es un proceso constante y los sistemas de energía solar de concentración pueden beneficiarse de la estandarización de los sistemas solares de consumo masivo que ya existe en el mercado, por ej. las certificaciones EN/ISO, SRCC o Solar Keymark. La estandarización es un aspecto central que permite comparar las diferentes tecnologías y productos, ofreciendo una base de información fiable y transparente que ayuda a los desarrolladores de proyectos y clientes en su decisión.

Puesta en marcha

Hasta la fecha, la implementación muchas veces se realiza sobre la base de una garantía de rendimiento. Esta garantía seguirá siendo la opción preferida en los próximos años pero, a la larga, será reemplazada por modelos de contratación tales como la entrega de servicios de calefacción en vez de equipos.

Lo anterior afectará a los proveedores, contratistas EPC y clientes, llevando a modelos de negocios totalmente nuevos con respecto al financiamiento.

6.3. CONCEPTOS DEL SISTEMA

6.3.1. Fluido de transferencia de calor

Para la tecnología CSP, todas las instalaciones más grandes usan la generación directa de vapor. Hay una tendencia hacia el vapor sobrecalentado en los proyectos actuales, y las dos empresas más grandes de CSP Fresnel están muy activas en la investigación de los sistemas basados en el uso de sales fundidas. Actualmente, no se está estudiando el CO2 como fluido de transferencia de calor.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

En las aplicaciones destinadas a generar calor para procesos industriales, la elección del fluido caloportador depende en gran medida del sistema del cliente, para facilitar su integración en los procesos. Las opciones, que además son el estándar en la industria, son el agua a presión, la generación directa de vapor y el aceite térmico.

6.3.2. Almacenamiento

En los sistemas CSP, el almacenamiento se hace cada vez más importante para suministrar una carga de base. Un número creciente de proyectos incluirá el almacenamiento en sales fundidas que a veces se usa en combinación con la generación directa de vapor en el colector, a veces con DMS. Se calcula que los conceptos de almacenamiento con DMS lleven a una reducción de costos del 10%, en comparación con el almacenamiento en sales fundidas combinado con la generación directa de vapor.

Para las aplicaciones que generan calor para procesos industriales, se están estudiando cada vez más los materiales de cambio de fase. También se están usando los acumuladores de agua caliente para un amplio rango de temperaturas. Es probable que en el futuro cercano se realicen los primeros proyectos de demostración con almacenamiento en base a materiales de cambio de fase a gran escala, y que aparezcan en el mercado los proveedores especializados en el almacenamiento con materiales de cambio de fase.

6.3.3. Operación

El desarrollo de este tema llevará a una operación más automatizada con menos personal. Se están haciendo estudios para mejorar el comportamiento transitorio en días nublados y la predicción de la producción eléctrica (para las plantas CSP con conexión a la red).

La mejor comprensión y predicción del comportamiento transitorio en los días nublados, conjuntamente con los conceptos de almacenamiento, pronto llevará a optimizar la manera de vender la energía eléctrica.

En cuanto al calor para procesos industriales, la creciente estandarización de las interfaces con los sistemas de control de los clientes pronto simplificará su integración en los parques industriales.

6.3.4. Conceptos del sistema para la generación de energía eléctrica

Tal como ocurre en las centrales eléctricas convencionales, la eficiencia del bloque de potencia aumenta en la medida en que crece la eficiencia de las turbinas. Se están realizando grandes esfuerzos de investigación con respecto a la integración del almacenamiento y los sistemas híbridos. Algunos de éstos ya se han implementado con éxito (por ej., la integración de una planta Fresnel en una central eléctrica de carbón en Liddell, Australia).

6.3.5. Estandarización del concepto del sistema para el calor de procesos

Finalmente, el gran avance del calor para procesos en todas las ramas de la industria con necesidad de calor llevará al desarrollo de sistemas estandarizados con diferentes fluidos de transferencia de calor para los rangos modulares de potencia, con sistemas de respaldo y/o almacenamiento, y para diferentes niveles de temperatura y presión.

6.4. COSTOS MARGINALES A LARGO PLAZO

Es probable que, con la expansión del mercado CSP, los costos de la adquisición de colectores sean cada vez más marginales dentro de los costos de material. La proporción de los costos de inversión del colector será menos dominante, en comparación con otros componentes de costo de un proyecto.

Si bien a esta altura no se puede entregar una indicación absoluta de los costos, sí se puede afirmar que la generación de calor mediante los colectores solares de concentración terminará siendo la tecnología más económica para generar calor.

6.5. DAÑOS POR SUCIEDAD Y COSTOS DE LIMPIEZA

La contaminación se produce por la acumulación de cualquier tipo de suciedad. Por ejemplo, el polvo en la superficie del colector reduce las ganancias de energía. Un ejemplo (extremo) se muestra en la siguiente foto:

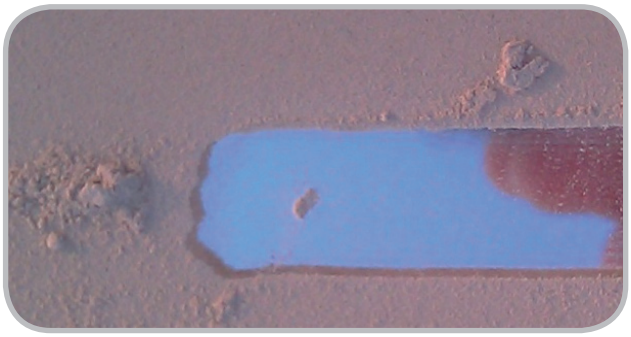


ILUSTRACIÓN 43: SUCIEDAD – ESTE ESPEJO ESTÁ TOTALMENTE CUBIERTO DE POLVO. EXISTEN VARIOS CONCEPTOS DE LIMPIEZA PARA EVITAR UNA BAJA EN LAS GANANCIAS DE ENERGÍA. (FUENTE: ARCHIVO PRIVADO)

Surgen dos preguntas:

- ¿Cuánta energía pierde el colector por causa de la suciedad?
- ¿Con qué frecuencia hay que limpiar el colector?

Obviamente, la suciedad reduce las ganancias de energía, y esta reducción depende del intervalo de limpieza (el tiempo entre dos ciclos sucesivos de limpieza). Por el otro lado, cada ciclo de limpieza aumenta los costos de operación, y los intervalos más cortos de limpieza (limpieza más frecuente) aumentan los costos anuales de limpieza.

Los costos de limpieza representan la mayor parte de los costos de operación y mantenimiento, principalmente por el gran tamaño de la superficie que hay que limpiar (la superficie de los espejos primarios) y la complejidad de la limpieza automática que requiere un diseño especial.

6.5.1. Impacto sobre la generación térmica neta

Para la operación eficiente del campo de colectores, es esencial la limpieza periódica de los espejos primarios. La acumulación de polvo y suciedad en la superficie de los espejos disminuye su reflectividad y, por lo tanto, reduce la generación térmica neta del sistema. La Ilustración 44 muestra la relación entre el intervalo de limpieza en días y la generación térmica neta (además de la eficiencia anual) para un sitio modelo con condiciones moderadas de ensuciamiento y costos laborales moderados (15$/h), que podría estar ubicado cerca de Santiago. En este ejemplo, se nota una baja de aproximadamente el 4% en la eficiencia anual, si los espejos se limpian sólo cada 30 días.

La pregunta acerca de cuánta energía el colector pierde por causa de la suciedad se puede contestar con precisión sólo si se conocen tanto el costo del ciclo de limpieza como el costo equivalente a la pérdida de ganancias de energía. Luego, se puede optimizar el intervalo de limpieza. Una vez optimizado el intervalo de limpieza, se puede calcular el efecto del ensuciamiento sobre la generación térmica neta. Esto, al mismo tiempo, contesta la segunda, compleja pregunta acerca de la frecuencia con que hay que limpiar el colector.

La baja en la eficiencia y en la generación térmica neta depende del grado de suciedad que varía mucho de acuerdo con el lugar de la instalación. En los ambientes de polvo como, por ejemplo, en un desierto arenoso o en la cercanía de carreteras polvorientas con tránsito frecuente, la tasa de ensuciamiento puede ser mucho más alta que en el ejemplo anterior. Sin embargo, en los lugares con lluvia regular, el ensuciamiento se puede reducir si se aprovecha la autolimpieza mediante la lluvia. Algunos fabricantes de colectores lineales Fresnel usan una posición automática de los espejos primarios en casos de lluvia, para aprovechar la lluvia en la autolimpieza.

La reducción de la energía producida por causa del ensuciamiento, se puede traducir al costo de oportunidad de la energía perdida por suciedad. La optimización del intervalo de limpieza se logra encontrando el menor valor entre el costo de oportunidad y el costo de limpieza. En este valor mínimo, el costo de limpieza es igual al costo de oportunidad, tal como lo muestra la Ilustración 45 para el caso modelo anterior. En este ejemplo, el intervalo óptimo de limpieza es de 13 días si se aplica un concepto de limpieza manual (esquema a la derecha), mientras que el intervalo óptimo de limpieza es de tres días en caso de usarse un sistema de limpieza semiautomático.

El costo de la limpieza por m^2 de superficie de espejo se determina de manera iterativa, arrojando el costo de limpieza por ciclo de limpieza. El costo de limpieza se determina sobre la base de los costos laborales (esta cifra de los costos tiene que ajustarse a los costos laborales locales según la estimación del cliente interesado). El costo anual de limpieza es proporcional a la frecuencia de limpieza (inversamente proporcional al intervalo de limpieza). No obstante lo anterior, las pérdidas de energía por causa de la suciedad dependen del intervalo de limpieza (reduciéndose en la medida en que aumenta la frecuencia de limpieza). El costo de oportunidad de la energía perdida a consecuencia del ensuciamiento se determina sobre la base del precio local de la energía. Por lo tanto, si se agregan los costos de limpieza y pérdida de energía por causa del ensuciamiento, el resultado será una función objetivo adecuada para la optimización.

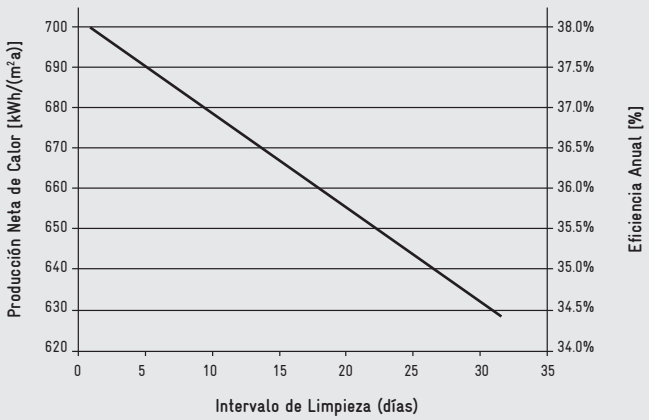


ILUSTRACIÓN 44: EFECTO DEL INTERVALO DE LIMPIEZA SOBRE LA GENERACIÓN TÉRMICA NETA Y LA EFICIENCIA ANUAL. LA LIMPIEZA FRECUENTE (LAS CIFRAS BAJAS EN EL EJE X DEL DIAGRAMA) AUMENTA EL RENDIMIENTO DEL COLECTOR.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

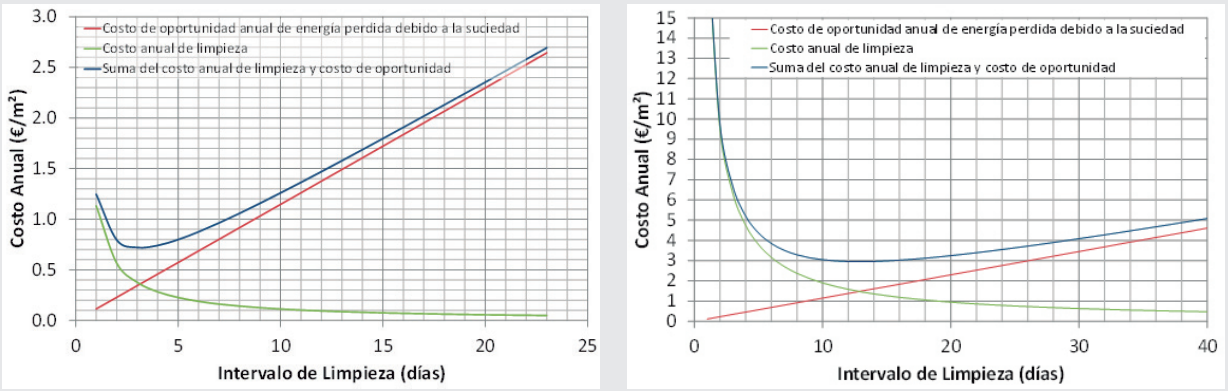


ILUSTRACIÓN 45: COSTO ANUAL: LA RELACIÓN ENTRE EL COSTO ANUAL Y EL INTERVALO DE LIMPIEZA. SI AUMENTA EL INTERVALO DE LIMPIEZA, SE REDUCE EL COSTO ANUAL DE LIMPIEZA MIENTRAS QUE CRECE EL COSTO DE OPORTUNIDAD. LA SUMA DE AMBOS COSTOS TIENE UN VALOR MÍNIMO QUE INDICA EL INTERVALO ÓPTIMO DE LIMPIEZA. EL ESQUEMA A LA IZQUIERDA MUESTRA UN SISTEMA SEMIAUTOMÁTICO DE LIMPIEZA, MIENTRAS QUE EL ESQUEMA A LA DERECHA MUESTRA EL COSTO DE LA LIMPIEZA MANUAL.

Para elegir el mejor concepto de limpieza resulta necesario comparar la diferencia en el costo anual con los costos de la inversión del sistema semiautomático o totalmente automático. Los costos de la inversión de un sistema semiautomático o totalmente automático deberían amortizarse dentro de un plazo razonable.

6.5.2. Conceptos de limpieza

Los espejos pueden limpiarse con agua sin tratar, de modo que no se requiere un tratamiento especial del agua. También puede usarse agua tratada, pero generalmente ésta es más costosa. No deberían usarse aguas residuales tratadas, ya que éstas generalmente tienen una mayor concentración de partículas contaminadas.

En cuanto al concepto de limpieza, principalmente se pueden distinguir las siguientes categorías:

- Limpieza manual.
- Limpieza semiautomática.
- Limpieza totalmente automática.

ILUSTRACIÓN 46: LIMPIEZA MANUAL CON UN SECAVIDRIOS (FUENTE: ARCHIVO PRIVADO)

El concepto de la limpieza manual sirve de referencia. Este concepto se basa en la limpieza poco sofisticada que se realiza con equipos manuales (esponja, secavidrios y baldes con agua). Este concepto es el más sencillo y el que menos inversión adicional requiere, pero fácilmente puede llegar a ser el concepto más costoso por los altos costos laborales.

Por lo tanto, la solución que se propone generalmente es un compromiso entre los conceptos completamente manuales y aquéllos totalmente automáticos, esto es, la limpieza semiautomática. En este tipo de concepto, un robot o, en términos más generales, un dispositivo limpia los espejos primarios. Este tipo de dispositivo generalmente usa cepillos giratorios, una pequeña cantidad de agua transportada en un pequeño tanque y baterías para el motor. El dispositivo se mueve solo a lo largo de la fila de los espejos primarios.

Si las filas de colectores están conectadas en series, éstas se pueden empalmar usando estructuras de puente. Una estructura de puente es una conexión para el robot, para que pueda cruzar el espacio entre las series y seguir con los espejos de la siguiente serie.

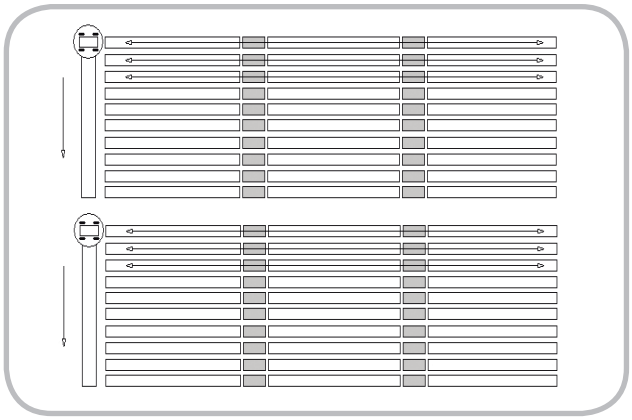


ILUSTRACIÓN 47 ILUSTRACIÓN MODELO DE CÓMO DEBERÍA DISEÑARSE UN CONCEPTO SEMIAUTOMÁTICO DE LIMPIEZA. DOS ROBOTS SE MUEVEN A LO LARGO DE LAS FILAS PARALELAS DE ESPEJOS. EN EL EXTREMO IZQUIERDO, SE USAN TRINEOS PARA TRASLADAR LOS ROBOTS DE UNA FILA A LA SIGUIENTE. LAS ESTRUCTURAS DE PUENTE (MOSTRADAS EN COLOR GRIS) SE USAN PARA SUPERAR LOS ESPACIOS ENTRE LAS SERIES, SI LOS COLECTORES ESTÁN CONECTADOS EN SERIE.

Una estructura en un lado del campo ayuda al operador a manualmente mover el robot a la siguiente fila. Simplemente se toma el robot desde el borde de la fila de espejos que acaba de limpiar, arrastrándolo sobre un trineo colocado sobre rieles. Luego, el trineo se empuja lateralmente hacia la posición deseada donde se empuja el robot sobre la siguiente fila a limpiar.

El agua y la electricidad pueden recargarse al interior de una cabina, bajo la dirección del operador. La intervención de operador se necesita en algunos pocos momentos para controlar y supervisar la operación del dispositivo de limpieza, o para moverlo de una fila de espejos primarios a otra. Un solo operador puede hacerse cargo de varios dispositivos al mismo tiempo.

En los sistemas de limpieza completamente automática, el desplazamiento de los robots de una fila a la siguiente también ocurre en forma automática, al igual que el rellenado de los depósitos de agua y la recarga de las baterías. Un operador se necesita sólo para el mantenimiento del dispositivo de limpieza, mientras que el proceso mismo de limpieza ya no requiere mano de obra.

ILUSTRACIÓN 48: ROBOT DE LIMPIEZA DE NOVATEC SOLAR (FUENTE: WWW.YOUTUBE.COM, CONSULTADO EL 10 DE JULIO DE 2013)

6.5.3. Parámetros de entrada necesarios para el cálculo del intervalo óptimo de limpieza

Se requieren varios parámetros de entrada para calcular el intervalo óptimo de limpieza y para comparar los conceptos de limpiezas. La siguiente lista contiene los parámetros necesarios para este cálculo:

- Tasa de ensuciamiento.
- Costo de la energía.
- Costos laborales.
- Costo del agua.
- Generación térmica neta anual.
- Superficie de espejos a ser limpiada.
- Tiempo de limpieza requerido para un ciclo de limpieza.
- Energía eléctrica para el dispositivo de limpieza (para los sistemas automáticos).
- Costo de la inversión (para los sistemas automáticos).

La tasa de ensuciamiento RS representa el porcentaje diario en que se reducirá la reflectividad del espejo por causa de polvo y suciedad. Para calcular la reflectividad en un día determinado, se multiplica por (1-RS)/100 la reflectividad del espejo en el día anterior. La tasa de ensuciamiento es un parámetro que, en gran medida, depende del lugar y del clima. Esta tasa puede variar incluso en el mismo lugar si la instalación se desplaza unos pocos metros.

Para calcular el costo de oportunidad de la energía perdida por causa de ensuciamiento, debemos suponer una cifra de los costos de la energía perdida. El costo de la energía varía con la ubicación y el tiempo, por lo que hay que usar el valor local real entregado por el cliente interesado.

Obviamente, los costos laborales son un aspecto central, especialmente si la limpieza se realiza manualmente. En la mayoría de las ubicaciones, el costo del agua es insignificante en comparación con los demás costos. Sin embargo, esto cambia en áreas desérticas como, por ejemplo, el Desierto de Atacama en el norte de Chile.

El valor de la generación térmica neta anual de un colector solar se puede calcular usando los datos meteorológicos locales y los datos de la posición solar, además de suponer el valor de las pérdidas del sistema. Esta cifra se usa para calcular el impacto de la pérdida por causa de la suciedad.

La superficie a ser limpiada es la superficie de los espejos primarios. Los espejos secundarios al interior del receptor generalmente están protegidos de la suciedad, no sólo por la carcasa que contiene el receptor encima de los espejos secundarios, sino también por el hecho que estos espejos miran hacia abajo. Por lo tanto, los espejos secundarios no se incluyen en el concepto de limpieza. El tiempo de limpieza indica el número de horas de trabajo necesarias para un ciclo de limpieza.

Si bien el consumo de energía eléctrica no aumenta de manera significante el costo del ciclo de limpieza de un sistema automático de limpieza, los datos de la energía eléctrica son importantes para el modelo de costos, a fin de calcular el tiempo de operación activa y el tiempo requerido para recargar las baterías.

Finalmente, hay que tomar en cuenta el costo de la inversión de un sistema automático de limpieza.

6.5.4. Conclusión

El ensuciamiento de los colectores es un tema importante y hay que tomarlo en cuenta en la fase de planificación. Para la mayoría de los lugares, existe una solución viable.

Existen muchas soluciones para la limpieza de los reflectores, incluyendo los conceptos manuales, semiautomáticos y totalmente automáticos. Muchos de estos conceptos han sido aplicados con éxito, tanto en las plantas de ensayo como en las plantas comerciales.

Hay que analizar cada caso específico en que se proyecta instalar una planta de CSP Fresnel, aplicando la metodología indicada en el capítulo 6.5.3.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

7. CSP Fresnel en Chile

7.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN CHILE

Chile cuenta con condiciones climáticas favorable para las plantas CSP: En el norte del país, los valores de la radiación directa normal, que es el parámetro más importante para la CSP, son de los más altos a nivel mundial, e incluso la zona central de Chile tiene una radiación abundante.

La Ilustración 49 muestra un mapa de la radiación directa normal anual. Grandes áreas del norte de Chile tienen valores superiores a 3000kWh/m². A modo de comparación, la mayor parte de las zonas en España están por debajo de 2000kWh/m².

Por el otro lado, Chile cuenta con condiciones difíciles como, por ejemplo, las grandes variaciones de temperatura, la alta radiación UV, sales de polvo, etc. El ensuciamiento y la limpieza de los reflectores deben entrar en consideración en las áreas de mucho polvo (zonas mineras) y/o de escasez de agua (ver el capítulo 6.5.).

Se eligieron seis ubicaciones en Chile para comparar los recursos solares y la generación térmica bruta, tomando en cuenta las necesidades típicas reales de energía (áreas urbanas, minas, etc.) y representando los climas típicos (climas de la zona central y del norte, con diferentes altitudes y distancias del mar):

- **Santiago:** Capital y centro económico de Chile. En el perímetro alrededor de la ciudad, las aplicaciones para generar calor para los procesos industriales mediante los colectores lineales Fresnel podrían ofrecer opciones interesantes. Incluso en las áreas con escasez de tierra: La CSP Fresnel se puede instalar en los techos de los edificios.
- **Curicó:** Ciudad en la Región del Maule con industrias vitivinícolas y frutícolas.
- **Antofagasta:** Ciudad en el norte con un puerto importante e industrias mineras y de metal.
- **Vallenar:** Ciudad en la Región de Atacama con minería, agricultura e industrias vitivinícolas.
- **Arica:** Ciudad en el extremo norte de Chile con un puerto importante y agricultura.
- **Crucero:** Lugar en el Desierto de Atacama en una zona minera (cerca de Calama).[17]

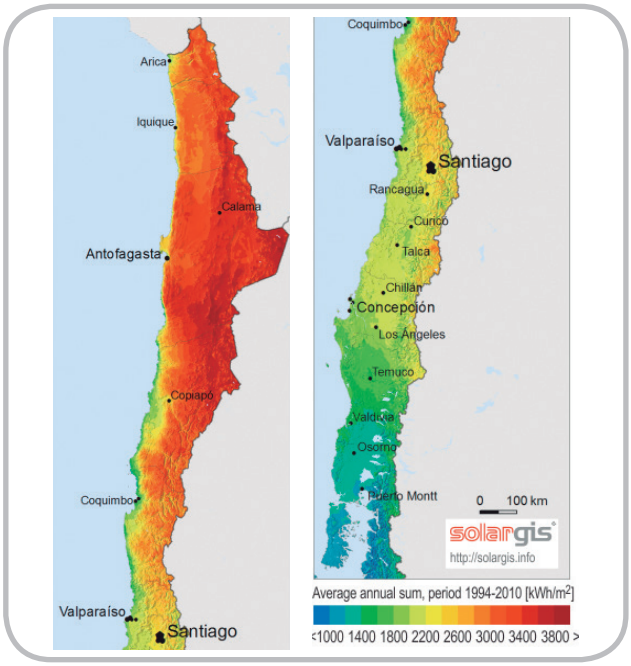


ILUSTRACIÓN 49: MAPA DE LA RADIACIÓN DIRECTA NORMAL ANUAL EN CHILE. EL MAPA FUE PROPORCIONADO POR SOLARGIS (© 2014 GEOMODEL SOLAR) Y SE BASA EN DATOS DE SATÉLITE. LOS LUGARES SELECCIONADOS ESTÁN MARCADOS.[17]

17 "Average anual sum, period 1994-2010" = cantidad promedio anual, período 1994-2010 (nota de la traductora)

7.2. SIMULACIÓN DE LA GENERACIÓN TÉRMICA BRUTA Y DE LA EFICIENCIA ANUAL EN LUGARES SELECCIONADOS DE CHILE

Metodología

La simulación usa tres fuentes de datos meteorológicos:

- **Meteonorm, proveedor de datos climáticos:** Datos meteorológicos por hora 1961-2003, entregados por Meteonorm v.7, especialmente la radiación directa normal y los valores de temperatura. El problema es que los datos provienen de unas pocas estaciones meteorológicas en Chile, por lo que los resultados se basan en la interpolación y no son muy confiables.
- **Datos de satélite entregados por SolarGIS:** Disponibles para cada lugar (previo pago); los resultados anuales para la radiación directa normal se muestran en la Ilustración 49.
- **Datos de estaciones meteorológicas independientes:** Datos de un año, tomados en la estación meteorológica de Crucero, operada por la GIZ y el Ministerio de Energía de Chile.

A fin de obtener los valores de la radiación directa normal anual, se usaron los datos de SolarGIS y, para Crucero, además los datos de la estación meteorológica independiente. Los valores de SolarGIS están sacados del mapa de la Ilustración 49.

De acuerdo con SolarGIS, la incertidumbre de los valores correspondientes a la radiación directa normal anual es típicamente inferior al ±7% (probabilidad de ocurrencia del 80% para 48 lugares de validación). En las geografías más complejas, la incertidumbre de la radiación directa normal anual puede llegar a ser ±12% (esporádicamente, se han observado desviaciones de hasta el 15% de las mediciones locales), especialmente en regiones en que el contenido de aerosol es alto y cambiante, en regiones tropicales húmedas, latitudes altas, montañas altas, regiones de nieve, desiertos complejos con la ocurrencia ocasional de nieve y agua, y en áreas urbanizadas e industrializadas. También se espera una incertidumbre alta en las regiones en que no se dispone de muchas mediciones terrestres de alta calidad.

Si bien la estación meteorológica de Crucero entrega datos sólo por un año, estos datos obtenidos directamente en el lugar se pueden considerar representativos para otros años, ya que las condiciones meteorológicas en el Desierto de Atacama no cambian mucho de un año a otro.

El cálculo de la eficiencia anual del colector es más complejo: Para poder calcular este valor, se requieren los datos por hora, entregados por Meteonorm, sobre la radiación directa normal y la temperatura de ambiente, además de las coordenadas geográficas del lugar y las características del colector específico.

Las coordenadas geográficas de los lugares se usan para calcular los valores por hora correspondientes al ángulo de la posición del sol. Tomando como ejemplo los valores de la eficiencia óptima, del modificador biaxial del ángulo de incidencia y de los coeficientes de la pérdida térmica entregados por uno de los fabricantes (Industrial Solar GmbH), y suponiendo una temperatura de operación (180°C), es posible calcular la generación térmica bruta y la eficiencia térmica del colector Fresnel para cada hora del año. La suma del año completo arroja las eficiencias anuales.

En otros fabricantes, los valores de la eficiencia pueden diferir levemente, pero esto no afecta la comparación general de los sitios. La dependencia de la temperatura de operación se mostró en la Ilustración 15. Mientras que una temperatura de operación de 180°C es típica para las aplicaciones que generan calor para procesos industriales, los colectores para la generación de energía eléctrica generalmente se operan a temperaturas mucho más altas.

Finalmente, la generación térmica bruta resulta de la radiación directa normal anual y la eficiencia anual del colector.

Resultados

Los resultados de la simulación se muestran en la Ilustración 50. Se agregaron dos lugares con plantas exitosas de CSP fuera de Chile: Sevilla en el sur de España y Reno en Nevada, USA.

Estos resultados son realmente buenos para Chile y ofrecen grandes oportunidades para las plantas de CSP Fresnel.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

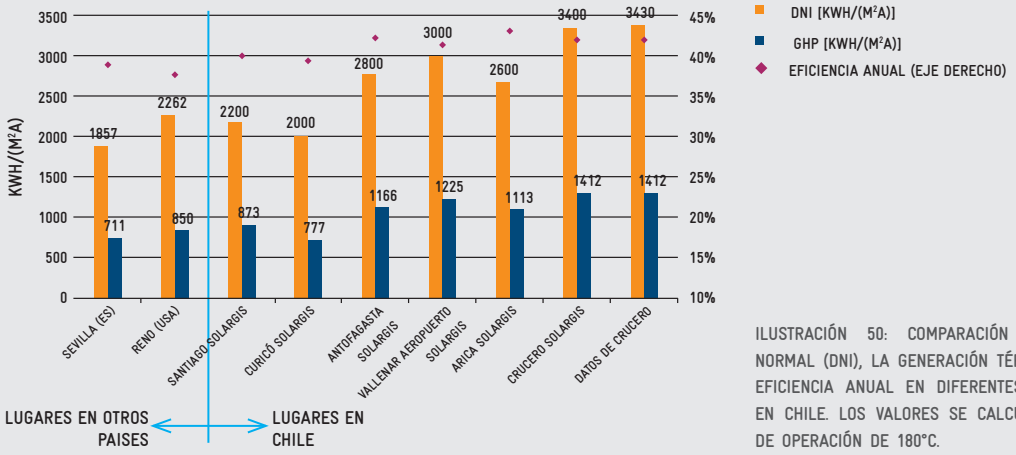


ILUSTRACIÓN 50: COMPARACIÓN DE LA RADIACIÓN DIRECTA NORMAL (DNI), LA GENERACIÓN TÉRMICA BRUTA (GHP) ANUAL Y LA EFICIENCIA ANUAL EN DIFERENTES LUGARES CON INSTALACIONES EN CHILE. LOS VALORES SE CALCULARON CON UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE 180°C.

7.3. DEMANDA DE ENERGÍA TÉRMICA EN CHILE: CALOR PARA PROCESOS INDUSTRIALES

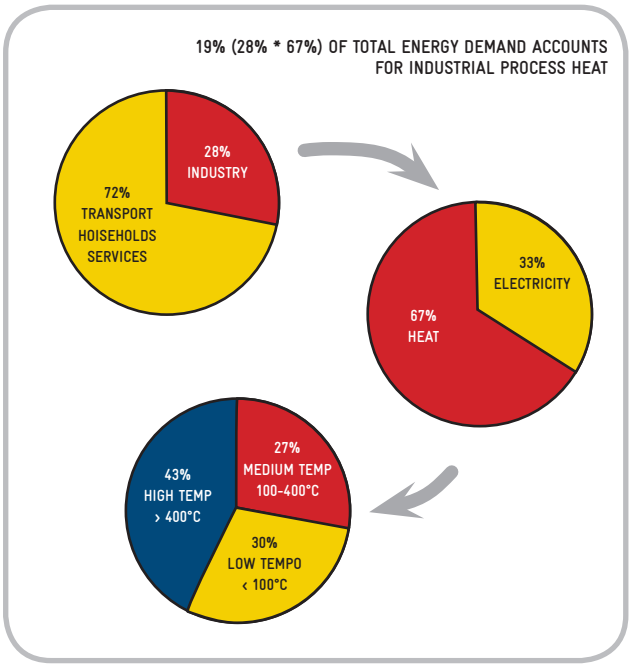


ILUSTRACIÓN 49: MAPA DE LA RADIACIÓN DIRECTA NORMAL ANUAL EN CHILE. EL MAPA FUE PROPORCIONADO POR SOLARGIS (© 2014 GEOMODEL SOLAR) Y SE BASA EN DATOS DE SATÉLITE. LOS LUGARES SELECCIONADOS ESTÁN MARCADOS.[19]

En Chile, el 34,5% del consumo de energía eléctrica está relacionado con el sector minero, mientras que el sector industrial representa el 24,9% y la agricultura el 2,2%.[18]

También con respecto a la energía térmica suponemos que la minería y la industria son los consumidores más importantes. La CSP tiene el potencial de suministrar una gran parte del calor de procesos, como lo demostró un estudio de caso europeo (ver la Ilustración 51 y la Ilustración 52).

La CSP Fresnel puede abastecer gran parte de la demanda de calor en la industria: las partes amarillas y rojas de las columnas en la Ilustración 52, hasta 400°C.

Considerando la industria en Chile, los procesos más aptos para el suministro de energía por sistemas de CSP son los procesos de limpieza, secado, pasteurización, blanqueamiento, decoloración, coloración, evaporación y destilación, fusión, pintura y el tratamiento de superficies. Por lo tanto, la industria chilena – especialmente las industrias vitivinícolas, frutícolas y pesqueras, así como los procesos relacionados con la minería – tienen un potencial significativo para el suministro de CSP.

18 59.000 GWh p. a. distribuidos (2009/10); fuente: Instituto Nacional de Estadísticos (INE).
19 transport, households, services" = transporte, hogares, servicios, "industry" = industria, "of total energy demand accounts for industrial process heat" = del total de la demanda de energía corresponde al calor para los procesos industriales, "heat" = calor, "electricity" = electricidad, "high temp, / medium temp, / low temp" = temperatura alta / temperatura media / temperatura baja (nota de la traductora)

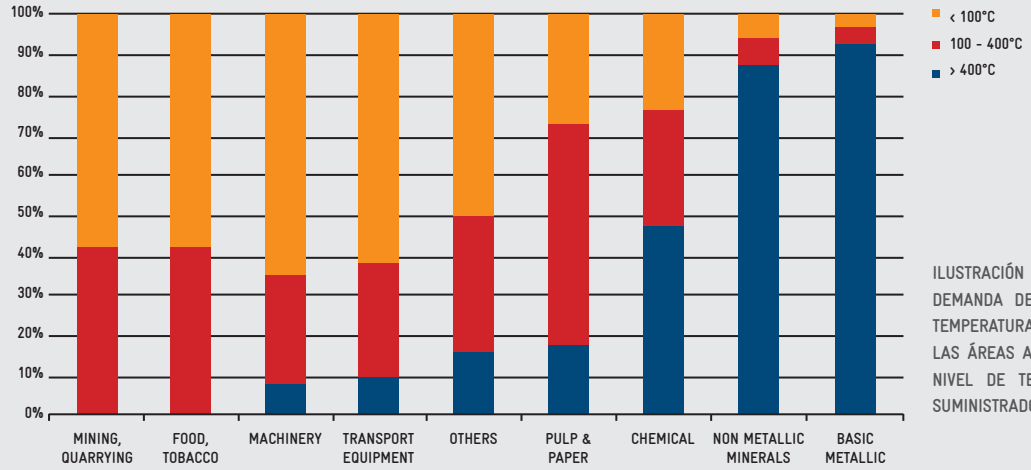


ILUSTRACIÓN 52: PORCENTAJE DE LA DEMANDA DE CALOR PARA PROCESOS, POR TEMPERATURA Y SECTOR INDUSTRIAL. TODAS LAS ÁREAS AMARILLAS Y ROJAS INDICAN UN NIVEL DE TEMPERATURA QUE PODRÍA SER SUMINISTRADO POR LA CSP. (FUENTE: IBÍD.)[20]

Dos ejemplos en Chile subrayan el gran potencial de la CSP y del calor para procesos industriales en el sector minero:

- **Mina Gaby:** Un campo solar de colectores solares convencionales (no de concentración) de 39.000 m² suministra calor para los procesos del tratamiento de cobre, a una temperatura de proceso de 48°C. Los colectores de CSP Fresnel podrían hacer lo mismo, pero hasta temperaturas mucho más altas.
- **El Tesoro:** Una planta termosolar de CSP entrega calor para el proceso de electroextracción del cobre (extracción por solventes y electroobtención), reemplazando el 55% del diésel usado anteriormente para este proceso.

7.4. CONTENIDO LOCAL

La tecnología de CSP Fresnel es una tecnología que generalmente usa una cantidad importante de bienes y componentes producidos o comprados localmente. Los porcentajes estimados para Chile se resumen en la siguiente tabla, oscilando entre el 100% para los componentes basados en acero y hormigón y el 0% para los componentes altamente especializados con muy pocos productores a nivel mundial.

Más información sobre las especificaciones de los principales componentes, materias primas, requerimientos específicos y equipos necesarios se encuentra en las tablas del capítulo 9 "Anexo – Opciones de Suministro Local para los Sistemas Fresnel".

En resumen, aproximadamente el 80% de todos los componentes del colector puede ser adquirido localmente. Este porcentaje podría incluso aumentar, si la tecnología se establece en Chile y si aumenta la demanda de los servicios y productos relacionados.

También con respecto a los costos laborales, los autores estiman que una parte significativa (hasta el 90%) del trabajo puede ser realizada por mano de obra local.

Tabla 4: Porcentajes estimados de los componentes que actualmente se pueden producir o comprar en el mercado local en Chile. Los porcentajes podrían llegar a ser mucho más altos, si la tecnología CSP Fresnel se consolida en Chile. Fuente: T. Schwind, Industrial Solar, y consideraciones de los autores.

COMPONENTE	% ESTIMADO DE CONTENIDO LOCAL (VOLUMEN)	EXPLICACIÓN
Bases	100%	Todos los materiales como, por ejemplo, el concreto, metales, etc., están disponibles en Chile.
Estructura de Soporte	100%	Básicamente, se requieren metales de todo tipo que se producen o distribuyen localmente.
Unidad de seguimiento	50%	Consiste en motores eléctricos de alta calidad, soportes, correas, cajas de cambios. Según los autores, la mitad de estos componentes se puede adquirir localmente, la otra mitad habría que importarla.
Unidad de control	50%	Básicamente, se trata de un producto IT especializado, diseñado y producido en el país del fabricante del colector. Sin embargo, una gran parte de los componentes estándar se puede comprar de distribuidores locales.
Espejos primarios – reflectores	0%	Si bien se fabrica vidrio flotado en Chile, el vidrio de los reflectores tiene que ser templado y de bajo contenido de hierro. También tiene que contar con un revestimiento y con adherentes de alta duración. Si crece la demanda, los fabricantes locales en pocos años podrían empezar a producir el producto adecuado.
Espejos primarios – estructura trasera	75%	En gran parte, consisten de componentes metálicos estándar. Según los autores, una cuarta parte de estos componentes tendría que importarse.
Receptor – reflector secundario	75%	Se requieren vidrios o metales especiales, pero si en el futuro crece la demanda, habrá un gran potencial para la producción local.
Receptor – absorbedor	0%	Un producto altamente especializado con un proceso de producción muy sofisticado. Hay sólo 2-3 fabricantes a nivel mundial.

20 „mining, quarrying" = minería, excavaciones, „food, tobacco" = alimentos, tabaco, "machinery" = maquinaria, "transport equipment" = equipos de transporte, "others" = otro, "pulp & paper" = pulpa y papel, "chemical" = químico, "non-metallic minerals" = minerales no metálicos, "basic metals" = metales básicos (nota de la traductora)

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

8. Referencias

8.1. LITERATURA

Julio Chaves y Manuel Collares-Pereira, Etendue-matched two-stage concentrators with multiple receivers, Solar Energy 84, págs. 196-207, 2010.

Ecoheatcool (2006), Work Package 1, The European Heat Market, Final Report, IEE ALTENER Project, Euroheat & Power, Bélgica.

A. Häberle. Fresnel Solar Energy Collectors, en Robert A. Meyers (Ed.), Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, DOI 10.1007/978-1-4419-0851-3, Springer Science+Business Media, LLC 2011.

A. Häberle. Industrial process heat and solar cooling. en K. Lovegrove, W. Stein (Editors). Concentrating solar power (CSP) technology, Developments and applications, Woodhead Publishing Ltd., 2012.

Anne Jaulain et al., Life Cycle Analysis: A decision support tool for environmental and Cost Reduction of a Fresnel Solar Plant, SolarPACES 2012.

M.J. Montes, Analysis of Linear Fresnel Collectors Designs to Minimize Optical and Geometrical Losses, Solarpaces 2012.

G. Morin, J. Dersch, W. Platzer, M. Eck, A. Häberle. Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants, Solar Energy, Vol. 86, 2012.

Manmeet Narula y Philip Gleckman, Areva Solar, SolarPACES 2012, Marrakech, Marruecos, 2012.

Rabl. A, Active Solar Collectors and their Applications. Oxford University Press, Nueva York, 1985.

Silvi, C. The Pioneering Work on Linear Fresnel Reflector Concentrators (LFCs) in Italy. Proceedings SolarPaces 2009, Berlín.

Vannoni C, Battisti R y Drigo S (2008). Potential for Solar Heat in Industrial Processes, IEA Task 33/IV. Disponible en www.iea-shc.org.

8.2. ILUSTRACIONES

- Ilustración 3: Novatec Solar, www.novatecsolar.com/, 18 de septiembre de 2014
- Ilustración 4: Ritter XL Solar GmbH, http://ritter-xl-solar.com/ueber-uns/news/news-details/article/ritter-xl-solar-und-industrial-solar-kooperieren-auf-dem-gebiet-der-solaren-prozesswaerme-fuer-indus/?cHash=01b58201ab894189a9bfe40c144ab8ed&no_cache=1&sword_list[0]=fresnel, 9 de mayo de 2011
- Ilustración 16: Areva Group, www.areva.com/EN/solar-232/arevasolarapplications.html, 9 de octubre de 2014
- Ilustración 18: Soltigua, presentación 1er taller proyecto "INSUN", Rapperswil, 4 de marzo de 2013[21]
- Catálogo de productos Krinner, www.krinner.ch/downloads0/
- Novatec Solar AG, www.novatecsolar.com/, 18 de septiembre de 2014
- Ilustración 21: Novatec Solar, www.novatecsolar.com/, 18 de septiembre de 2014
  Pronova, www.pronova-energy.com/Portfolio aspx#prettyPhoto, 10 de octubre de 2012)
- Ilustración 22 Diseño con láminas de metal (fuente: sitio web de Novatec Solar, consultado el 1 de marzo de 2008): Novatec Solar, www.novatecsolar.com, consultado el 1 de marzo de 2008
- Ilustración 23: Ausra Solar, 1 de octubre de 2008 (sitio web ya no existe)
- Ilustración 25: www.faqs.org/patents/imgfull/20110297143_05, 8 de diciembre de 2011
- Ilustración 26: www.novatecsolar.com/112-1-How-does-it-work.html
- Ilustración 27: Aaron Larson: Major Milestone Achieved at Concentrated Solar Plant, en Power Magazine, www.powermag.com, 12 de mayo de 2013.
- Ilustración 29: Planta solar de Novatec Solar, Recharge News, www.rechargenews.com/solar/article1298539.ece, 8 de octubre de 2012

21 En inglés dice 2104, lo cual probablemente es un error. Según http://www.fp7-insun.eu/InSun_News.htm, la fecha correcta sería 2013 (nota de la traductora).

- Ilustración 30: Industrial Solar GmbH, www.industrial-solar.de/CMS/, 10 de octubre de 2014
- Ilustración 31: CNIM Energy, www.cnim.com/resources/fichiers/cnim_fr_en/pdf2014/depliant_EnergieSol_17fev_GB-v-180214.pdf, febrero de 2014
- Ilustración 32: Solar Euromed SAS, www.solareuromed.com/photosvideos, 24 de febrero de 2014
- Ilustración 33: Sitio web de Pronova, www.pronova.com, octubre de 2014
- Ilustración 34: Sitio web de Feranova, www.feranova.com/?changelang=2, octubre de 2014
- Ilustración 35: Sitio web de Soltigua, www.soltigua.com/downloads/Soltigua_FTM_brochure.pdf,
- Ilustración 36: ALCEN, www.alcen.com/en/subsidiaries/alsolen, octubre de 2014
- Ilustración 37: www.solarspaceframe.com (URL ya no válido)
- fuente: Solar Euromed, TV / video comercial, www.solareuromed.com/photosvideos, noviembre[22] de 2014
- Ilustración 38: TV / video comercial, Solar Euromed, Status: octubre de 2014
- Ilustración 39: Presentación de Novatec Solar, 4° Foro Saudí de Energía Solar, 9 de mayo de 2012, foto a la derecha: sitio web de Areva Solar, octubre de 2014
- Ilustración 41; Schott Solar Gmbh, Receptores CSP, SCHOTT PTR®70, www.schott.com/csp/english/schott-solar-ptr-70-receivers.html?so=mexico&lang=spanish, octubre de 2014
- Ilustración 48: Novatec Solar GmbH, www.youtube.com/watch?v=c-f0VCobbGM, 10 de julio de 2013
- Ilustración 49: Derechos de autor: GIS GeoModel Solar 2014
- Ilustración 51: Fuente: Werner S. (2007) ECOHEATCOOL, Work Package 1: The European Heat Market for European Countries

22 Según PSE AG, la fecha correcta es noviembre (no octubre) (nota de la traductora).

9. Anexo – Opciones de Suministro Local para los Sistemas Fresnel

Este anexo contiene una breve especificación de los componentes más importantes que se requieren para un sistema de CSP o de generación de calor para procesos industriales, basado en colectores Fresnel. La descripción de los requisitos característicos específicos y de las técnicas de fabricación necesarias tiene por objeto facilitar la evaluación de las posibilidades de fabricación en Chile. Una vida útil de a lo menos 25 años en condiciones de exteriores es un requisito para todos los componentes que se describen a continuación.

Las estimaciones del porcentaje de los componentes que se pueden producir o comprar en Chile se indican en el capítulo 7.4.

9.1. BASE

Desafío: Bajo costo, optimización del costo con respecto a las condiciones locales (viento, suelo, ambiente corrosivo)

COMPONENTE/ PIEZA	MATERIA PRIMA CLAVE	REQUISITOS ESPECÍFICOS	TÉCNICAS REQUERIDAS
Concreto	Acero, concreto		Equipos técnicos básicos
Tornillos de tierra	Acero		Equipos técnicos básicos

9.2. ESTRUCTURA DE SOPORTE

Desafío: Rigidez mecánica, ajustable para alcanzar un alto nivel de precisión, peso bajo, montaje fácil, bajo costo.

COMPONENTE/ PIEZA	MATERIA PRIMA CLAVE	REQUISITOS ESPECÍFICOS	TÉCNICAS REQUERIDAS
Postes, marcos	acero estándar		equipos técnicos básicos

9.3. UNIDAD DE SEGUIMIENTO

Desafío: Bajo costo, alto nivel de precisión y durabilidad, mantenimiento de bajo costo

COMPONENTE/ PIEZA	MATERIA PRIMA CLAVE	REQUISITOS ESPECÍFICOS	TÉCNICAS REQUERIDAS
Motores (1 eje)	Motores eléctricos	Precisión alta (superior a 0,1°), durabilidad alta	Fabricación exacta y de alta calidad
Piezas para el montaje y la transmisión	Soportes, correas, ejes, cajas de cambios	Precisión alta, durabilidad alta	Fabricación exacta y de alta calidad

9.4. UNIDAD DE CONTROL

Desafío: Bajo costo, fiabilidad en condiciones severas

COMPONENTE/ PIEZA	MATERIA PRIMA CLAVE	REQUISITOS ESPECÍFICOS	TÉCNICAS REQUERIDAS
Unidad central de control e interfaz con el cliente	Plc, tablero eléctrico	Durabilidad y disponibilidad altas, por lo tanto, piezas estándar, típicas de los sistemas de control industrial (por ej., Siemens), software y protocolos estándar (por ej., Canopen, profibus)	Equipos técnicos estándar para el control industrial y los sistemas de automatización
Sensores	Codificadores ópticos / magnéticos o sensores de inclinación	Precisión alta, durabilidad alta	Equipos técnicos avanzados
Cableado	Cobre, aislamiento eléctrico	Durabilidad alta para el uso en exteriores	Equipos técnicos estándar
Cadena de seguridad	Limitadores de seguridad, interruptores de flujo, ups	Cumplir con los requisitos legales de seguridad a altos niveles de temperatura y presión, especialmente en el caso de los sistemas de vapor	Equipos técnicos avanzados

9.5. ESPEJOS PRIMARIOS

Desafío: reflectividad alta, degradación de nula a baja, bajo peso, bajo costo.

COMPONENTE/ PIEZA	MATERIA PRIMA CLAVE	REQUISITOS ESPECÍFICOS	TÉCNICAS REQUERIDAS
Vidrio	vidrio templado de bajo contenido de hierro	reflectividad y durabilidad altas	tecnología de vidrio
Revestimientos	Pintura	Alta resistencia a la abrasión (arena, granizo), humedad, aerosoles (emplazamientos urbanos) o sal (en la costa) y uv, debido al uso en exteriores	Sustancias químicas
Adherentes	Sustancias químicas	Alta durabilidad, compatibilidad con el revestimiento trasero	Tecnología de adhesivos
Estructura trasera	Acero, aluminio	Alta rigidez, buena durabilidad, bajo peso	Equipos técnicos avanzados

9.6. RECEPTOR

Desafío: eficiencia alta (pérdidas térmicas bajas), temperaturas altas (400 - 500°C)

COMPONENTE/ PIEZA	MATERIA PRIMA CLAVE	REQUISITOS ESPECÍFICOS	TÉCNICAS REQUERIDAS
Tubo de acero revestido	Acero, revestimiento	Resistencia a la presión, buena soldadura, pérdidas térmicas bajas (emisiones bajas en el espectro de infrarrojos, absorción alta en el espectro visual), baja degradación a temperaturas altas, sin laminación	Equipos técnicos estándar para los tubos de acero, tecnología de revestimiento
Reflectores secundarios	Aluminio	Resistencia a temperaturas › 120 °c, alta reflectividad especular	Procesamiento avanzado de aluminio para el tratamiento superficial y el revestimiento
Cubierta de vidrio	Vidrio	Alta transmisión de la luz, concepto de expansión térmica en combinación con un tubo de acero	Tecnología de vidrio

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH