

Trabajo Fin de Máster
Máster en Sistemas de Energía Térmica

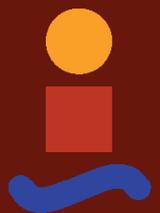
Análisis óptico y energético de un captador Fresnel

Autor: José Antonio López Álvarez

Tutor: Manuel Antonio Silva Pérez

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

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Máster
Máster en Sistemas de Energía Térmica

Análisis óptico y energético de un captador Fresnel

Autor:

José Antonio López Álvarez

Tutor:

Manuel Antonio Silva Pérez

Profesor contratado doctor

Dep. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Máster: Análisis óptico y energético de un captador Fresnel

Autor: José Antonio López Álvarez

Tutor: Manuel Antonio Silva Pérez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

Agradecimientos

La realización de un TFM (Trabajo Fin de Máster) no es una tarea trivial y sencilla, por lo que llegar hasta este punto a nivel académico ha sido un camino lleno de obstáculos y baches el cual he tenido que ir sorteando paso a paso, sin pausa, sin prisa, con la ilusión y el optimismo que me caracteriza. La culminación de todo esto no es solo fruto de un servidor, pues son muchas las personas que me agarraron del brazo cuando iba a caer, que me dieron un empujón y me hicieron avanzar cuando el miedo paralizaba mis piernas. Por eso quería agradecer, en primer lugar, y emocionalmente hablando, todo el apoyo en los momentos más duros a los pilares básicos de mi vida, los cimientos donde se sustenta mi persona; Mi familia. A mi padre Pepe, a mi madre María Del Carmen y a mi hermana María, porque como dijo André Maurois: “Sin una familia, el hombre, solo en el mundo, tiembla de frío”. Gracias por ayudarme a superar este camino, a que nunca ande solo en la vida.

Fuera del ámbito familiar, quiero darles todo mi agradecimiento a los profesores que han puesto su pequeño grano de arena para que el sueño de ser ingeniero se hiciese realidad, en especial a Manuel Silva, mi tutor, que me ha guiado, no solo a lo largo de este proyecto, sino que también a lo largo del grado, máster y de mi corta vida profesional.

También cabe destacar mi experiencia en el Grupo de Termodinámica y Energías Renovables, con compañeros como Miguel Larrañeta, Sara Moreno, Elena Pérez, Natividad Sancho y Alicia Robles entre otros. Con ellos he crecido profesionalmente. Gracias.

José Antonio López Álvarez

Sevilla, 2017

Resumen

En el presente proyecto final de máster se realizará un análisis óptico de un concentrador lineal de Fresnel con la herramienta de trazado de rayos Tonatiuh. Para ello, se modela el sistema de captación de Fresnel que se encuentra en la azotea de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. El análisis consiste en comparar distintas orientaciones con la orientación actual del sistema. También se estudia el impacto de varios parámetros ópticos en el rendimiento del sistema. Para ello se calcula el rendimiento óptico medio anual de cada configuración a partir de las matrices de eficiencia (rendimiento óptico en función de la elevación y acimut solar). Además, se analiza el uso del modificador del ángulo de incidencia para el cálculo del rendimiento óptico medio anual.

Una modificación en la orientación del sistema puede proporcionar un incremento del 4% en el rendimiento medio anual mientras que un error de pendiente del 3 mrad conlleva una caída de un 7% aproximadamente. Además, el uso del concentrador secundario conlleva un incremento del 5.5% en el rendimiento medio anual. El uso del modificador del ángulo de incidencia para el cálculo del rendimiento medio anual conlleva una desviación en el cálculo de menos de un punto porcentual.

Abstract

In the present final master project, an optical analysis of a Fresnel linear concentrator will be carried out with the Tonatiuh ray tracing tool. For this, the fresnel linear concentrator that is located on the roof of the School of Engineering of Seville is modeled. The analysis consists of comparing different orientations with the current orientation of the system. The impact of several optical parameters on the performance of the system is also studied. For this, the average annual optical performance of each configuration is calculated from the efficiency matrices (optical performance as a function of elevation and solar azimuth). In addition, the use of the angle of incidence modifier for the calculation of the average annual optical performance is analyzed.

A change in the orientation of the system can provide an increase of 4% in the average annual yield while a slope error of 3 mrad leads to a drop of about 7%. In addition, the use of the secondary concentrator leads to an increase of 5.5% in the average annual yield. The use of the angle of incidence modifier for the calculation of the average annual yield entails a deviation in the calculation of less than one percentage point.

Índice

Agradecimientos	8
Resumen	9
Abstract	10
Índice	11
Índice de Tablas	13
Índice de Figuras	14
1 Introducción	16
1.1 <i>El sol como fuente energética</i>	16
1.2 <i>Concentradores lineales de Fresnel</i>	18
2 Objetivos	29
3 Antecedentes	30
3.1 <i>Métodos de cálculo del rendimiento óptico</i>	30
3.2 <i>Factores que afectan al rendimiento óptico de un concentrador lineal de Fresnel</i>	32
3.3 <i>Herramientas de simulación</i>	32
3.3.1 <i>Analítica</i>	32
3.3.2 <i>Ray Tracing</i>	32
4 Metodología	35
4.1 <i>Tonatiuh</i>	35
4.1.1 <i>Qué es Tonatiuh [2]</i>	35
4.1.2 <i>Variables típicas del programa</i>	35
4.1.3 <i>Modelado en Tonatiuh</i>	43
4.1.4 <i>Simulaciones</i>	43
4.2 <i>Postprocesado</i>	45
4.3 <i>Cálculo rendimiento anual</i>	45
4.3.1 <i>Matriz de posición solar</i>	45
4.3.2 <i>Modificador de ángulo de incidencia</i>	46
4.3.3 <i>Cálculo del rendimiento óptico medio anual ponderado</i>	47
5 Descripción de la instalación	48
5.1 <i>Instalación</i>	48
5.2 <i>Año meteorológico típico de Sevilla</i>	53
6 Resultados y discusión	54
6.1 <i>Modelado en Tonatiuh del sistema concentrador lineal de Fresnel</i>	54
6.2 <i>Comparación del sistema para la orientación Norte-Sur, Este-Oeste y la orientación real</i>	55
6.2.1 <i>Orientación Norte-Sur</i>	55
6.2.2 <i>Orientación Este-Oeste</i>	57
6.2.3 <i>Orientación real</i>	58
6.2.4 <i>Comparación de los modelos con distintas orientaciones</i>	59
6.3 <i>Análisis del efecto del uso de un reconcentrador secundario</i>	59

6.4	<i>Análisis de sensibilidad sobre la calidad óptica de los espejos</i>	60
6.5	<i>Análisis de sensibilidad sobre los radios de curvatura de los espejos</i>	61
6.6	<i>Análisis sobre el efecto del ratio circumsolar</i>	62
6.7	<i>Modificador del ángulo de incidencia</i>	63
6.8	<i>Cálculo de mapas de flujo</i>	66
7	Conclusiones	71
8	Futuras líneas de I+D en la tecnología Fresnel	72
9	Referencias	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- Características del sol [1]	16
Tabla 2- Características del sistema de captación [34]	51
Tabla 3- Características de los reflectores primarios [34]	51
Tabla 4- Matriz de posición solar para la orientación Norte-Sur	56
Tabla 5- Rendimientos ópticos medios mensuales para la orientación Norte-Sur	56
Tabla 6- Matriz de posición solar para la orientación Este-Oeste	57
Tabla 7- Rendimientos ópticos medios mensuales para la orientación Este-Oeste	57
Tabla 8- Matriz de posición solar para la orientación real	58
Tabla 9- Rendimientos ópticos medios mensuales para la orientación real	58
Tabla 10- Rendimientos ópticos mensuales de los modelos reales con y sin reconcentrador	60
Tabla 11- Rendimientos anuales en función del error óptico	61
Tabla 12- Rendimientos mensuales de los sistemas con distintos radios de curvatura	62
Tabla 13- Rendimiento óptico en función del csr	63
Tabla 14- Modificador del ángulo de incidencia longitudinal	64
Tabla 15- Modificador del ángulo de incidencia transversal	64
Tabla 16- Error porcentuales en % entre el IAM y la matriz de eficiencia óptica	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1-Comparativa de la energía solar con otras fuentes energéticas [2]	17
Ilustración 2-Componentes de la radiación sobre una superficie plana inclinada [4]	17
Ilustración 3-Comparación entre una lente Fresnel (1) y una normal (2) [4]	19
Ilustración 4-Primer prototipo de Giovanni Francia, 1964 [6]	19
Ilustración 5-Campo de espejos de un concentrador lineal de Fresnel [9]	21
Ilustración 6-Montaje del tubo absorbedor en un concentrador lineal de Fresnel [10]	21
Ilustración 7- Sistema concentrador lineal compacto de Fresnel (CLFR) [11]	22
Ilustración 8-Receptor de la planta Kimberlina [12].	22
Ilustración 9-Reconcentrador trapezoidal [13]	23
Ilustración 10-Reconcentrador de FREDESMO en PSA [14]	23
Ilustración 11-Reconcentrador de Nova-1 [15]	23
Ilustración 12-Concentrador de rayos de borde adaptado (TERC) [16]	24
Ilustración 13-Diseño de reconcentrador más plano [17]	24
Ilustración 14-Prototipo de Solarmundo	25
Ilustración 15-Instalación de Liddel Solar Thermal Station	25
Ilustración 16-Planta termosolar Kimberlina [20]	25
Ilustración 17-Colector de demostración lineal MAN instalado en la PSA	26
Ilustración 18-Central PE1 [22]	26
Ilustración 19-Limpieza de espejos en PE2 [23]	27
Ilustración 20- Central PE2 [23]	27
Ilustración 21-Central Reliance Areva CSP 1 [25]	28
Ilustración 22-Coletores Fresnel de Nouva Sarda [28]	29
Ilustración 28-Ángulos de incidencia en un Fresnel [29]	30
Ilustración 29-Modificador del ángulo de incidencia en función del ángulo de incidencia [30]	31
Ilustración 30-Matriz de posición solar [31]	31
Ilustración 31-Sistema de referencia	36
Ilustración 32-Forma del sol	37
Ilustración 33-Valores de irradiancia y radio angular del disco solar.	37
Ilustración 34-Posición aparente del sol	38
Ilustración 35-Área del sol	39
Ilustración 36-Rootnode y SurfaceNode	39
Ilustración 37-Características Rootnode	40
Ilustración 38-Elección de la geometría	40
Ilustración 39-Características SurfaceNode	40
Ilustración 40-Material	41

Ilustración 41-Sigma Slope	41
Ilustración 42-Ventana de códigos	42
Ilustración 43-Ray Trace	43
Ilustración 44-Definir rayos	43
Ilustración 45-Run	44
Ilustración 46-Simulación	44
Ilustración 47-Exportar superficie	45
Ilustración 23-Elementos de la planta [34]	48
Ilustración 24-Localización de la instalación Fresnel [35]	49
Ilustración 25-Sistema de captación Fresnel de la escuela de ingenieros	50
Ilustración 26-Orientación del sistema de captación Fresnel [34]	50
Ilustración 27-Tubo absorbedor	52
Ilustración 48- Valores mensuales de radiación directa normal del AMT para la localidad de Sevilla	53
Ilustración 49-Tubo absorbedor y cubierta de vidrio	54
Ilustración 50-Campo de espejos	54
Ilustración 51-Reconcentrador secundario	54
Ilustración 52-Modelo del Fresnel en Tonatiuh	55
Ilustración 53-Rendimientos ópticos mensuales de los modelos	59
Ilustración 54- Rendimientos ópticos mensuales de los modelos reales con y sin reconcentrador	60
Ilustración 55- Rendimientos anuales en función del error óptico	61
Ilustración 56-Rendimientos mensuales de los sistemas con distintos radios de curvatura	62
Ilustración 57-Rendimiento óptico en función del csr	63
Ilustración 58-Modificador del ángulo de incidencia en función del ángulo de incidencia	65
Ilustración 59-Mapa de flujo del absorbedor en verano	67
Ilustración 60- Mapa de flujo del reconcentrador en verano	68
Ilustración 61- Mapa de flujo del absorbedor en invierno	69
Ilustración 62- Mapa de flujo del reconcentrador en invierno	70

1 INTRODUCCIÓN

“El sol no se ha puesto aún por última vez”.

- Tito Livio -

1.1 El sol como fuente energética

Casi toda la energía que disponemos proviene del Sol. Es la causa de los vientos, de la evaporación de las aguas, de la formación de nubes, de las lluvias y, por consiguiente, de los saltos de agua. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de los vegetales y de los animales que con el paso de los siglos han originado combustibles fósiles como el carbón o el petróleo. No obstante, la radiación solar tiene otra importancia capital: es una fuente inagotable de energía renovable. La energía de los vientos, de las mareas o biomasa no son más que manifestaciones indirectas de la energía solar.

De manera simple, se puede considerar al Sol como una esfera no homogénea compuesta por diversos elementos y cuyas características principales son las que aparecen en la **¡Error! No se encuentra el origen de a referencia..**

Masa:	$1,99 \times 10^{30}$ kg
Diámetro:	$1,392 \times 10^9$ m
Superficie:	$6,087 \times 10^{18}$ m ²
Volumen:	$1,412 \times 10^{27}$ m ³
Densidad media:	$1,41 \times 10^3$ kg/m ³
Diámetro angular (desde la Tierra):	31 m 59,3 s
Distancia media Tierra-Sol:	$1,496 \times 10^{11}$ m
Temperatura efectiva:	5777 K
Potencia:	$3,86 \times 10^{26}$ W
Irradiancia:	$6,35 \times 10^7$ W/m ²

Tabla 1- Características del sol [1]

La radiación solar interceptada por la Tierra constituye la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance. La cantidad de energía solar captada por la Tierra anualmente es aproximadamente de $5,4 \times 10^{24}$ J [2]. En la Ilustración 1 se puede apreciar la energía consumida en un año, que es del orden de $3,94 \times 10^{20}$ J en el año 2014 [3], en comparación con la energía solar anual. La energía solar captada por la Tierra supone el 0.0073% de la energía consumida en el mundo.

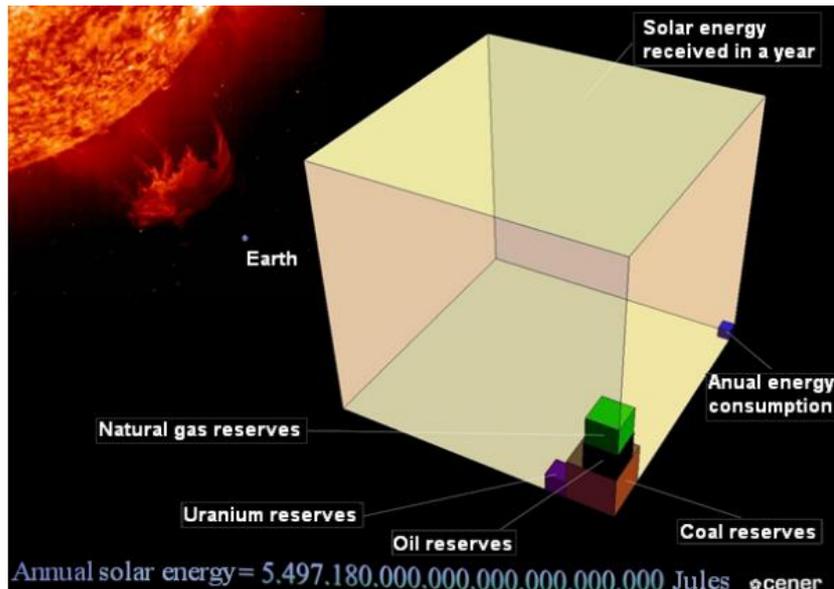


Ilustración 1-Comparativa de la energía solar con otras fuentes energéticas [2]

A pesar de su abundancia, el aprovechamiento de la energía solar está condicionado principalmente por tres aspectos: la intensidad de la radiación solar recibida por la Tierra, los ciclos diarios y anuales a los que está sometida y las condiciones climatológicas de cada lugar.

A efectos prácticos, desde la Tierra, el Sol puede ser considerado como un foco térmico a 5777 K y que nos hace llegar 1367 W/m² en forma de irradiación. Las pérdidas en la atmósfera por reflexión, absorción y dispersión reducen este valor alrededor de un 30%, quedándose en torno a los 1000 W/m². Estos valores de irradiación varían en función de las condiciones climatológicas y del punto del mapa terrestre donde nos encontremos, oscilando siempre entre 0 W/m² y valores algo superiores a 1000 W/m².

De forma general, se puede decir que la radiación incidente sobre la superficie terrestre tiene dos componentes: la radiación directa, que no ha sufrido modificación en su dirección desde el Sol, y la radiación difusa, procedente de todas las direcciones de la semiesfera celeste por encima del plano horizontal así como de la reflexión de la radiación reflejada por el suelo.

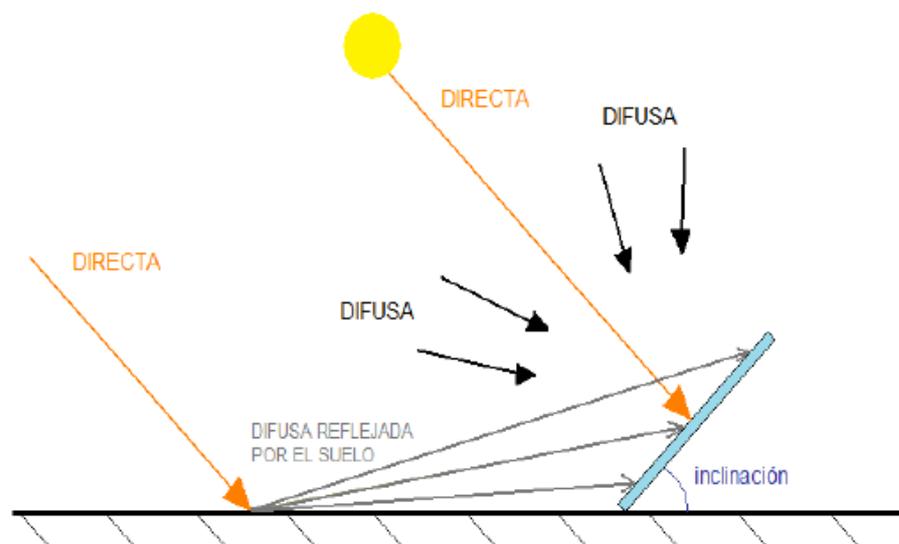


Ilustración 2-Componentes de la radiación sobre una superficie plana inclinada [4]

1.2 Concentradores lineales de Fresnel

Los sistemas termosolares de concentracion se caracterizan por el uso de dispositivos que redireccionan la radiacion solar incidente sobre una determinada superficie (superficie de captacion) y la concentran sobre una superficie de menor tamaño (superficie absorbedora).

Los sistemas termosolares de concentracion permiten alcanzar mayores temperaturas en el fluido de trabajo que los sistemas termosolares de baja temperatura. Sin embargo, las perdidas por radiacion en el receptor son proporcionales a la cuarta potencia de la diferencia de temperatura entre este y los alrededores, por lo que su rendimiento disminuira con dicha diferencia. Estas perdidas son, ademas, proporcionales al area de la superficie absorbedora, que puede reducirse si se aumenta la relacion de concentracion. Una característica diferencial de estos es que la concentracion de la radiacion se realiza mediante reflexiones especulares, y esto hace que unicamente sea aprovechable la componente directa de la radiacion solar. Los sistemas termosolares de concentracion son, de forma general, sistemas de aprovechamiento de la energia solar en media y alta temperatura.

Existen diversos tipos de sistemas termosolares de concentracion, segun la forma en que concentran la radiacion solar:

- Foco lineal (2D): Estos sistemas concentran la energia solar mediante espejos que reflejan y enfocan la radiacion solar sobre un tubo absorbedor. Por el interior del tubo circula un fluido caloportador que es calentado. Este calor puede ser producido despues, por ejemplo, para producir vapor de agua sobrecalentado y expandirlo en una turbina, o para accionar una maquina de absorcion.

Los campos de colectores lineales suelen constar de un gran número de espejos colocados en filas paralelas, normalmente alineadas en direccion norte-sur para maximizar la produccion anual. Estas filas de espejos disponen de un sistema de seguimiento solar en un unico eje que les permite girar para asegurar que la radiación es continuamente reflejada sobre el tubo absorbedor.

Existen dos tipos de concentradores lineales:

- Concentradores cilindro-parabolicos
- Concentradores tipo Fresnel

- Foco puntual (3D): En este caso, la radiacion es reflejada desde los espejos hacia un punto concreto. Esto hace necesario un seguimiento solar en dos ejes, lo que encarece los costes, pero tambien reduce las perdidas. Una de las principales ventajas de los receptores puntuales son las altas temperaturas que se alcanzan, que favorecen rendimientos más altos.

Existen dos tipos de concentradores de foco puntual:

- Campos de heliostatos con sistema de torre central
- Discos parabolicos con motor Stirling

Los concentradores lineales de Fresnel se basan en la idea de aproximar un concentrador continuo lineal. Con esta idea, se evitan problemas que plantea la construcción de concentradores de gran tamaño, permitiendo adoptar soluciones de menor coste. Esta idea fue llevada a la práctica por primera vez por Giovanni Francia a finales de los años 1960 [5].

Los concentradores lineales de Fresnel se componen de largas filas de espejos planos (con una ligera curvatura) que actúa como lentes Fresnel.

Las lentes Fresnel son más delgadas que las convencionales porque en lugar de conseguir la desviación de los rayos mediante la diferencia de grosor del cristal entre los extremos y el centro, lo realiza con diferentes perfiles confocales. Similarmente, en lugar de concentrar los rayos de sol con un gran espejo curvo se hace con muchos espejos delgados y planos, con diferente orientación. Esto hace que tanto la estructura como los espejos sean más fáciles de construir [6].

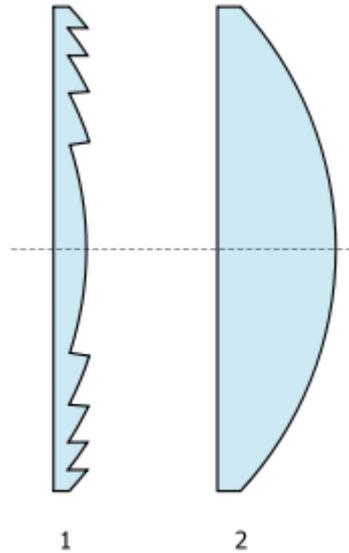


Ilustración 3-Comparación entre una lente Fresnel (1) y una normal (2) [4]

Constituyen una tecnología relativamente nueva que pretende abrirse camino en un mercado dominado por los captadores de tipo cilindro-parabólicos, gracias a ventajas como las enunciadas a continuación [7]:

- Espejos y sistema de seguimiento de bajo coste.
- Los espejos no tienen que soportar el tubo receptor, con lo que son estructuralmente más simples.
- Tubo absorbedor fijo: no se necesitan juntas flexibles, como si ocurre en el diseño cilindro-parabólico o en el disco parabólico.
- No se necesitan tubos de vacío.
- No se necesitan codos de expansión (el absorbedor está libre por un extremo para dilatarse).
- Reflectores planos y situados cerca del suelo, se reducen cargas de viento.
- Uso eficiente del suelo, las filas de colectores pueden situarse una cerca una de la otra.
- Fácil acceso a las partes móviles y superficiales.

Los concentradores lineales de Fresnel son, por tanto, una alternativa de bajo coste a los sistemas de canal parabólico. Un sistema de este tipo está compuesto por largas filas paralelas de espejos de anchura relativamente pequeña que pueden girar alrededor de su eje longitudinal. Estos espejos, que pueden ser planos o estar curvados elásticamente, concentran la radiación solar sobre un receptor central fijo suspendido a una cierta altura sobre el plano de los espejos en la dirección del eje de rotación de los espejos. Suele ir acompañado de un reconcentrador secundario sobre el receptor.



Ilustración 4-Primer prototipo de Giovanni Francia, 1964 [6]

Esta geometría permite disponer dos o más receptores en paralelo, relativamente próximos entre sí, posibilitando así que parte de las filas de espejos sean compartidas por dos de estos receptores. Esta configuración permite optimizar el aprovechamiento del terreno y minimizar los bloqueos entre filas de espejos.

El campo solar puede desplegarse sobre un plano horizontal con seguimiento este-oeste o norte-sur.

El elemento principal del receptor es el tubo absorbedor, que es esencialmente similar al empleado en los sistemas de canal parabólico, aunque al trabajar a menores temperaturas (la relación de concentración alcanzable con esta geometría es relativamente baja, del orden de 20) puede prescindirse de recubrimientos selectivos costosos y del tubo de vidrio.

Estos sistemas son muy adecuados para la generación directa de vapor saturado en los tubos. El vapor saturado puede emplearse para generación de electricidad (turbina de vapor) o como aporte de calor a un proceso industrial o a una máquina de absorción (frío solar).

El buen aprovechamiento del terreno, unido a su ligereza, construcción simple y bajo coste (todos los elementos que integran un sistema de este tipo son relativamente simples en su fabricación e instalación) está propiciando el rápido desarrollo de esta tecnología. Como contrapartida, posee una capacidad de concentración relativamente baja, lo cual impide trabajar de forma eficiente a altas temperaturas y limita sus rendimientos energéticos y exergéticos [5]. Para compensar esto, se utiliza el reconcentrador secundario.

Las principales empresas que operan con tecnología Fresnel son: Austra, Solarmundo, Solar Power Group y Novatec [7].

1.2.1.1 Componentes de un concentrador lineal de Fresnel

Un concentrador lineal de Fresnel está formado por los siguientes componentes [8]:

- Cimentación y estructura soporte
- Sistema de seguimiento solar
- Reflector primario
- Tubo absorbedor
- Reconcentrador

1.2.1.1.1 Cimentación y estructura soporte

Simple y ligera. Tiene un diseño que disminuye los costes, el trabajo de limpieza y el riesgo de avería en condiciones climáticas adversas en relación a otras tecnologías de concentración.

1.2.1.1.2 Sistema de seguimiento solar

Cada línea de espejos tiene una inclinación, pero al realizar el seguimiento del sol a lo largo del día todos realizan el movimiento relativo. Pueden moverse todas las filas con un mismo motor o disponer de varios motores y combinar filas.

1.2.1.1.3 Reflector primario

Este componente también recibe el nombre de campo de espejos. Son los encargados de reflejar y concentrar la luz del sol en el tubo absorbedor, tal y como se aprecia en la Ilustración 5:



Ilustración 5-Campo de espejos de un concentrador lineal de Fresnel [9]

1.2.1.1.4 Tubo absorbedor

El tubo absorbedor está protegido por una cubierta de vidrio y el reconcentrador, que ayuda a aprovechar los rayos reflejados que no llegan al tubo.

Por el interior del tubo absorbedor circula el fluido térmico, el cual puede ser aceite, agua e incluso sales fundidas.

Las principales características que debe cumplir el tubo absorbedor son una buena transmisión de calor con el fluido térmico y una distribución de temperaturas a lo largo del tubo uniforme, para evitar así una rápida degradación del material.

En general, los sistemas concentradores lineales de Fresnel difieren en el montaje del tubo absorbedor y la disposición del campo. El absorbedor puede colocarse horizontal, vertical o triangular [10], como se muestra en la Ilustración 6. Cabe mencionar que los receptores que se aprecian en la ilustración son receptores planos.

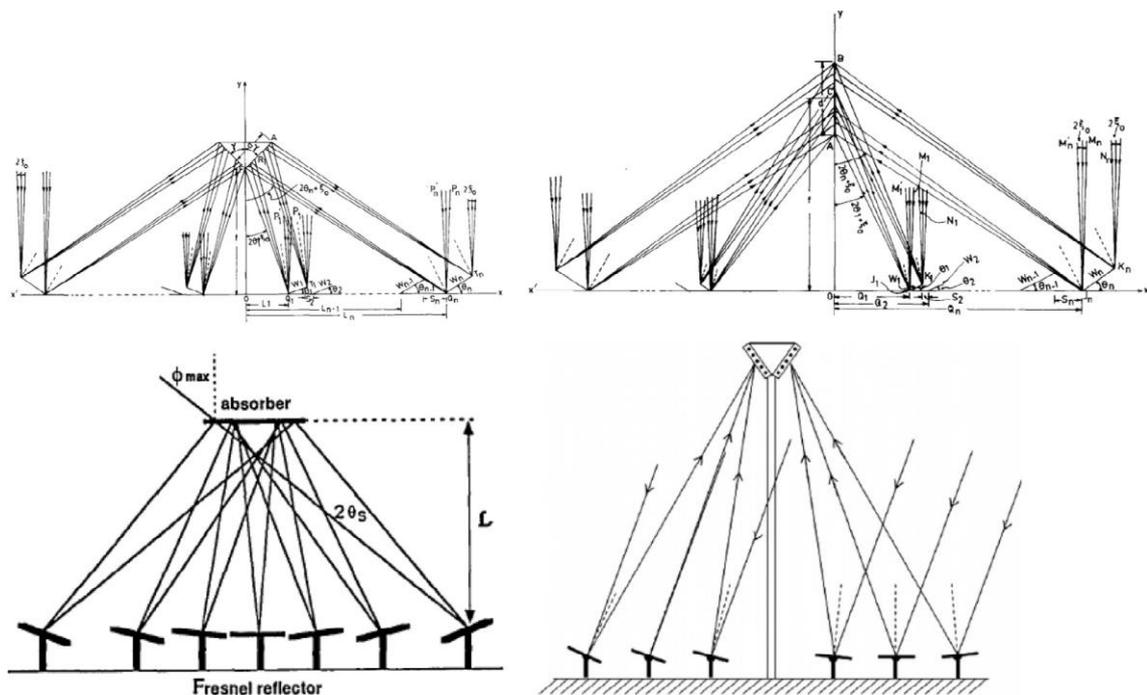


Ilustración 6-Montaje del tubo absorbedor en un concentrador lineal de Fresnel [10]

En particular, el concepto de sistema concentrador lineal compacto de Fresnel (CLFR) puede utilizar dos torres receptoras separadas, como se muestra en la Ilustración 7.

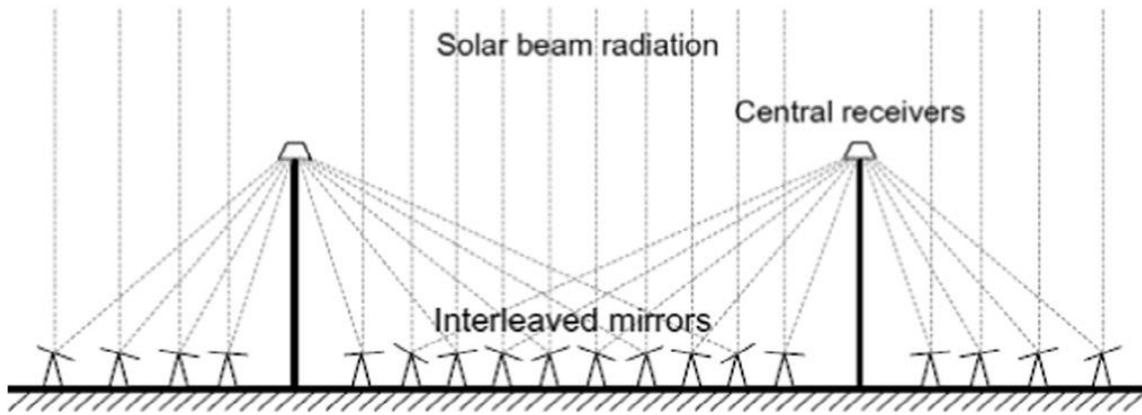


Ilustración 7- Sistema concentrador lineal compacto de Fresnel (CLFR) [11]

Un espejo en el CLFR puede rastrear a cualquiera de los receptores a una hora determinada del día en función de qué opción de seguimiento proporciona menos pérdida por sombras y bloqueos. Esto puede proporcionar una mejor eficiencia óptica, pero aumenta la complejidad de diseño del mecanismo de seguimiento.

Se puede disponer de más de un tubo absorbedor en el receptor para aumentar la eficiencia óptica, como aparece en la Ilustración 8.



Ilustración 8-Receptor de la planta Kimberlina [12].

Cuando se utiliza un único tubo absorbedor para reducir la fabricación y el coste del equipo, se suele utilizar un reconcentrador para aumentar la eficiencia óptica del sistema.

1.2.1.1.5 Reconcentrador

El objetivo del reconcentrador o concentrador secundario es redirigir al tubo absorbedor los rayos que le llegan a él.

Para el diseño de dicho reconcentrador no hay un criterio estandarizado, por lo que, en la actualidad, no hay consenso de la forma óptima de dicho reconcentrador.

A continuación, se mostrarán ejemplos de algunos diseños de reconcentradores.

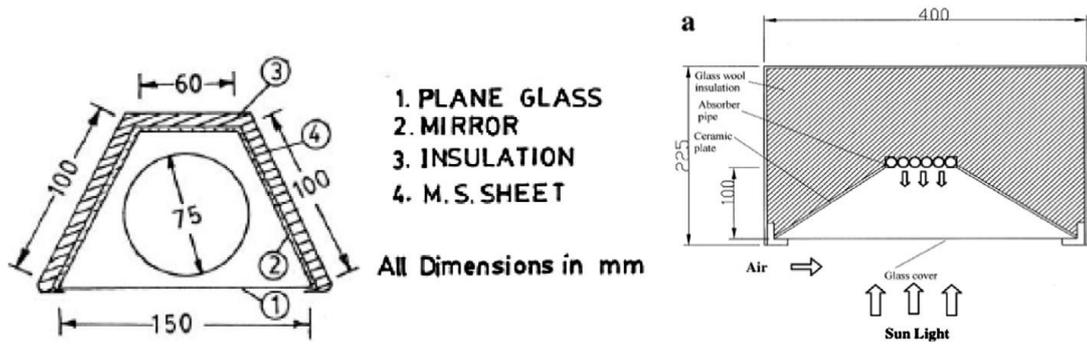


Ilustración 9-Reconcentrador trapezoidal [13]

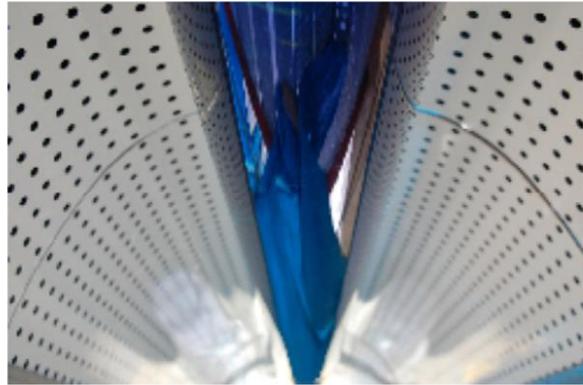


Ilustración 10-Reconcentrador de FREDESMO en PSA [14]

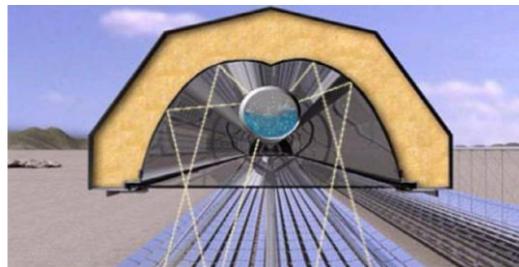


Ilustración 11-Reconcentrador de Nova-1 [15]

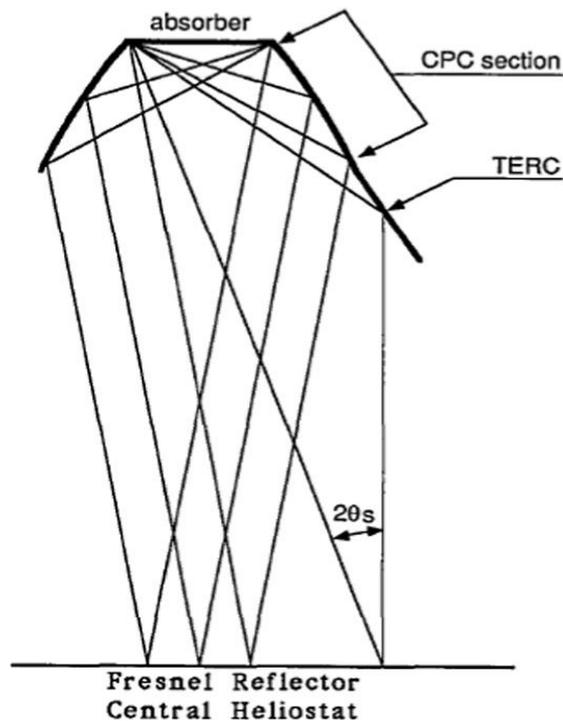


Ilustración 12-Concentrador de rayos de borde adaptado (TERC) [16]

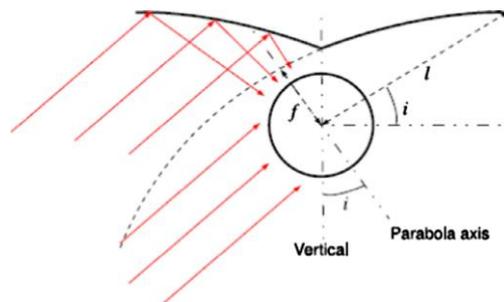


Ilustración 13-Diseño de reconcentrador más plano [17]

1.2.1.2 Instalaciones termosolares con colectores lineales de Fresnel

1.2.1.2.1 En operación

- Prototipo de Solarmundo en Bélgica [18]

Se construyó un prototipo en 1999 de un sistema concentrador de Fresnel en Bélgica. Consta de 2500 metros cuadrados de área de campo y se utiliza principalmente para pruebas de aspectos mecánicos del colector, por lo que el bajo recurso solar de la región no es un problema. Presenta una eficiencia óptica con radiación perpendicular de 61%.



Ilustración 14-Prototipo de Solarmundo

- Liddel Solar Thermal Station [19]

Construida en Nueva Gales del Sur (Australia) por la compañía Ausra. Es una planta de apoyo a la central térmica de carbón de la empresa Macquarie Generation's. El tamaño de la planta es algo mayor de 10 MWe.



Ilustración 15-Instalación de Liddel Solar Thermal Station

- Kimberlina Solar Thermal Energy Plant [4]

Construida en Bakersfield, California, por la empresa Areva Solar. Se terminó en el año 2008 y utiliza la tecnología CLFR para generar vapor sobrecalentado. Tiene una potencia de 5 MWe. El campo solar tiene un tamaño de 26000 metros cuadrados y los colectores una longitud de 385 metros.



Ilustración 16-Planta termosolar Kimberlina [20]

- Lazo Fredesmo (PSA) [21]

Es una instalación piloto para la tecnología de concentración solar lineal de Fresnel construida en la PSA, en Almería (España). Se trata de un módulo de 100 metros de longitud y 21 metros de ancho, con una superficie total espejos de 1433 metros cuadrados. Son un total de 1200 espejos, distribuidos en 25 filas paralelas. Está diseñado para la producción de directa de vapor a una presión máxima de 100 bar y una temperatura máxima de 450°C.



Ilustración 17-Colector de demostración lineal MAN instalado en la PSA

- La central de Puerto Errado (PE1 yPE2) [4]

La Puerto Errado 1 fue construida en Calasparra, Murcia (España) por la empresa Novatec Biosol en el año 2009. Tiene dos líneas de colectores de 16x980 metros cada una, con una superficie de espejos de 18000 metros cuadrados y una potencia nominal de 1,4 MWe.



Ilustración 18-Central PE1 [22]

Uno de los puntos fuertes de esta tecnología es la facilidad de limpieza y mantenimiento. En la Ilustración 19 se muestra la automatización de la limpieza de los espejos con un robot.



Ilustración 19-Limpieza de espejos en PE2 [23]

Novatec Biosol ha desarrollado el sistema modular NOVA-1, que consta de 128 espejos dispuestos en 16 filas paralelas, con un área de apertura de 513,6 metros cuadrados. Los módulos básicos se unen longitudinalmente para formara una fila colectora.

- Mínima longitud de la fila: 5 módulos (224 metros).
- Máxima longitud de la fila: 22 módulos (985 metros).

La planta Puerto Errado 1 cuenta con 36 módulos NOVA-1 que ocupan 18000 metros cuadrados [24]

La planta PE2 ya se ha puesto en funcionamiento en 2012 en la misma localidad, y cuenta con una potencia de 30 MWe.



Ilustración 20- Central PE2 [23]

- Reliance Areva CSP1

Central construida en Rajasthan, la India, por la empresa Reliance Power AREVA en el año 2014. Cuenta con una potencia de 250 MWe, distribuida en dos plantas de 125 MWe cada una.



Ilustración 21-Central Reliance Areva CSP 1 [25]

1.2.1.2.2 En construcción

Actualmente hay proyectados dos proyectos con concentradores lineales de Fresnel. Por un lado, se encuentra el proyecto Kogan Creek de Areva, en Kogan Creek, Australia, con una potencia de 44 MWe, y por otro lado el proyecto Alba Nova 1 de Solar Euromed en Corsica, Francia, con una potencia de 12 MWe [26].

1.2.1.3 Calor solar para procesos industriales

Se disponen actualmente de varias instalaciones de concentradores lineales de Fresnel para procesos industriales, entre las que se destacan [27]:

- Nouva Sarda Industria Caseria: Situada en la isla italiana de Cerdeña, y proporciona calor para la industria lacteal. Se puso en funcionamiento en el año 2015, con un área de campo de 995 metros cuadrados y una potencia térmica de 470 kWt.



Ilustración 22-Colectores Fresnel de Nouva Sarda [28]

- Winery Grombalia: Situada en Tunez y propiedad de Winery, esta instalación proporciona calor de procesos para una industria de bebidas. Se puso en funcionamiento en el año 2008, con un área de apertura de 120 metros cuadrados y una potencia térmica de 84 kWt.

2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es el análisis óptico de un sistema de captación Fresnel, concretamente, el de la planta de refrigeración solar de la escuela de ingenieros de Sevilla. , o el uso de reconcentrador secundario Estos estudios se llevarán a cabo con la matriz de posición solar

Otro objetivo del proyecto es analizarmás usadas ,e Se hará una comparativa del rendimiento anual siguiendo ambos métodos.Para ello se utilizará el software Tonatiuh, de trazado de rayos. Se modelará el sistema y posteriormente se procederá a su simulación para todas las posiciones posibles del sol, obteniendo así la matriz de posición solar, la cual depende únicamente de la geometría del sistema y de la posición del sol (acimut y elevación). Una vez se tiene dicha matriz, con un año meteorológico típico, podemos calcular el rendimiento óptico medio anual para una localización en concreto.

También se abarcará el estudio del cálculo del modificador del ángulo de incidencia, otra forma de expresar el rendimiento óptico del campo solar, y se procederá a un análisis comparativo de los dos métodos para el cálculo del rendimiento óptico del sistema concentrador de Fresnel.

Se realizarán análisis de sensibilidad sobre el sistema Fresnel tales como la influencia de la curvatura de los espejos, calidad óptica de los mismos... para observar como afectan estos parámetros al rendimiento óptico medio anual.

3 ANTECEDENTES

3.1 Métodos de cálculo del rendimiento óptico

La tecnología de concentrador lineal de Fresnel no ha tenido un desarrollo muy significativo años atrás, y parece que cada vez está ganando más fuerza y se está abriendo hueco en el mundo de la energía solar de concentración.

El cálculo del rendimiento óptico de un concentrador lineal de Fresnel es un proceso complejo, y para ello se disponen de herramientas de simulación de ray tracing (trazado de rayos), las cuales utilizan el algoritmo computacional de Monte Carlo para simular el comportamiento óptico de un sistema solar de concentración, observando las interacciones entre las superficies del sistema y los rayos lanzados.

Como en todos los procesos de simulación que usan el método de Monte Carlo, la precisión en los resultados obtenidos depende del número de sucesos ensayados. La precisión en los resultados aumenta conforme lo hace el número de rayos que se procesan.

Los métodos más habituales para el cálculo del rendimiento óptico de un sistema concentrador de Fresnel son el cálculo del modificador del ángulo de incidencia y, por otro lado, el cálculo de la matriz de eficiencias en función de la posición solar.

El método más empleado para el cálculo del rendimiento óptico de un sistema concentrador Fresnel es el modificador del ángulo de incidencia. Pueden definirse un ángulo de incidencia transversal y otro longitudinal, tal y como se puede ver en la Ilustración 23.

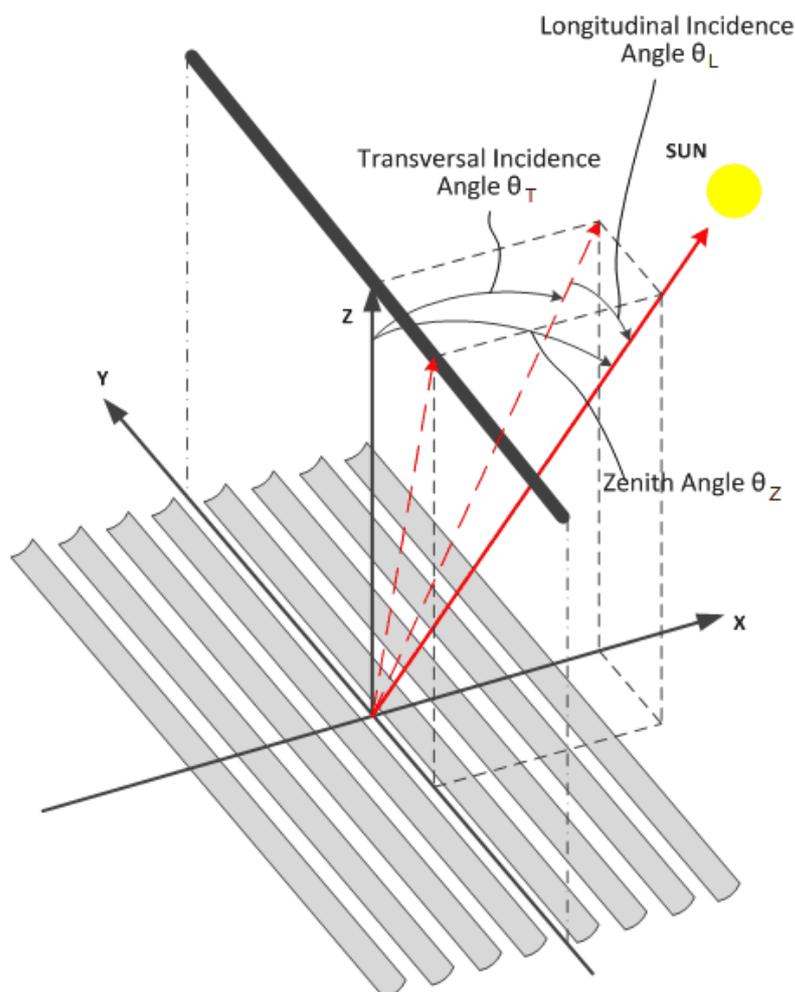


Ilustración 23-Ángulos de incidencia en un Fresnel [29]

Al disponer de dos ángulos de incidencia, se obtienen dos modificadores, uno transversal y otro longitudinal. En la Ilustración 24 se muestran las curvas de los modificadores del ángulo de incidencia en términos cualitativos.

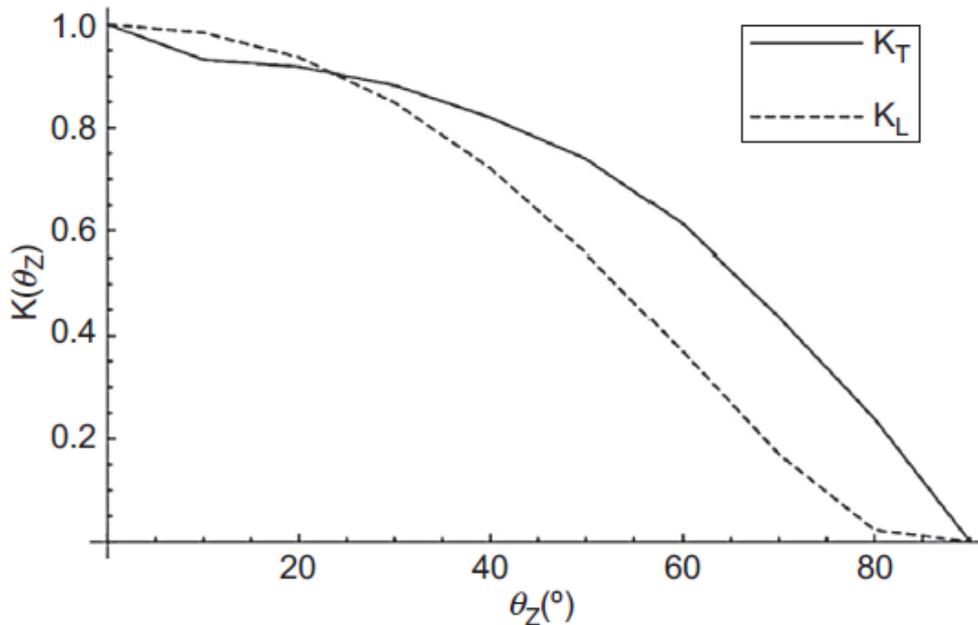


Ilustración 24-Modificador del ángulo de incidencia en función del ángulo de incidencia [30]

El modificador del ángulo de incidencia se define como el cociente entre el rendimiento óptico en un punto y un rendimiento óptico de referencia (el rendimiento óptico en el cenit).

Con la elevación y el acimut se calculan los ángulos de incidencia, y con ellos se entran en las gráficas como la de la Ilustración 24. En el eje x entras con el ángulo de incidencia y en el eje y se representa el modificador del ángulo de incidencia. Por ejemplo, para un ángulo de incidencia transversal de 60°, el modificador del ángulo de incidencia es 0.65, mientras que para un ángulo de incidencia longitudinal es 0.4. Con los modificadores del ángulo de incidencia se calcula el rendimiento óptico del campo.

Otra forma de expresar el rendimiento óptico del sistema concentrador de Fresnel es con una matriz de posición solar. Una matriz de posición solar es una matriz que expresa el rendimiento óptico del sistema en función de la elevación y el acimut solar. Para cada combinación de elevación y acimut se realiza una simulación, por lo que es un método más laborioso que el del modificador del ángulo de incidencia. Un ejemplo de matriz de posición solar aparece recogida en la Ilustración 25.

-Solar Position/Collector Incidence Angle Table

Import...	Export...	Copy	Paste	Rows (zenith):	11	Cols (azimuth):	20	
0	-180	-160	-140	-120	-100	-80	-60	-40
0	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0.98	0.974445	0.971976	0.972847	0.97691	0.97691	0.972847	0.971976
20	0.93	0.922976	0.92893	0.946005	0.954019	0.954019	0.946005	0.92893
30	0.84	0.838618	0.870691	0.913021	0.940911	0.940911	0.913021	0.870691
40	0.72	0.729947	0.803687	0.866961	0.900039	0.900039	0.866961	0.803687
50	0.55	0.591255	0.707454	0.793509	0.83956	0.83956	0.793509	0.707454
60	0.34	0.432178	0.597478	0.664006	0.693511	0.693511	0.664006	0.597478
70	0.13	0.265254	0.425586	0.464496	0.477106	0.477106	0.464496	0.425586
80	0.01	0.113694	0.20891	0.233255	0.238828	0.238828	0.233255	0.20891

Specifying solar position table: Rows indicate solar zenith angles (deg), columns are solar azimuth angles (deg)

Specifying collector incidence angle table: Rows indicate longitudinal incidence angles (deg), columns indicate transversal incidence angles (deg)

Ilustración 25-Matriz de posición solar [31]

Donde en las columnas aparece el acimut y en las filas la elevación. Para una posición de acimut -60° y elevación 60° , la eficiencia óptica del sistema es de 0,664.

3.2 Factores que afectan al rendimiento óptico de un concentrador lineal de Fresnel

Los principales factores que afectan al rendimiento óptico de un concentrador lineal de Fresnel se derivan de la propia geometría del concentrador:

- Número de espejos
- Altura del tubo receptor
- Sombras producidas por los espejos
- Sombra del receptor
- Sombra del reconcentrador
- Sombra de la estructura
- Radio de curvatura de los espejos

Otros factores que afectan al rendimiento óptico de un concentrador lineal de Fresnel son la calidad óptica y la reflectividad de las superficies reflectoras (espejos y reconcentrador).

El uso de reconcentrador y la distribución del sol también son factores que afectan al rendimiento óptico.

3.3 Herramientas de simulación

Se disponen de dos herramientas de simulación para el análisis óptico de un concentrador lineal de Fresnel, una analítica y otra mediante el uso de software de ray tracing.

3.3.1 Analítica

Un modelo analítico es aquel que utiliza modelos teóricos validados para analizar el comportamiento de un sistema siguiendo la física del mismo.

Un modelo analítico matemático sobre el estudio de un concentrador lineal de Fresnel aparece recogido en [32].

El objetivo principal de dicho modelo es calcular la radiación solar que sale del campo solar y llega al tubo receptor. El modelo analítico también calcula todos los parámetros ópticos del sistema colector primario tales como: inclinación de filas de espejo, sombreado entre filas, pérdidas de factor de coseno, etc.

El modelo se ha desarrollado en dos partes para reflejar cada uno de los subsistemas dentro de la planta.

El modelo óptico bidimensional se usa para simular la posición de los espejos y el sombreado entre las filas.

El modelo tridimensional se utiliza para modelar tanto la energía radiante recibida por el receptor desde las filas de los espejos como la transferencia de calor al fluido de trabajo.

3.3.2 Ray Tracing

El ray tracing o trazado de rayos es un algoritmo para síntesis de imágenes tridimensionales. El concepto se basa en la emisión de rayos desde un foco de forma aleatoria el cual interacciona con las superficies definidas, viendo así las interacciones que se producen en ellas. La interacción de los rayos con las superficies depende de las características de las superficies, las cuales se definen en el proceso.

El ray tracing se basa en el método de Monte Carlo, un método no determinista o estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud.

Se disponen de multitud de software los cuales utilizan el método de ray tracing como POV-Ray, TracePro o

Tonatiuh. Para el análisis óptico de un sistema de concentración solar el método de ray tracing es fundamental ya que permite simular el comportamiento del sistema de una forma muy precisa. En el presente proyecto se usa Tonatiuh.

4 METODOLOGÍA

4.1 Tonatiuh

4.1.1 Qué es Tonatiuh [2]

Tonatiuh es un programa de simulación del comportamiento óptico-energético de sistemas solares de concentración.

Tiene la intención de avanzar en el estado de la técnica de las herramientas de simulación para el diseño y análisis de sistemas de concentración solar, y de hacer esas herramientas disponibles gratuitamente para cualquier persona interesada en el uso y la mejora de ellos. Algunos de los objetivos de diseño más relevantes de Tonatiuh son los siguientes:

- Desarrollar una base teórica sólida que facilite la simulación óptica de casi cualquier tipo de sistema de concentración solar.
- Mostrar una arquitectura de software limpio y flexible que permita al usuario adaptar, ampliar, aumentar y modificar sus funcionalidades con facilidad.
- Lograr la independencia del sistema operativo a nivel de código fuente y ejecutarlo en las principales plataformas con ninguna o pequeñas variaciones de su propio código fuente
- Proporcionar a los usuarios una interfaz avanzada y de fácil uso gráfico.

Tonatiuh utiliza el algoritmo computacional de Monte Carlo para simular el comportamiento óptico de un sistema solar de concentración, lanzando rayos desde una fuente solar simulada y observando las interacciones entre estos rayos y las superficies del sistema.

Como en todos los procesos de simulación que usan el método de Monte Carlo, la precisión en los resultados obtenidos depende del número de sucesos ensayados. Así, en Tonatiuh, la precisión en los resultados aumenta conforme lo hace el número de rayos que se procesan.

Tras la simulación, se puede observar e interpretar el comportamiento simulado del sistema exportando un “mapa de fotones” para la superficie o superficies que se desean analizar en forma de archivo en código binario o base de datos SQL.

Una vez guardados los resultados de la simulación, se necesita un programa matemático o haber programado una herramienta externa para analizar el resultado. En este proyecto se ha usado la herramienta R Project para el postprocesado.

Para la simulación del funcionamiento de un sistema de concentración solar requiere establecer adecuadamente la distribución energética de la forma solar que actúa en el proceso, el error óptico que defina las propiedades del concentrador analizado, ya sea teórico o determinado experimentalmente, y la forma solar efectiva resultante de la interacción con la superficie reflectiva.

4.1.2 Variables típicas del programa

- Sistema de coordenadas: El sistema de coordenadas usado por Tonatiuh marca que el norte se encuentra en el eje Z negativo y el sur en el Z positivo, mientras que el este se encuentra en el X positivo y el oeste en el X negativo.

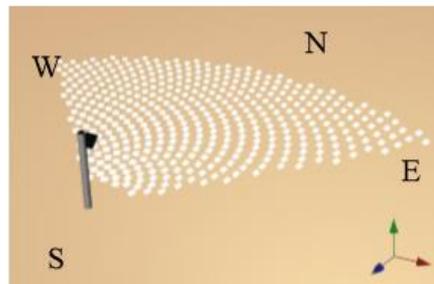
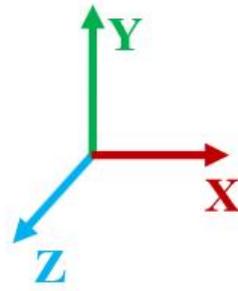


Ilustración 26-Sistema de referencia

- Forma del sol: Parte de la complejidad de la resolución del problema óptico en el análisis energético mediante Tonatiuh radica en cómo establecer la forma solar. Ya que el sol es la fuente emisora de radiación que vamos a proyectar, definiremos “forma solar” como el concepto que recoge las variaciones sobre la distribución radial de energía como fuente luminosa no puntual.

Tonatiuh recoge dos posibles formas solares: Pillbox y Buie.

Debido a la relación que hay entre el radio solar y la distancia del sol a la tierra, este es visto como un disco cuyo diámetro abarca aproximadamente 9,3 mrad. De esta forma a cada punto de la tierra llega un haz de rayos procedentes de los diferentes puntos del disco formando así un cono solar con una apertura angular de 9,3 mrad.

La distribución energética tipo Pillbox es una distribución constante que toma como aproximación que el Sol es una esfera uniforme con una temperatura de 5777K de forma que un observador lejano lo percibiría como un disco perfecto con brillo constante.

Sin embargo, en las estrellas se produce un oscurecimiento de los bordes debido a interacciones energéticas con la atmósfera gaseosa a las cuales se debe un decaimiento de la intensidad de brillo. La radiación solar se desplaza a la Tierra pasando por la atmósfera donde interactúa con partículas de gran tamaño provocándose fenómenos de absorción y difusión. De esta forma parte de la radiación solar directa que recibe el observador viene de direcciones angulares dentro del rango $[-4,65, 4,65]$ mrad y otra parte proviene de direcciones angulares más dispersas. Esta segunda se denomina radiación circunsolar.

El csr (“Circunsolar ratio” o razón circunsolar) se define como el cociente entre la radiación circunsolar y la radiación incidente. La radiación incidente es la suma de la radiación circunsolar y la radiación procedente del disco solar.

La forma solar se selecciona en Tonatiuh de la siguiente manera:

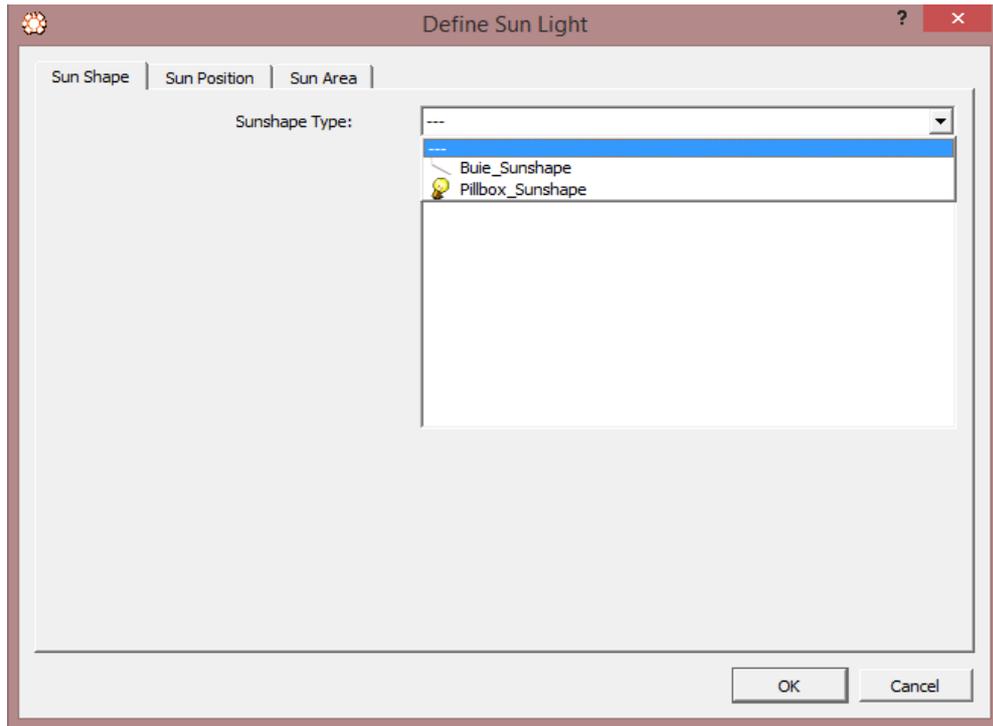


Ilustración 27-Forma del sol

Para este proyecto se seleccionará el modelo de Buie. Una vez fijado el modelo, se proporcionará el valor de irradiancia y csr, cuyos valores serán 1000 W/m^2 y 0.02 respectivamente. El valor de irradiancia utilizado en la simulación es el que se debe utilizar posteriormente para el cálculo del rendimiento óptico, mientras que el valor del csr se ha tomado por defecto de Tonatiuh, donde posteriormente se realizará un análisis de sensibilidad de dicho valor en el rendimiento óptico.

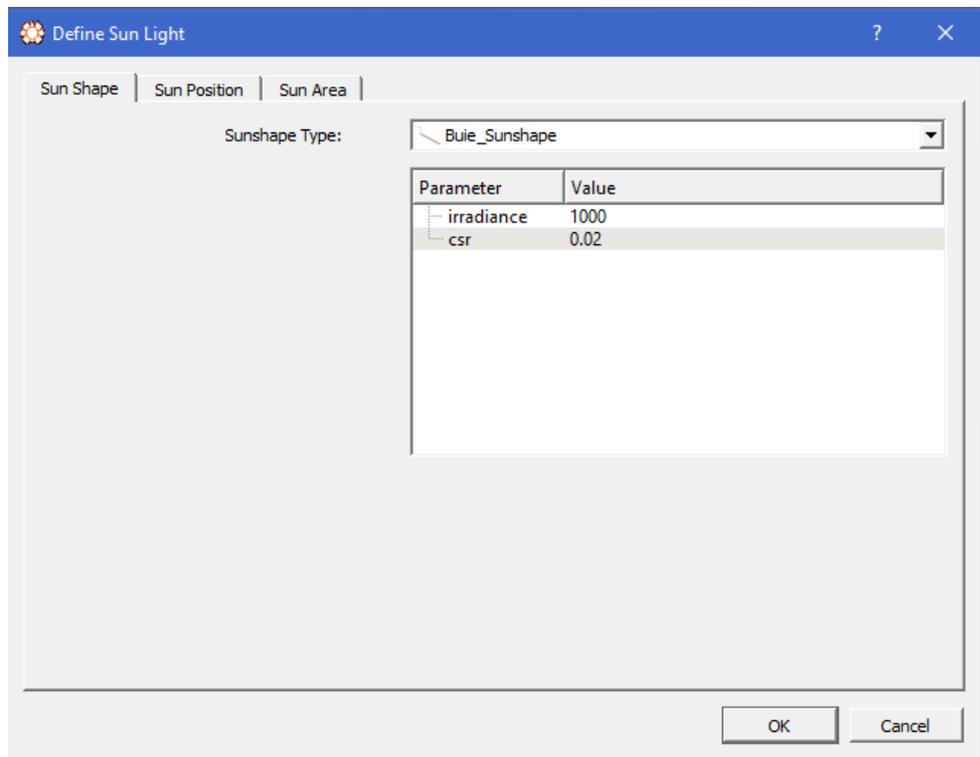


Ilustración 28-Valores de irradiancia y radio angular del disco solar.

- Posición aparente del Sol para el instante concreto en el que se van a realizar los cálculos respecto un observador situado en el centro de coordenadas de referencia. El norte representa acimut 0° y el este 90° .

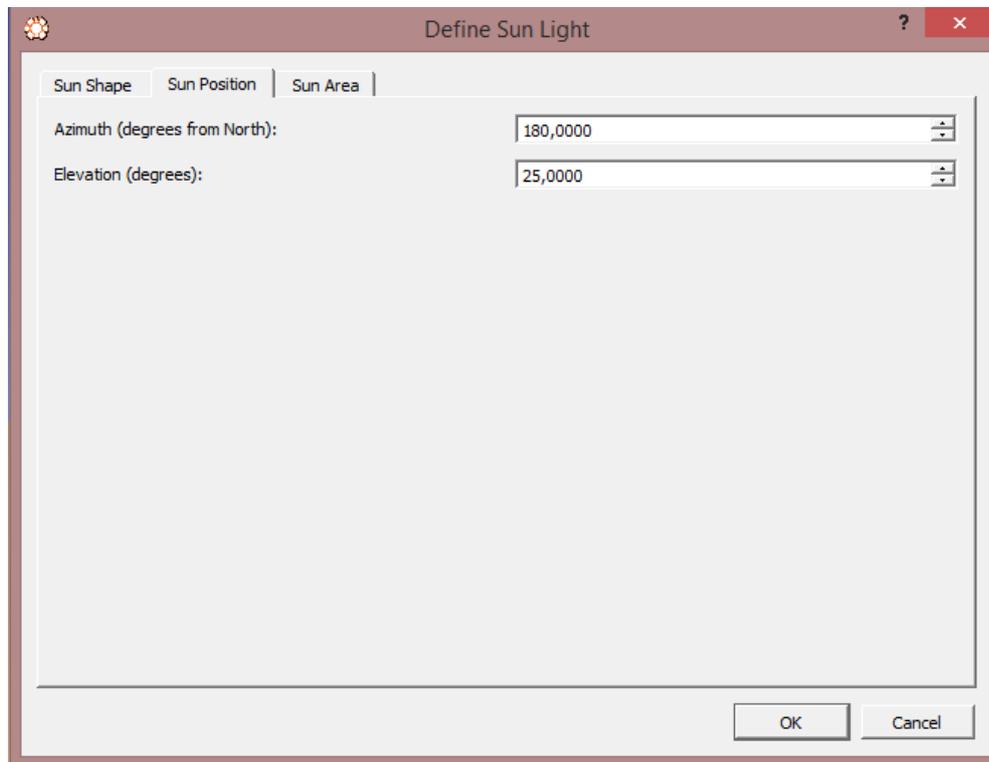


Ilustración 29-Posición aparente del sol

- Área del sol: En esta pestaña se seleccionarán los nodos en los que no se desee que impacten los rayos del sol en las iteraciones. Por ejemplo, si se tuviese una central de receptor lineal de Fresnel con tres nodos, donde uno fuese el receptor, otro el reflector secundario y otro el campo de espejos, se seleccionaría el receptor y el reflector secundario, ya que se desea que los rayos impacten por primera vez en el campo de espejos.

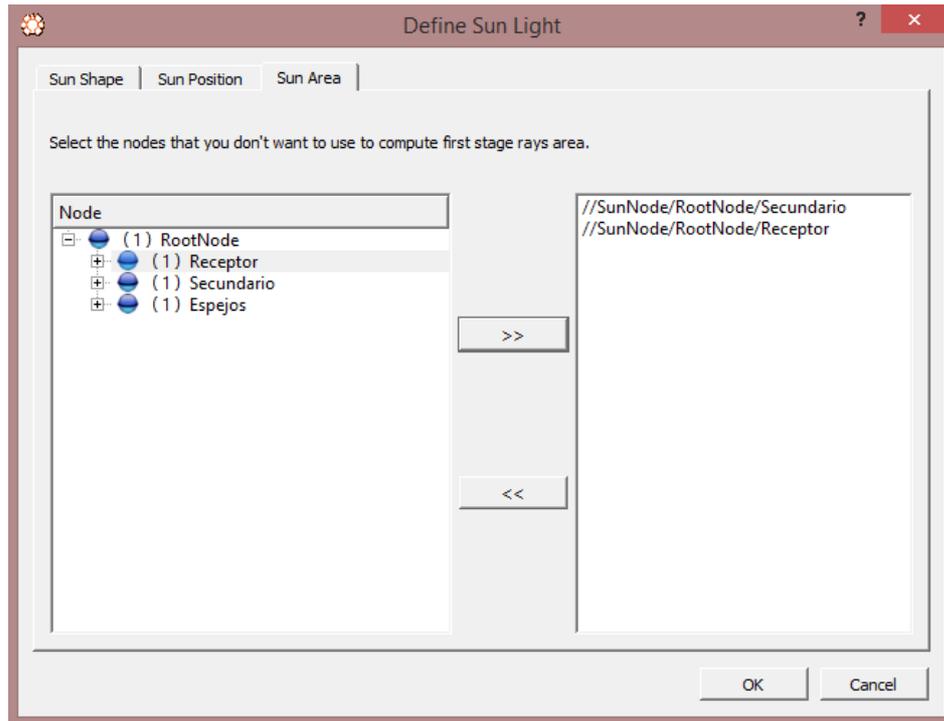


Ilustración 30-Área del sol

- **Atmósfera:** El modelo de transmisividad atmosférico se define en la pestaña “Transmissivity”, donde Tonatiuh permite escoger entre un amplio grupo de modelos. Se trabajará con el modelo de Ballestrín.
- **Geometría:** Antes de nada, hay que especificar que Tonatiuh trabaja con nodos. Los diferentes componentes del sistema se introducen como nodos, “rootnode” en Tonatiuh. Cada componente del sistema está asociado a uno diferente, que tendrá unas coordenadas determinadas para situarlo en el espacio. El “rootnode” puede cambiar de nombre una vez creado.

Una vez definido un nodo, el cual está asociado a una componente del sistema, tenemos que asignarle una geometría determinada con sus características correspondientes. Para ello se dispone de la opción “SurfaceNode”, con la que asigna a cada nodo tipo “rootnode” un nodo llamado “TshapeKit” con el que se otorga la geometría.



Ilustración 31-Rootnode y SurfaceNode

Cada nodo tiene una pestaña en la cual introducir su posición y rotación respecto al sistema de referencia, estando la posición en metros y la rotación en radianes.

Parameter	Value
translation	0 0 0
rotation	0 0 1 0
scaleFactor	1 1 1
scaleOrient...	0 0 1 0
center	0 0 0

Ilustración 32-Características Rootnode

Cuando se introduce “SurfaceNode”, se tiene que elegir el tipo de geometría del nodo. Tonatiuh presenta las siguientes geometrías entre las que elegir:



Ilustración 33-Elección de la geometría

En función del tipo de geometría escogida, se abre una pestaña en las que meter las características de dicha geometría. Por ejemplo, en el caso de un cilindro:

Cylinder	
Parameter	Value
radius	0.5
length	1
phiMax	6.2831855
activeSide	OUTSIDE

Ilustración 34-Características SurfaceNode

Una vez definida la geometría del nodo, se debe especificar las características físicas de las superficies que componen esta geometría. Para ello, Tonatiuh dispone de la opción “Material”, donde se puede seleccionar entre cuatro funciones para definir las características físicas de las superficies.

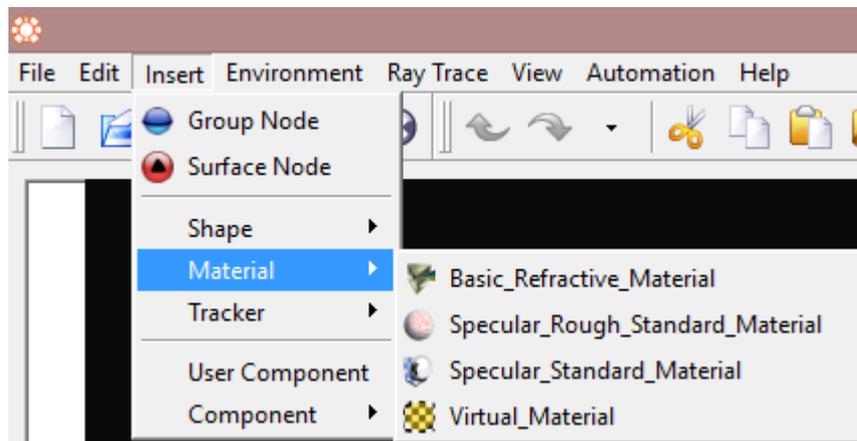


Ilustración 35-Material

Para la realización de este proyecto se escogerá la opción “Specular_Standard_Material”. Con esta función se define la calidad óptica de las superficies, así como sus características.

- Calidad óptica: Un aspecto a resaltar de Tonatiuh es la consideración que hace de los errores ópticos, a través de un parámetro denominado sigma_slope. Este parámetro hace referencia a la desviación típica estándar, asumiendo una distribución normal resultado de la convolución de los diferentes factores que componen el error óptico. Dentro de este parámetro no se tiene en cuenta los errores referidos a la forma solar, por tanto, dentro del conjunto de errores ópticos se pueden englobar los errores locales de pendiente (deformaciones debidas a estructura soporte, desviación respecto al paraboloide ideal, ondulación superficial), los errores por falta de especularidad y los de seguimiento.

Parameter	Value
m reflectivity	0
m_sigmaSlo...	2
m_distributi...	PILLBOX
m_ambient...	0.2 0.2 0.2
m_diffuseC...	0.80000001 0.80000001 0.80000001
m_specular...	0 0 0
m_emissive...	0 0 0
m_shininess	0.2
m_transpar...	0

Ilustración 36-Sigma Slope

Se comentarán el resto de parámetros que aparecen en la Ilustración 36, que tratan sobre las propiedades de los materiales.

- m_reflectivity: reflectividad del material.
 - m_ambientcolor: color reflejado por un objeto en respuesta a la iluminación ambiente de la escena.
 - m_diffusecolor: color base de un objeto.
 - m_specularcolor: calidad reflectiva de los puntos más destacados de un objeto.
 - m_emissivecolor: luz emitida por un objeto.
 - m_shininess: grado de brillo de la superficie de un objeto, que va desde 0,0 para una superficie difusa sin brillo hasta un máximo de 1,0 para una superficie altamente pulida.
 - m_transparency: grado de transparencia de la superficie de un objeto, que va desde 0,0 para una superficie opaca hasta 1,0 para una superficie completamente transparente.
- Ventana de códigos: Los nodos definidos con todas sus características van apareciendo en una ventana de códigos a la derecha de la pantalla del programa, donde se puede consultar toda la información de cada uno de los nodos de nuestro sistema a simular.

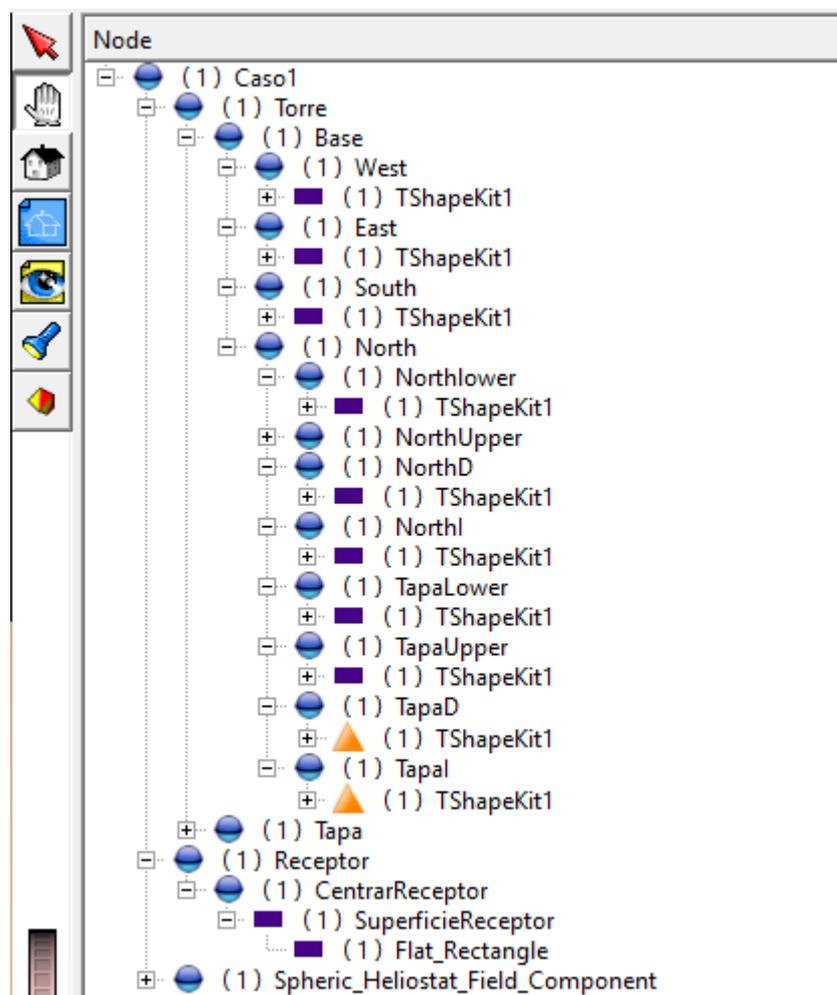


Ilustración 37-Ventana de códigos

4.1.3 Modelado en Tonatiuh

El modelado en Tonatiuh se centrará en un receptor lineal de Fresnel, que es el objeto de estudio de este trabajo. Para ello se dispondrá de 3 nodos dentro del nodo raíz; uno para el tubo absorbedor, otro para el reflector secundario y otro para el campo de espejos.

4.1.4 Simulaciones

Una vez se tengan definido el modelo en Tonatiuh, se procederá a la simulación del mismo. Para ello, se selecciona la opción “Ray trace option”, dentro de la pestaña “Ray trace”.

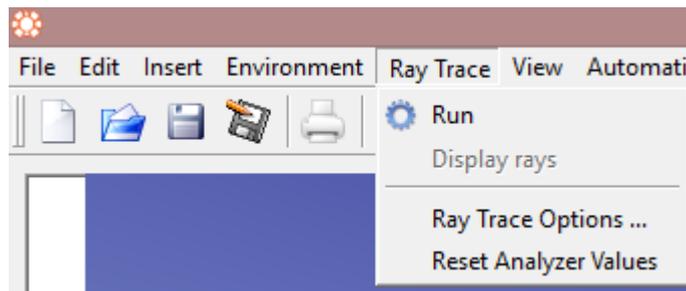


Ilustración 38-Ray Trace

Seleccionada dicha opción, aparece una pestaña tal que:

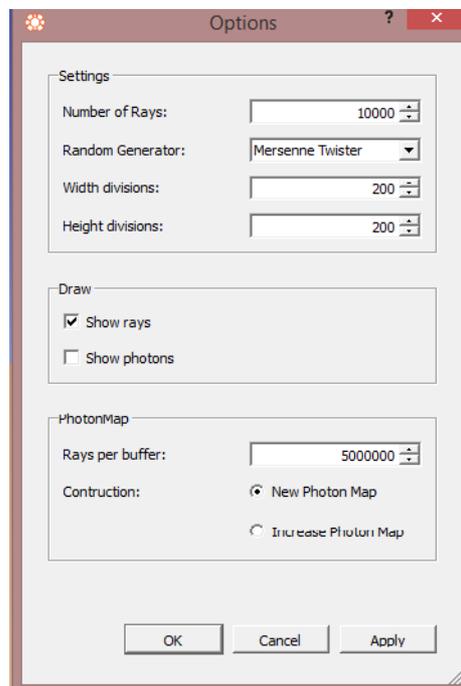


Ilustración 39-Definir rayos

Aquí se elegirá el número de rayos a lanzar en la simulación. En todos los casos a tratar el número será de 2000000 rayos.

Definidos el número de rayos a lanzar, se empieza a simular pulsando el botón “Run”.



Ilustración 40-Run

A continuación, saltará una pestaña como la mostrada a continuación:

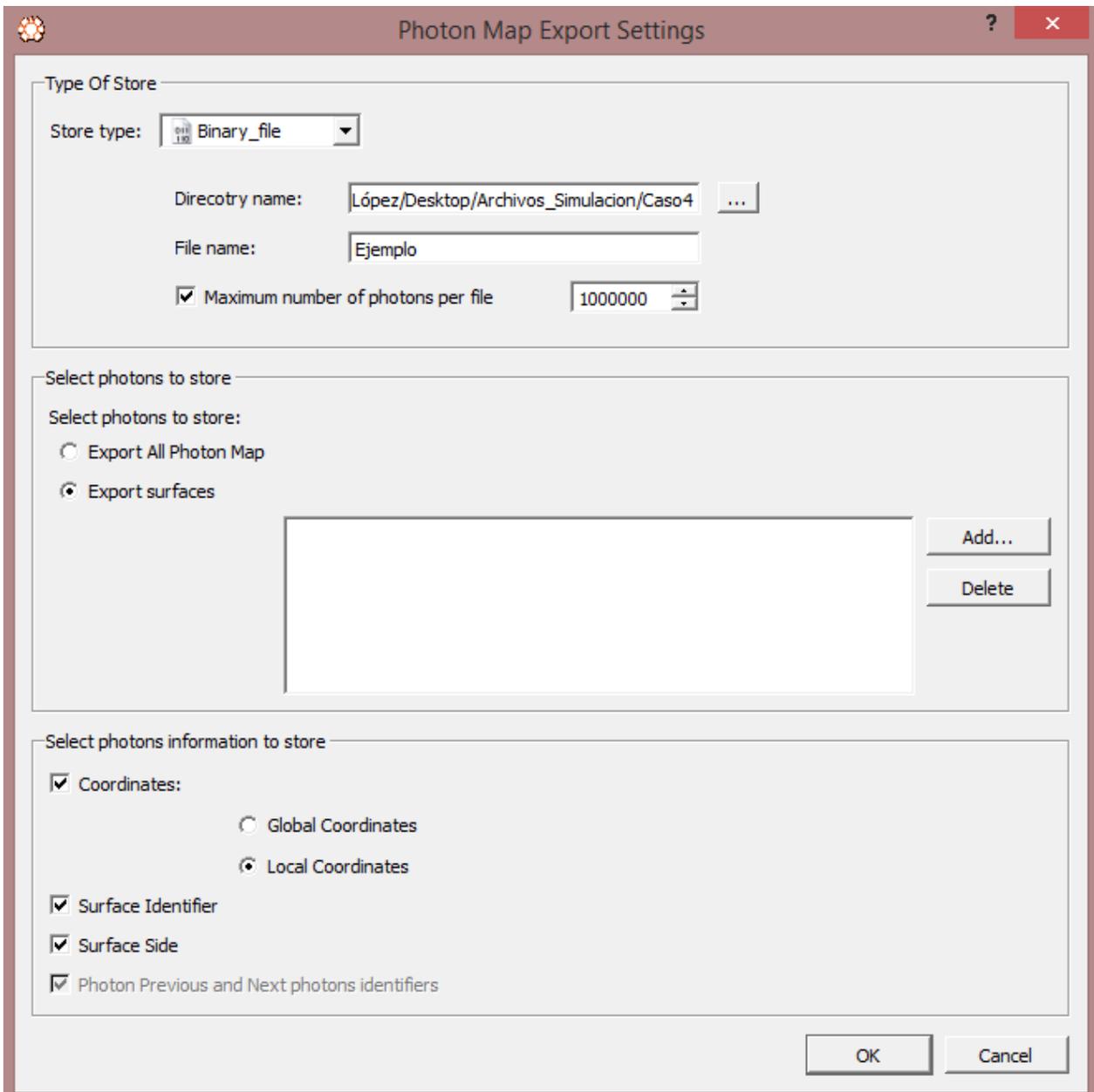


Ilustración 41-Simulación

Aquí se seleccionará “Store file-Binary_file” y “Local Coordinates” en todos los casos a simular. En “Directory name” se pondrá el directorio a donde se enviarán los archivos, con el nombre que se desee para el mismo. En “Select photons to store”, se seleccionará siempre exportar una superficie, añadiendo en la pestaña “add” la superficie del receptor.

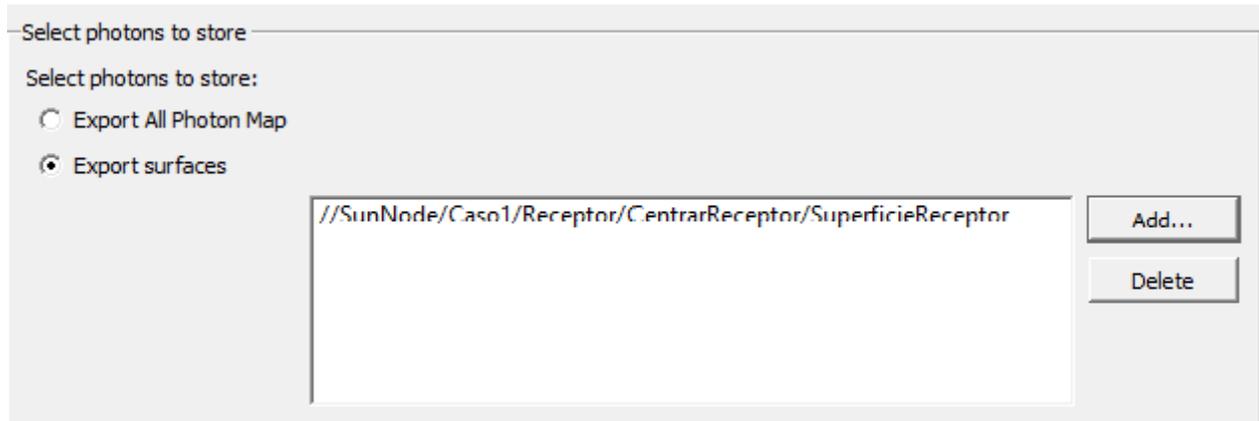


Ilustración 42-Exportar superficie

Una vez definido todos estos parámetros, se correrá la simulación, creándose los archivos .dat y .txt con los datos de la simulación en el directorio seleccionado anteriormente.

4.2 Postprocesado

Para el postprocesado se utilizan las herramientas R project y Matllab. R es un entorno integrado de programas para manipulación y operación de datos. Se utiliza para el postprocesado de datos, más concretamente para el cálculo de los mapas de flujo sobre el receptor y las superficies del reconcentrador.

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Se utiliza para el postprocesado de datos, más concretamente para el cálculo de matrices de eficiencia óptica.

4.3 Cálculo rendimiento anual

4.3.1 Matriz de posición solar

La matriz de eficiencia óptica o matriz de posición solar de un sistema captador Fresnel proporciona el rendimiento óptico del sistema, es decir, el ratio entre la potencia incidente en el receptor y la potencia incidente en el campo de espejos para cada posición del sol (elevación y azimut). Dicha matriz depende de la geometría del sistema. Para cada posición del sol en acimut y elevación, se calcula este ratio entre la potencia que alcanza el receptor y la potencia incidente en el campo mediante un método de ray tracing. En esta matriz vienen recogidas todas las pérdidas ópticas que se dan en los sistemas de concentración como:

- Efecto coseno: Es la energía que se pierde siempre que el plano del espejo no es perpendicular a los rayos del sol. La cantidad de radiación reflejada por el espejo es proporcional a la cantidad de luz solar interceptada. El factor de proporción es el coseno del ángulo que forma la normal al espejo y el rayo incidente en él. El cociente entre el área proyectada sobre el plano perpendicular al rayo y el área total del espejo determinará la magnitud de este efecto.
- Sombras y bloqueos: Las sombras proporcionan la energía que se pierde al no poder ser captada debido a la sombra de unos espejos sobre otros, mientras que los bloqueos se deben a que parte de la energía reflejada por los espejos no llega al receptor debido a que incide o es interceptada por espejos vecinos.
- Sombras del tubo absorbedor y el reconcentrador.

- **Reflectividad:** La absorción y dispersión de parte de la energía que llega al espejo hace que no toda la energía que incide sobre ellos sea reflejada. La absorción de la radiación por el material que forma la superficie del espejo es pequeña pero prácticamente inevitable, debido a la conductividad alta del metal que recubre la superficie de vidrio. La dispersión, rayo no enfocado correctamente, aparece debido a los defectos superficiales del espejo y a la suciedad y polvo que se va depositando sobre ellos; es importante mantener un buen estado de limpieza de los espejos.
- **Atenuación atmosférica:** No toda la energía que consigue ser reflejada alcanza el receptor; parte de ella es absorbida por la atmósfera existente entre el campo y el receptor. Estas pérdidas van ligadas a la distancia entre ambos y de la limpieza de la atmósfera. En Fresnel son despreciables.
- **Desbordamiento o Spillage:** Como consecuencia de imperfecciones en las superficies de los espejos, errores de apunte de los mismos... una parte de la radiación reflejada por el campo de espejos llega a las inmediaciones del receptor, pero no alcanza su superficie absorbidora.

4.3.2 Modificador de ángulo de incidencia

El modificador del ángulo de incidencia es una forma de presentar el rendimiento óptico de un concentrador lineal de Fresnel. Ya se ha definido como se presenta, mediante gráficas que relacionan los ángulos de incidencia transversal y longitudinal con el modificador del ángulo de incidencia, que a su vez está relacionado con el rendimiento óptico del campo. A continuación, se presentará como se realiza el cálculo de dichos ángulos y modificadores del ángulo de incidencia.

Para el cálculo de estos ángulos de incidencia se utilizan las siguientes ecuaciones [33]:

$$\theta_t = \arctan\left(\frac{|\sin(\gamma)|}{\tan(\alpha)}\right)$$

$$\theta_l = \arcsin(\cos(\gamma) * \cos(\alpha))$$

Donde:

θ_t = ángulo de incidencia transversal

θ_l = ángulo de incidencia longitudinal

α = elevación solar

γ = acimut solar

Una vez se tiene esto, con un programa de trazado de rayos se calcula el rendimiento óptico para el punto donde el sol se encuentra en el cenit (elevación solar de 90°).

El modificador del ángulo de incidencia se define como:

$$IAM = \frac{\eta_{\text{optico}}}{\eta_{\text{optico en el cenit}}}$$

Representando el ángulo de incidencia frente al modificador del ángulo de incidencia se obtienen figuras como la recogida en la Ilustración 24.

Como se dispone de dos ángulos de incidencia, se tendrá un modificador del ángulo de incidencia longitudinal y otro transversal, donde:

$$IAM = IAM_t * IAM_l$$

Para el IAM_t se busca las posiciones donde el ángulo de incidencia longitudinal es 0 y se calcula el rendimiento en dichas posiciones, calculándose posteriormente el IAM_t .

Se hace exactamente lo mismo para el IAM_l .

$$\eta_{\text{optico}} = \eta_{\text{optico en el cenit}} * IAM_l * IAM_t$$

4.3.3 Cálculo del rendimiento óptico medio anual ponderado

Para el cálculo del rendimiento óptico medio anual, el primer paso es el cálculo de la matriz de eficiencia óptica del sistema. Posteriormente, se calcula el rendimiento óptico para cada acimut y elevación del sol en paso horario para un año completo. Por último, se pondera en función de la DNI del Año meteorológico Típico (AMT) calculado para el emplazamiento de Sevilla. Un año meteorológico típico (AMT) es un año que representa condiciones meteorológicas típicas desde el punto de vista estadístico en un emplazamiento mediante una serie de valores en intervalos 5-minutales, 10-minutales u horarios, adecuada para la simulación del comportamiento detallado de un sistema termosolar.

. El cálculo de la energía total anual sobre el receptor se calcula como:

$$\text{Energía total en el receptor [Wh]} = \sum_{i=1}^{8760} (\eta_{\text{óptico}} \cdot \text{DNI} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \cdot 1[\text{h}] \cdot A_{\text{cap}} [\text{m}^2])$$

$$\text{Energía total disponible [Wh]} = \sum_{i=1}^{8760} (\text{DNI} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \cdot 1[\text{h}] \cdot A_{\text{cap}} [\text{m}^2])$$

El área de captación se determina como:

$$A_{\text{cap}} [\text{m}^2] = \sum_{\forall \text{filas}} (\text{ancho_fila}[\text{m}] \cdot \text{largo_fila}[\text{m}])$$

Finalmente, para el cálculo del rendimiento óptico medio anual:

$$\eta_{\text{óptico medio anual}} = \frac{\text{Energía total en el receptor [Wh]}}{\text{Energía total disponible [Wh]}}$$

5 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

5.1 Instalación

La planta piloto se puso en marcha durante el mes de febrero de 2008 y es la primera de estas características en el mundo. Con esta instalación, Gas Natural pretende disponer de una herramienta de estudio que permita establecer los parámetros técnicos, económicos y medioambientales del diseño de instalaciones de este tipo para el sector terciario, mediante un control y monitorización adecuados.

Uno de los objetivos era disponer de una instalación de referencia para poder demostrar la viabilidad técnica de estas aplicaciones. El proyecto global de la planta ha sido subvencionado por la Corporación Tecnológica de Andalucía.

La planta consta de 6 bloques principalmente: el sistema de captación solar, la radiación solar, el acumulador de energía, la máquina de absorción, el circuito de climatización de la escuela y la conexión de la planta con el río usado como condensador.

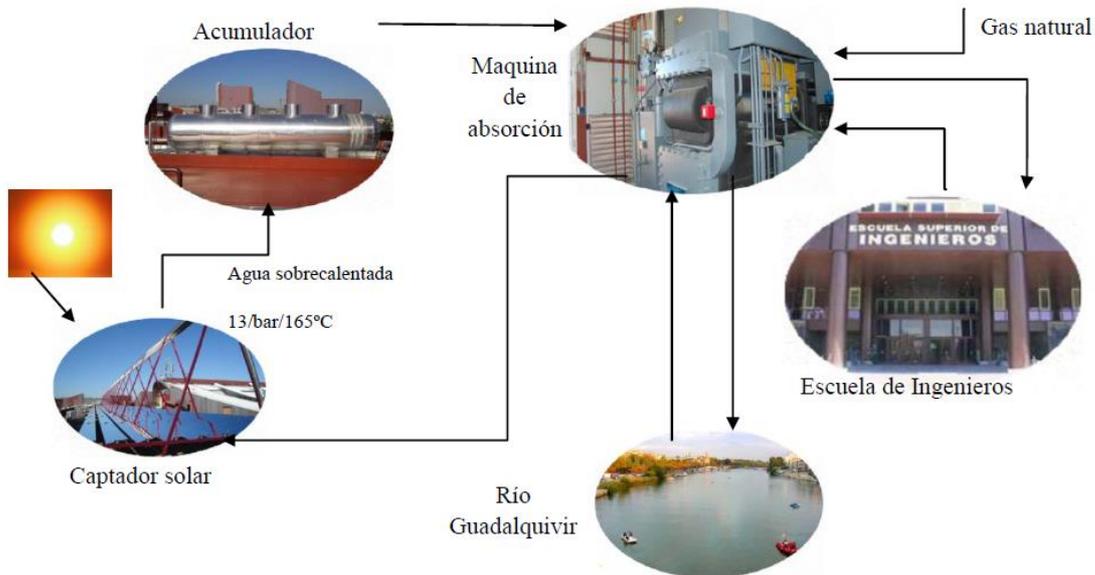


Ilustración 43-Elementos de la planta [34]

El presente proyecto se centrará únicamente en el sistema de captación solar.

La planta se encuentra en la cubierta del edificio universitario de la escuela técnica superior de ingenieros de Sevilla (ETSI), cuya dirección es "Camino de los Descubrimientos s/n. Isla de la Cartuja 41092". Las coordenadas de la instalación son 37,41° de latitud, 6° de longitud oeste y una altitud de 34 metros sobre el mar.

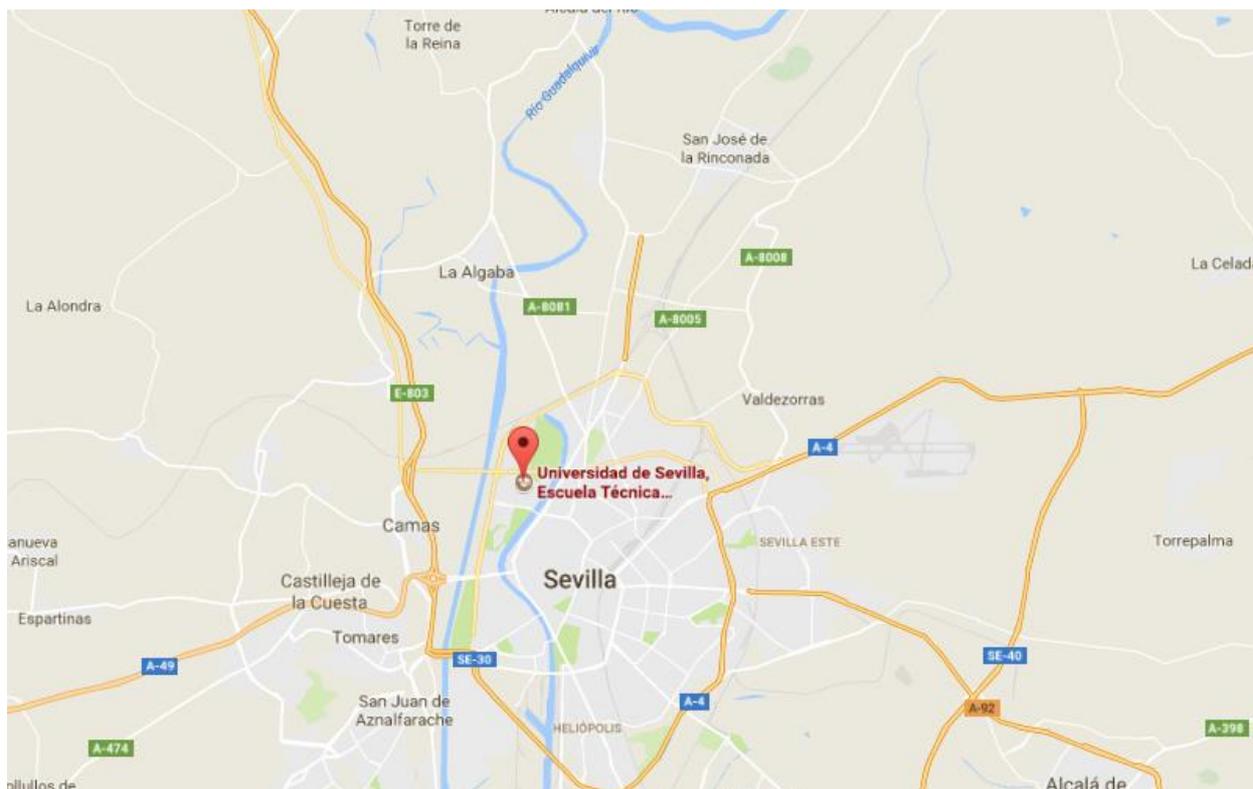


Ilustración 44-Localización de la instalación Fresnel [35]

La utilización de la planta es el aprovechamiento de la energía solar para la obtención de frío. Esto se puede entender como un buen aliciente para desarrollar esta tecnología puesto que los días de mayor demanda de frío coinciden normalmente con los de mayor radiación solar.

La planta piloto, además de servir de estudio, se encuentra conectada a la instalación de refrigeración de la escuela.

Sevilla posee un clima mediterráneo levemente continentalizado, con precipitaciones variables, veranos secos muy cálidos e inviernos suaves. Según la clasificación climática de Köppen, corresponde a un clima Csa [36]. La temperatura media anual es de 18,3°C, una de las mayores de Europa. Enero es el mes más frío con una media de temperaturas mínimas de 5,2°C; y julio es el mes más caluroso, con una media de temperaturas máximas diarias de 36,3°C. Se superan los 45°C varias veces al año.

Las precipitaciones, con una media de 534 mm³ al año, se concentran entre octubre y abril; siendo diciembre el mes más lluvioso, con 95 mm³. Hay un promedio de 52 días de lluvia al año, 2898 horas de sol y varios días de heladas.

El sistema de captación está formado por el captador tipo Fresnel (Ilustración 45). La radiación reflejada por los espejos incide sobre el tubo absorbedor por el cual pasa el agua a calentar que posteriormente se dirigirá hacia la máquina de absorción.

Dicho sistema está situado en la cubierta del edificio, paralelo a la fachada Sur (orientación de la planta este-oeste). Esta fachada no está orientada puramente al Sur sino que tiene una desviación de 12° 3' 1'' hacia el Oeste como puede observarse en la Ilustración 46.



Ilustración 45-Sistema de captación Fresnel de la escuela de ingenieros

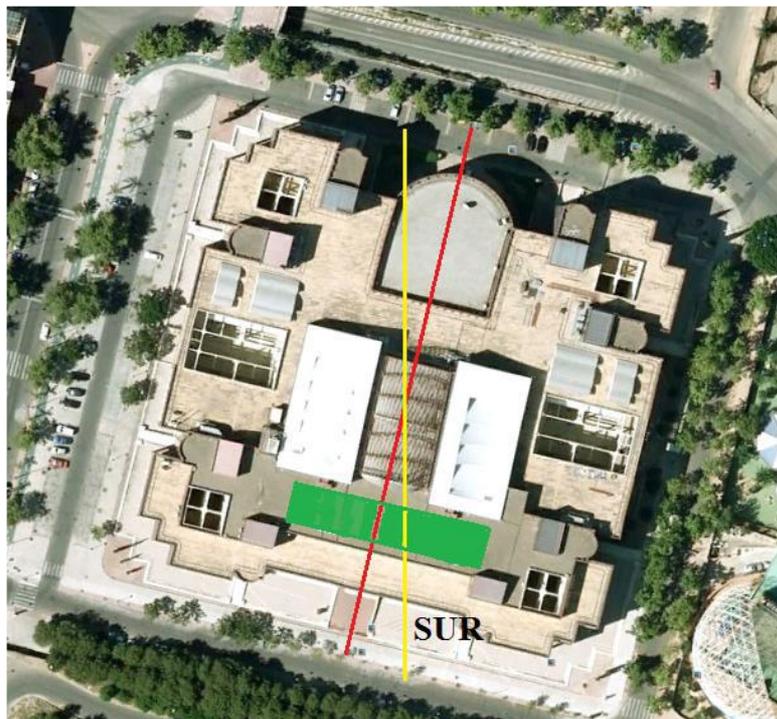


Ilustración 46-Orientación del sistema de captación Fresnel [34]

El sistema posee elementos reflectores, portantes y de actuación. Sus principales elementos son:

- Reflectores primarios
- Tubo absorbedor
- Mecanismo de arrastre
- Sistema de control
- Reflectores secundarios
- Estructura portante
- Sensores

	Características del sistema de captación
Extensión de terreno ocupada	480 m ²
Superficie reflectora total	535 m ²
Orientación planta	Este-Oeste
Número de líneas receptoras	1
Longitud línea receptor	64 m
Tipo de receptor	De cavidad con reflector secundario y cubierta de vidrio
Altura línea receptor	4 m sobre los espejos
Anchura receptor	0,3 m
Fluido de trabajo	Agua
Generación de vapor	No
Presión de diseño	13 bar
Relación de concentración	25
Desviación con respecto al sur	12° 3' 1''

Tabla 2- Características del sistema de captación [34]

- **Reflectores primarios**

El sistema de captación estará compuesto por un total de 176 reflectores dispuestos en 22 filas que como se ha comentado anteriormente, físicamente son 11 filas. Cada uno de los reflectores posee unas dimensiones de 4 x 0.5 metros.

Los reflectores son planos y están ligeramente curvados elásticamente en su colocación, dichos reflectores van apoyados sobre los servomotores que les permiten realizar el mecanismo de seguimiento solar.

Número de filas de reflectores por línea de absorbedor	22 filas
Número de particiones de reflectores por línea	16 columnas
Número total de reflectores	176
Longitud de cada módulo reflector	4 m
Anchura reflector	0,5 m
Reflectividad	0,92

Tabla 3- Características de los reflectores primarios [34]

- **Reflectores secundarios**

Se trata de un reflector situado con una reflectividad nominal de 0,77 realizado mediante una envolvente delgada de metal alrededor del tubo absorbedor para reflejar hacia este la radiación que no incide directamente sobre el tubo. De esta forma se optimiza la eficiencia óptica del sistema. Estos reflectores están fijos.

Otra ventaja de este dispositivo es la protección que aporta sobre el tubo absorbedor, en su contra hay que considerar que al tener una mayor envergadura provocara una mayor sombra sobre los reflectores primarios.

- **Tubo absorbedor**

Desempeña un papel clave en la eficiencia de la planta además de otros factores como la precisión óptica de los espejos. Su misión es la conversión de la radiación solar en energía térmica.

Los tubos son de 4 m de longitud, sellados al vacío con una envolvente de vidrio. El tubo envolvente está hecho de un robusto vidrio boro silicato de gran transparencia, que recibe un recubrimiento y que debe garantizar el vacío dentro del tubo.

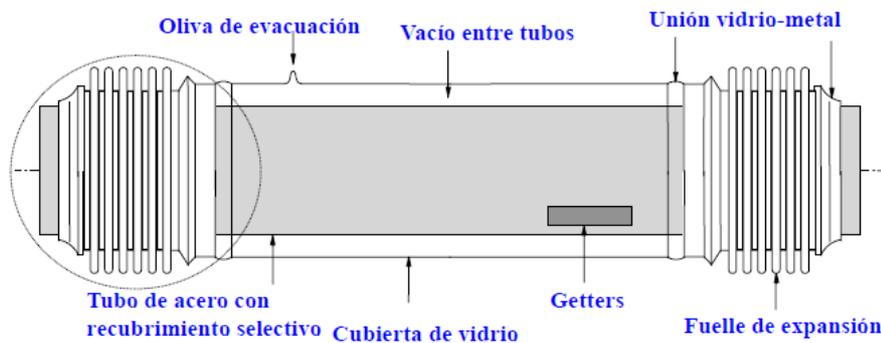


Ilustración 47-Tubo absorbedor

El tubo receptor *Schott PTR® 70* utilizado, incorpora un novedoso recubrimiento antirreflejante, que es resistente de forma duradera a la abrasión y, al mismo tiempo, deja pasar más del 96% de la radiación solar. Este recubrimiento presenta un grado de absorción de aprox. el 95% y emite como máximo el 10% de radiación térmica a una temperatura de aprox. 400°C siendo menor en nuestro caso ya que trabajamos con temperaturas del orden de 180°C.

En el tubo receptor *Schott PTR® 70* la unión vidrio-metal y el fuelle para la compensación de las distintas dilataciones lineales del vidrio y el metal no están dispuestos uno a continuación del otro, como era habitual hasta ahora, sino superpuestos. Gracias a ello se aprovecha realmente el 96% de la longitud del tubo receptor.

Por tanto, se puede comprobar que con este tubo conseguimos los tres objetivos perseguidos para un tubo absorbedor que son: Elevada absorción, baja emisividad en onda larga y durabilidad.

- **Estructura portante**

La función de dicha estructura es dar el soporte estructural al resto de equipos del sistema de captación.

La estructura es ligera, un total de 34 barras verticales, 17 transversales y 2 longitudinales, que dan a la estructura un peso total aproximado de 1500 Kg.

La estructura es de acero recubierto con pintura roja en polvo, que le da una capa antioxidante, ya que dicha estructura se encuentra obviamente sometida a todos los condicionantes climáticos del ambiente.

- **Mecanismo de arrastre**

Proporciona el movimiento de seguimiento solar mediante la utilización de motores de corriente alterna. Sobre ellos actúa el sistema de control para guiar la reflexión del rayo sobre el tubo absorbedor.

El motor transmite la energía mediante una correa (al ser el sistema de espejos muy ligero, con un motor de una dimensión pequeña se consigue mover una fila de espejos muy amplia y que el eje para proporcionar dicho par está formado por una sencilla barra de chapa).

La transmisión de energía del motor impulsor es liberada por una banda poly V con una reducción de velocidad de aproximadamente 1:2.8 en la polea de banda de salida. Cada mecanismo de arrastre mueve ocho filas de espejos, cuatro en cada lado.

Los mecanismos de arrastre están diseñados para un torque máximo de 40 Nm en la fila de espejos. Torques mayores que 60 Nm en la fila de espejos pueden destruir los mecanismos de arrastre.

5.2 Año meteorológico típico de Sevilla

El AMT de Sevilla se ha elaborado conforme a la norma UNE 206011:2014: “Centrales termosolares. Procedimiento de generación de Año Solar Representativo”. En la figura 5 se representan los valores mensuales de radiación directa normal del AMT de para la localidad de Sevilla.

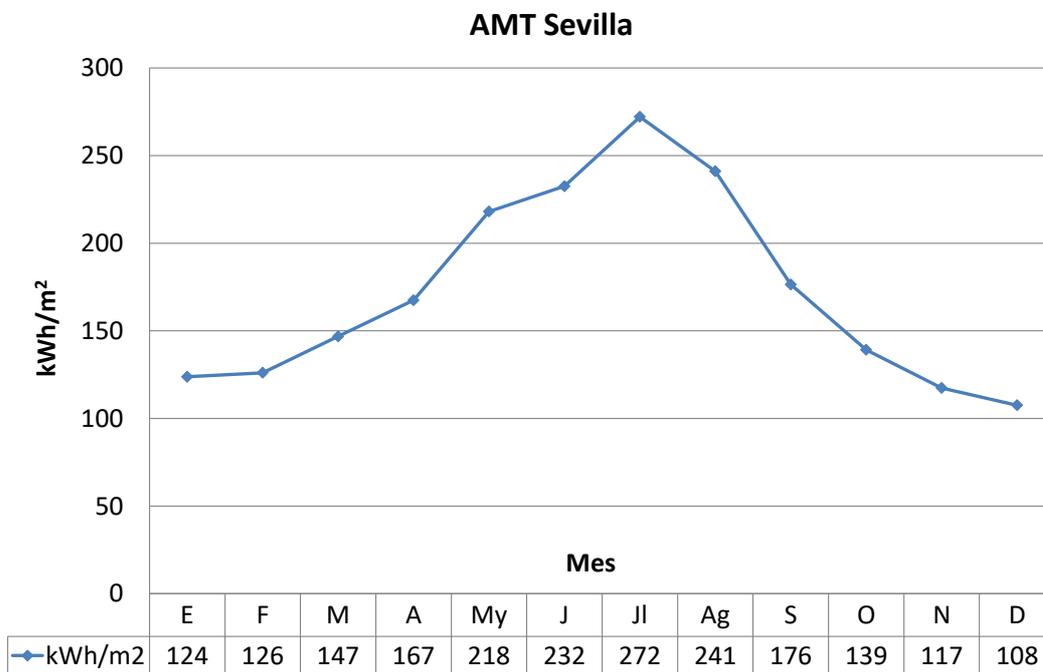


Ilustración 48- Valores mensuales de radiación directa normal del AMT para la localidad de Sevilla

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Modelado en Tonatiuh del sistema concentrador lineal de Fresnel

En primer lugar, se procederá al modelado del sistema lineal de Fresnel en el software Tonatiuh. Se trabajará con tres modelos exactamente iguales, donde la única variación entre ellos será la orientación del mismo y el eje de seguimiento del sol. El sistema consta de tres nudos principales: Tubo absorbedor, campo de espejos y reflector secundario.

Dentro del nudo de tubo absorbedor, se modelan tanto el tubo absorbedor como la cubierta de vidrio del mismo.



Ilustración 49-Tubo absorbedor y cubierta de vidrio

En el nudo campo de espejos habrá 16 nudos hijos, que van desde la columna 1 a la 16. Dentro de cada nudo columna habrá 11 superficies correspondientes a las 11 filas de espejos.

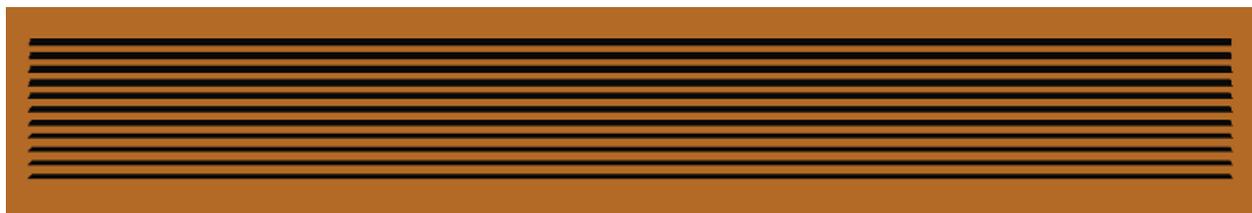


Ilustración 50-Campo de espejos

Por último, en el nudo reflector secundario se recogerá íntegramente este reflector, formado por una parábola que recoge las características físicas del elemento.

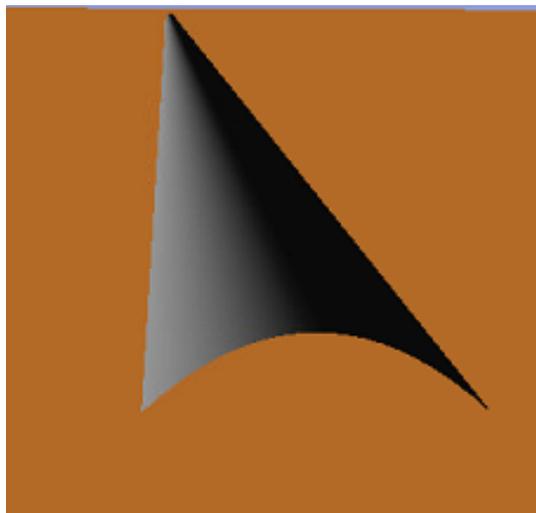


Ilustración 51-Reconcentrador secundario

El modelo final montado en Tonatiuh aparece recogido en la Ilustración 52.



Ilustración 52-Modelo del Fresnel en Tonatiuh

6.2 Comparación del sistema para la orientación Norte-Sur, Este-Oeste y la orientación real

Para apreciar la importancia de la orientación en el sistema Fresnel, se ha realizado una comparación para varias orientaciones. En primer lugar, con una orientación norte-sur y seguimiento este-oeste, en segundo lugar, la orientación este-oeste y el seguimiento norte-sur, y por último la orientación real del sistema.

6.2.1 Orientación Norte-Sur

Para la orientación norte-sur, la matriz de posición solar aparece recogida en la Tabla 4.

Con dicha matriz, se procede al cálculo de los rendimientos ópticos medios mensuales, recogidos en la Tabla 5, y del rendimiento óptico medio anual para la localidad de Sevilla.

Az/El	0	15	25	35	45	55	65	75	90
0	0,000	0,089	0,190	0,288	0,377	0,452	0,512	0,558	0,588
15	0,000	0,143	0,226	0,309	0,408	0,458	0,532	0,585	0,588
30	0,000	0,190	0,299	0,363	0,425	0,480	0,544	0,572	0,589
45	0,000	0,210	0,338	0,431	0,466	0,508	0,541	0,566	0,587
60	0,000	0,224	0,356	0,466	0,503	0,548	0,570	0,592	0,588
75	0,000	0,231	0,366	0,485	0,543	0,556	0,588	0,606	0,587
90	0,000	0,235	0,373	0,495	0,564	0,564	0,589	0,610	0,587
105	0,000	0,231	0,366	0,485	0,543	0,556	0,588	0,606	0,587
120	0,000	0,224	0,356	0,466	0,503	0,548	0,570	0,592	0,588
135	0,000	0,210	0,338	0,431	0,466	0,508	0,541	0,566	0,587
150	0,000	0,190	0,299	0,363	0,425	0,480	0,544	0,572	0,589
165	0,000	0,143	0,226	0,309	0,408	0,458	0,532	0,585	0,588
180	0,000	0,089	0,190	0,288	0,377	0,452	0,512	0,558	0,588
195	0,000	0,143	0,226	0,309	0,408	0,458	0,532	0,585	0,588
210	0,000	0,190	0,299	0,363	0,425	0,480	0,544	0,572	0,589
225	0,000	0,210	0,338	0,431	0,466	0,508	0,541	0,566	0,587
240	0,000	0,224	0,356	0,466	0,503	0,548	0,570	0,592	0,588
255	0,000	0,231	0,366	0,485	0,543	0,556	0,588	0,606	0,587
270	0,000	0,235	0,373	0,495	0,564	0,564	0,589	0,610	0,587
285	0,000	0,231	0,366	0,485	0,543	0,556	0,588	0,606	0,587
300	0,000	0,224	0,356	0,466	0,503	0,548	0,570	0,592	0,588
315	0,000	0,210	0,338	0,431	0,466	0,508	0,541	0,566	0,587
330	0,000	0,190	0,299	0,363	0,425	0,480	0,544	0,572	0,589
345	0,000	0,143	0,226	0,309	0,408	0,458	0,532	0,585	0,588
360	0,000	0,089	0,190	0,288	0,377	0,452	0,512	0,558	0,588

Tabla 4-Matriz de posición solar para la orientación Norte-Sur

Mes	Rendimiento mensual [%]
Enero	25,93
Febrero	32,05
Marzo	39,58
Abril	44,60
Mayo	47,55
Junio	49,18
Julio	47,92
Agosto	45,80
Septiembre	42,03
Octubre	34,99
Noviembre	26,99
Diciembre	23,81

Tabla 5-Rendimientos ópticos medios mensuales para la orientación Norte-Sur

El rendimiento óptico medio anual es de 40,82%.

6.2.2 Orientación Este-Oeste

La matriz de posición solar para la orientación Este-Oeste se recoge en la Tabla 6.

Los rendimientos ópticos medios mensuales se muestran en la Tabla 7.

Az/El	0	15	25	35	45	55	65	75	90
0	0,000	0,226	0,364	0,482	0,547	0,546	0,567	0,589	0,564
15	0,000	0,222	0,357	0,472	0,528	0,538	0,566	0,585	0,563
30	0,000	0,216	0,346	0,453	0,487	0,527	0,549	0,569	0,565
45	0,000	0,205	0,330	0,417	0,450	0,489	0,522	0,546	0,563
60	0,000	0,187	0,293	0,349	0,412	0,462	0,525	0,549	0,565
75	0,000	0,141	0,221	0,299	0,396	0,442	0,512	0,563	0,564
90	0,000	0,089	0,188	0,281	0,365	0,437	0,493	0,534	0,565
105	0,000	0,141	0,221	0,299	0,396	0,442	0,512	0,563	0,564
120	0,000	0,187	0,293	0,349	0,412	0,462	0,525	0,549	0,565
135	0,000	0,205	0,330	0,417	0,450	0,489	0,522	0,546	0,563
150	0,000	0,216	0,346	0,453	0,487	0,527	0,549	0,569	0,565
165	0,000	0,222	0,357	0,472	0,528	0,538	0,566	0,585	0,563
180	0,000	0,226	0,364	0,482	0,547	0,546	0,567	0,589	0,564
195	0,000	0,222	0,357	0,472	0,528	0,538	0,566	0,585	0,563
210	0,000	0,216	0,346	0,453	0,487	0,527	0,549	0,569	0,565
225	0,000	0,205	0,330	0,417	0,450	0,489	0,522	0,546	0,563
240	0,000	0,187	0,293	0,349	0,412	0,462	0,525	0,549	0,565
255	0,000	0,141	0,221	0,299	0,396	0,442	0,512	0,563	0,564
270	0,000	0,089	0,188	0,281	0,365	0,437	0,493	0,534	0,565
285	0,000	0,141	0,221	0,299	0,396	0,442	0,512	0,563	0,564
300	0,000	0,187	0,293	0,349	0,412	0,462	0,525	0,549	0,565
315	0,000	0,205	0,330	0,417	0,450	0,489	0,522	0,546	0,563
330	0,000	0,216	0,346	0,453	0,487	0,527	0,549	0,569	0,565
345	0,000	0,222	0,357	0,472	0,528	0,538	0,566	0,585	0,563
360	0,000	0,226	0,364	0,482	0,547	0,546	0,567	0,589	0,564

Tabla 6-Matriz de posición solar para la orientación Este-Oeste

Mes	Rendimiento mensual [%]
Enero	32,45
Febrero	36,22
Marzo	39,01
Abril	37,94
Mayo	38,52
Junio	39,99
Julio	38,74
Agosto	38,35
Septiembre	38,66
Octubre	37,80
Noviembre	33,32
Diciembre	30,23

Tabla 7-Rendimientos ópticos medios mensuales para la orientación Este-Oeste

El rendimiento óptico medio anual es de 37,42%.

6.2.3 Orientación real

La matriz de posición solar para la orientación Este-Oeste se recoge en la Tabla 8.

Los rendimientos ópticos medios mensuales se muestran en la Tabla 9.

Az/El	0	15	25	35	45	55	65	75	90
0	0,000	0,223	0,360	0,475	0,535	0,540	0,566	0,585	0,564
15	0,000	0,217	0,350	0,458	0,494	0,533	0,557	0,576	0,565
30	0,000	0,207	0,336	0,427	0,460	0,501	0,522	0,548	0,563
45	0,000	0,192	0,304	0,368	0,421	0,470	0,534	0,544	0,565
60	0,000	0,155	0,233	0,321	0,387	0,454	0,505	0,567	0,563
75	0,000	0,091	0,196	0,297	0,376	0,443	0,495	0,537	0,564
90	0,000	0,126	0,215	0,301	0,376	0,442	0,523	0,553	0,565
105	0,000	0,091	0,196	0,297	0,376	0,443	0,495	0,537	0,564
120	0,000	0,155	0,233	0,321	0,387	0,454	0,505	0,567	0,563
135	0,000	0,192	0,304	0,368	0,421	0,470	0,534	0,544	0,565
150	0,000	0,207	0,336	0,427	0,460	0,501	0,522	0,548	0,563
165	0,000	0,217	0,350	0,458	0,494	0,533	0,557	0,576	0,565
180	0,000	0,223	0,360	0,475	0,535	0,540	0,566	0,585	0,564
195	0,000	0,217	0,350	0,458	0,494	0,533	0,557	0,576	0,565
210	0,000	0,207	0,336	0,427	0,460	0,501	0,522	0,548	0,563
225	0,000	0,192	0,304	0,368	0,421	0,470	0,534	0,544	0,565
240	0,000	0,155	0,233	0,321	0,387	0,454	0,505	0,567	0,563
255	0,000	0,091	0,196	0,297	0,376	0,443	0,495	0,537	0,564
270	0,000	0,126	0,215	0,301	0,376	0,442	0,523	0,553	0,565
285	0,000	0,091	0,196	0,297	0,376	0,443	0,495	0,537	0,564
300	0,000	0,155	0,233	0,321	0,387	0,454	0,505	0,567	0,563
315	0,000	0,192	0,304	0,368	0,421	0,470	0,534	0,544	0,565
330	0,000	0,207	0,336	0,427	0,460	0,501	0,522	0,548	0,563
345	0,000	0,217	0,350	0,458	0,494	0,533	0,557	0,576	0,565
360	0,000	0,223	0,360	0,475	0,535	0,540	0,566	0,585	0,564

Tabla 8- Matriz de posición solar para la orientación real

Mes	Rendimiento mensual [%]
Enero	30,74
Febrero	33,53
Marzo	36,50
Abril	36,66
Mayo	37,79
Junio	39,48
Julio	38,24
Agosto	37,29
Septiembre	36,65
Octubre	35,02
Noviembre	31,38
Diciembre	28,82

Tabla 9- Rendimientos ópticos medios mensuales para la orientación real

El rendimiento óptico medio anual es de 36%.

6.2.4 Comparación de los modelos con distintas orientaciones

Si se comparan las tres orientaciones en cuanto a rendimiento óptico medio anual, se observa como la orientación Norte-Sur presenta el rendimiento anual mayor, mientras que el modelo con orientación Este-Oeste presenta un rendimiento óptico algo menor (se pasa de un 40,82% a un 37,42%, 3,4 puntos de rendimiento menos). El modelo con la orientación real presenta el rendimiento óptico anual más bajo, con un valor de 36%.

Si se compara en términos de rendimiento óptico medio mensual, se aprecia como el modelo con orientación Este-Oeste y el real presentan unos rendimientos prácticamente constantes a lo largo del año, mientras que el modelo con orientación Norte-Sur presenta rendimientos mayores en verano y menores en invierno. Esto se aprecia en la Ilustración 53.

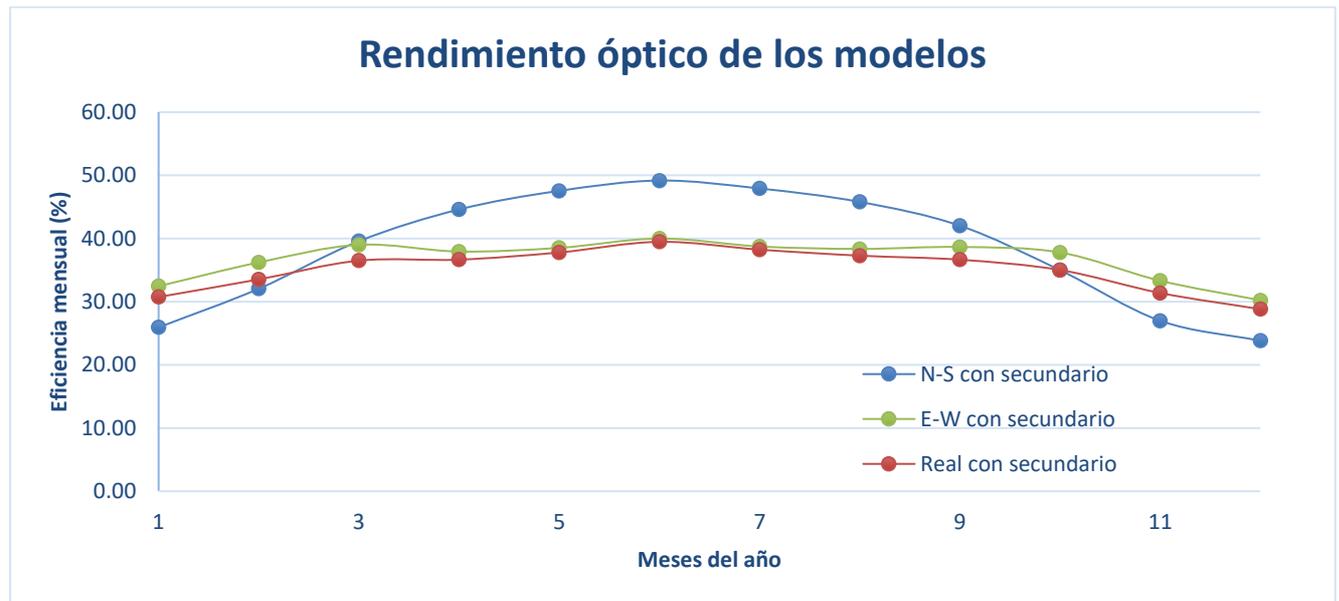


Ilustración 53-Rendimientos ópticos mensuales de los modelos

Esto sugiere que para aplicaciones donde la demanda es prácticamente constante a lo largo del año, el uso de la orientación Este-Oeste parece mucho más interesante que la Norte-Sur, mientras que si se dispone de un proceso cuya demanda es mayor en verano o interesa maximizar la producción, la orientación Norte-Sur es mucho más interesante.

6.3 Análisis del efecto del uso de un reconcentrador secundario

Para ver el efecto del reconcentrador secundario se ha realizado un estudio del modelo para la orientación real. Para ello, se ha simulado el modelo con el reconcentrador y sin él, se han obtenido las matrices de eficiencia óptica y se han comparado los resultados de los rendimientos medios mensuales y anuales.

En cuanto a los rendimientos ópticos medios anuales, se obtiene para el modelo con reconcentrador un valor del 36%, tal y como ya se ha visto, mientras que para el modelo sin reconcentrador el valor es de 30,46%, 5,54 puntos menos.

En cuanto a los rendimientos medios mensuales, la tendencia anual es idéntica, como se ve en la Ilustración 53, aunque los valores si que son algo distintos para cada mes.

Mes	Rendimiento mensual con reconcentrador	Rendimiento mensual sin reconcentrador
Enero	30,74	26,45
Febrero	33,53	28,49
Marzo	36,50	30,89
Abril	36,66	30,90
Mayo	37,79	31,84
Junio	39,48	33,24
Julio	38,24	32,18
Agosto	37,29	31,43
Septiembre	36,65	30,96
Octubre	35,02	29,68
Noviembre	31,38	26,91
Diciembre	28,82	24,93

Tabla 10- Rendimientos ópticos mensuales de los modelos reales con y sin reconcentrador

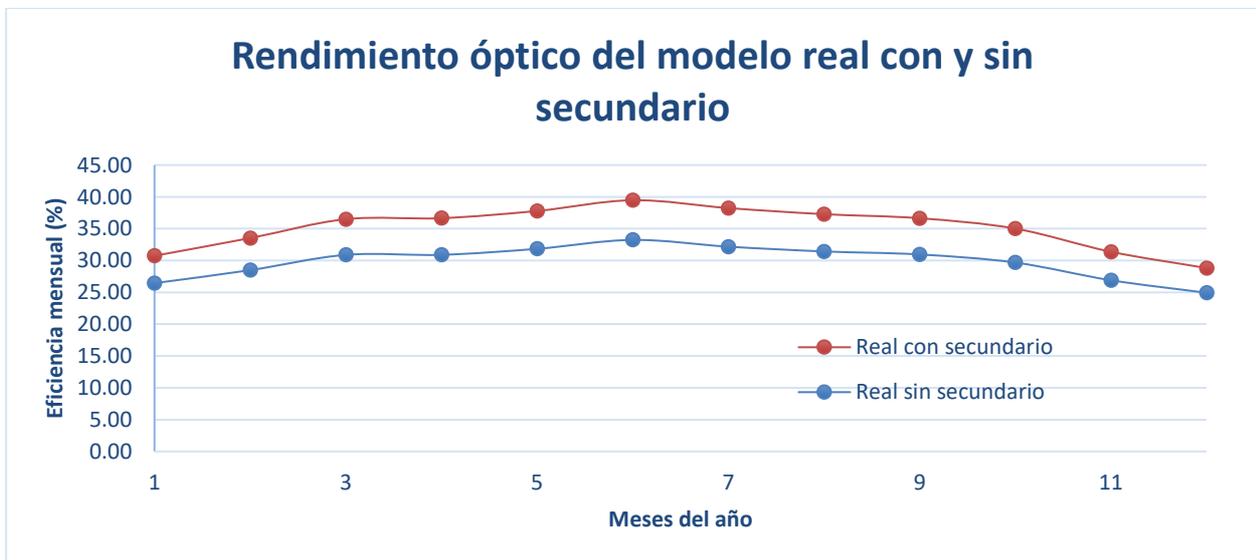


Ilustración 54- Rendimientos ópticos mensuales de los modelos reales con y sin reconcentrador

6.4 Análisis de sensibilidad sobre la calidad óptica de los espejos

Para los estudios anteriores, el valor del error óptico de los espejos es de 3,38 mrad. Se parte de este valor ya que es el valor del error óptico de unos espejos que se encuentran en el mercado de los concentradores lineales de fresnel, puesto que no se dispone del valor nominal de este error para el Fresnel instalado.

No obstante, se realizará sobre el modelo con la orientación real un análisis de sensibilidad para ver como varía el rendimiento óptico anual del sistema en función del error óptico de los espejos. Se ha probado desde 0 mrad, espejos perfectos, hasta espejos con un error de 6 mrad.

El error de los espejos puede aumentar por diversos motivos, tales como la falta de limpieza o un seguimiento del sol erróneo. Los resultados de este estudio se pueden ver en la Ilustración 55 y en la Tabla 11.

Error óptico [mrad]	Rendimiento [%]
0	41,34
1	40,78
2	39,20
3	36,92
4	34,50
5	32,17
6	30,05

Tabla 11-Rendimientos anuales en función del error óptico

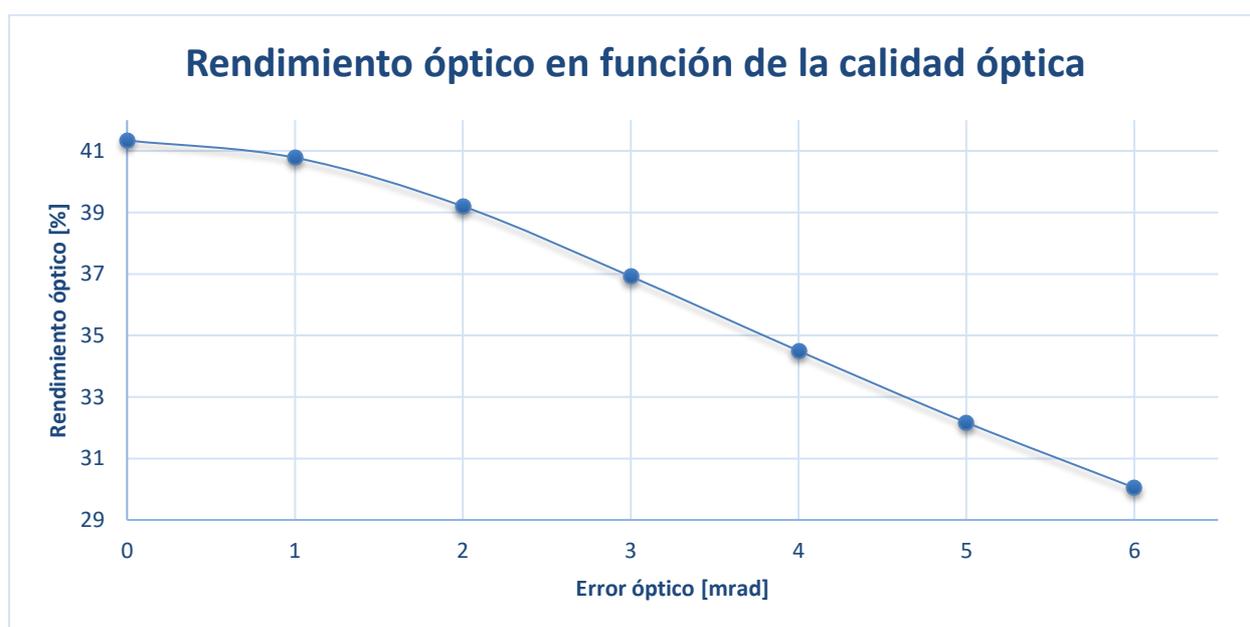


Ilustración 55- Rendimientos anuales en función del error óptico

Como se puede ver, cuando el error óptico aumenta de 2 mrad, la caída de rendimiento es más acusada, de ahí el hecho de lo importante que es mantener los espejos limpios y disponer de un buen sistema de seguimiento, pues sin esto, los rendimientos caerían de forma considerable (se pasa de un 36,92% para un error de 3 mrad a un valor de 30,05% para 6 mrad, una caída de 6,92 puntos).

6.5 Análisis de sensibilidad sobre los radios de curvatura de los espejos

Se ha realizado un pequeño estudio para ver la influencia de los radios de curvatura de los espejos. Se compara el modelo real con un modelo donde el radio de curvatura de cada espejo se calcula como:

$$\text{Radio de curvatura} = 2 * \text{Distancia focal}$$

El resultado del rendimiento óptico del sistema con radios de curvatura distinto para cada espejo es de 36,46%, frente a los 36,00% del sistema real.

Los resultados mensuales se pueden apreciar en la Tabla 12 y en la Ilustración 56.

Mes	Rendimiento mensual curvatura variable	Rendimiento mensual curvatura inicial
Enero	30,58	30,77
Febrero	32,77	33,55
Marzo	36,22	36,53
Abril	37,34	36,67
Mayo	38,94	37,83
Junio	40,84	39,50
Julio	39,45	38,27
Agosto	38,10	37,32
Septiembre	36,79	36,67
Octubre	34,29	35,05
Noviembre	31,02	31,41
Diciembre	29,02	28,83

Tabla 12-Rendimientos mensuales de los sistemas con distintos radios de curvatura

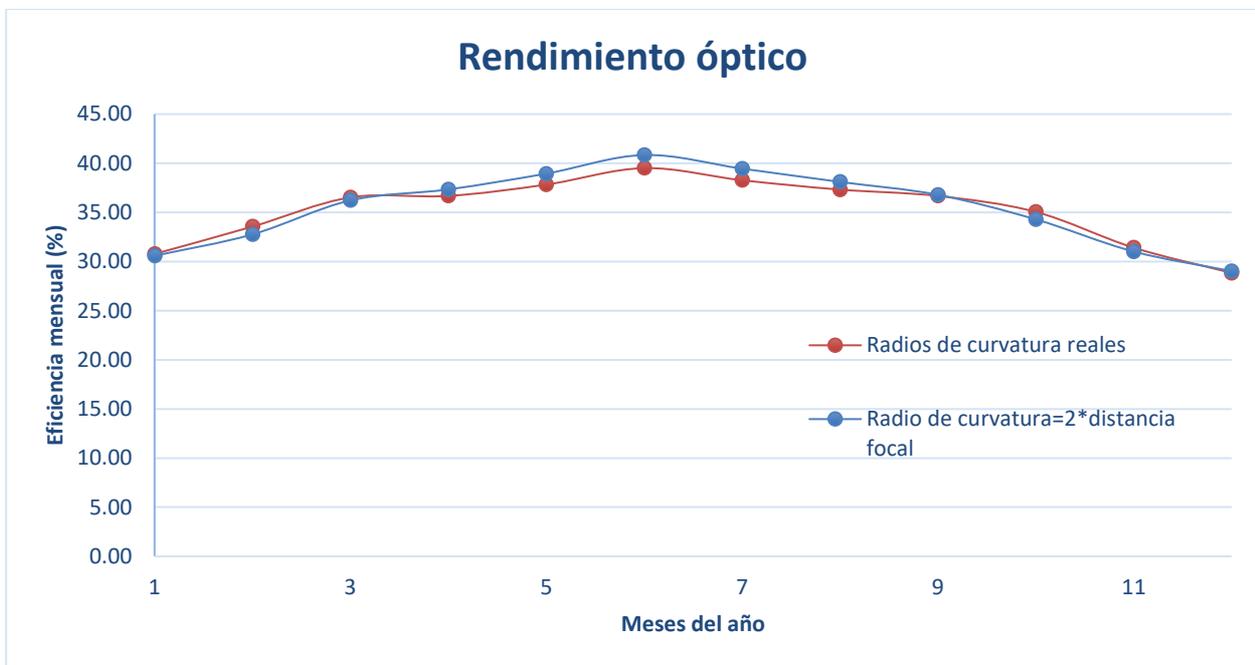


Ilustración 56-Rendimientos mensuales de los sistemas con distintos radios de curvatura

Como se puede apreciar, el efecto de cambiar los radios de curvatura no afecta de forma importante al rendimiento óptico anual del sistema (una variación de 0,46%). El efecto del cambio es más acusado en los meses de verano donde el sol está más alto.

6.6 Análisis sobre el efecto del ratio circumsolar

Se ha realizado un estudio sobre el efecto del ratio circumsolar (relación entre la radiación circumsolar y la radiación procedente del disco solar) en el resultado del rendimiento óptico medio anual del sistema.

Para el resto de estudios, se ha usado un csr del 2%. Se realizará un barrido desde 0% a 10% para el sistema con orientación real.

Csr [%]	Rendimiento óptico medio anual [%]
0	36,01
2	36,00
4	35,83
6	35,70
8	35,51
10	35,33

Tabla 13-Rendimiento óptico en función del csr

De forma gráfica:

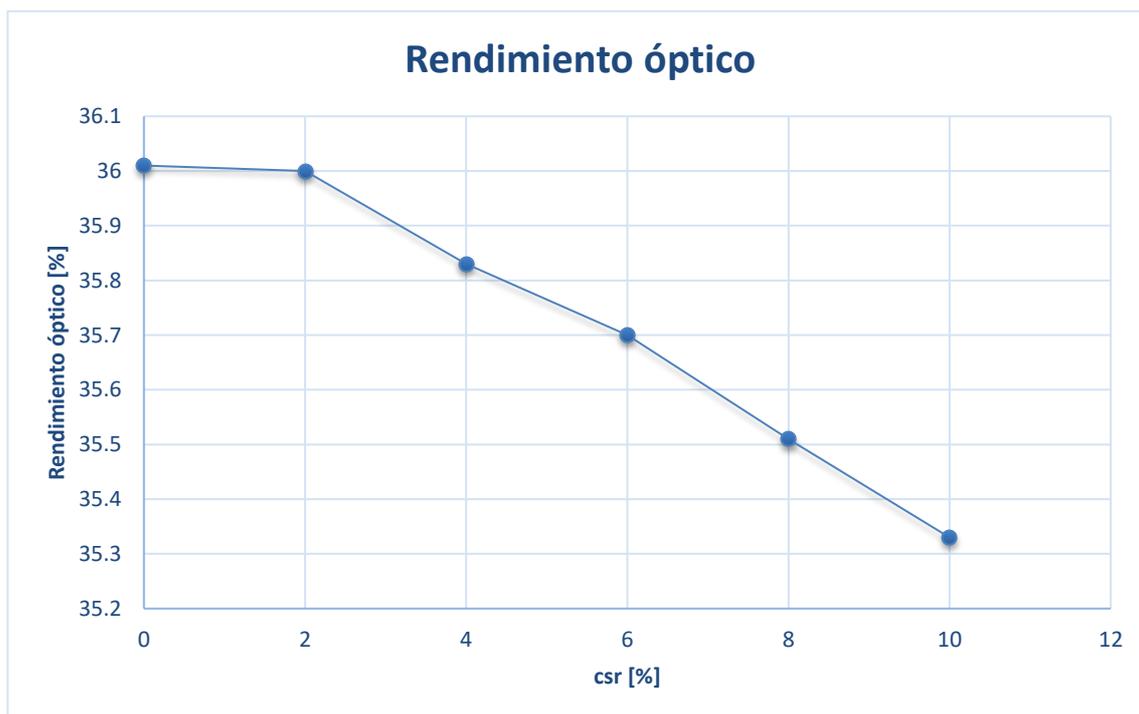


Ilustración 57-Rendimiento óptico en función del csr

Se puede apreciar que a partir de un csr del 2%, la caída de rendimiento es prácticamente lineal con el csr, aunque no es muy acusada.

El valor del csr suele variar entre un 1% y un 5% para la localidad de Sevilla [37].

6.7 Modificador del ángulo de incidencia

El cálculo del modificador del ángulo de incidencia se explicó en el apartado 3 de este trabajo: Revisión bibliográfica.

Se procede al cálculo del ángulo de incidencia longitudinal y transversal para cada posición del sol simulada. Este estudio se realizará sobre el modelo con orientación real.

Primero se procede al cálculo del modificador del ángulo longitudinal, por lo que se busca la posición del sol donde el ángulo de incidencia transversal es nulo (acimut 0°).

Az [°]	El [°]	Ángulo incidencia transversal [°]	Ángulo incidencia longitudinal [°]	Rendimiento óptico [p.u]	IAM _{long}
0	0	0	90	0,00	0,00
0	10	0	80	0,15	0,26
0	20	0	70	0,29	0,52
0	30	0	60	0,42	0,74
0	40	0	50	0,50	0,89
0	50	0	40	0,54	0,95
0	60	0	30	0,55	0,98
0	70	0	20	0,58	1,02
0	80	0	10	0,58	1,02
0	90	0	0	0,56	1,00

Tabla 14-Modificador del ángulo de incidencia longitudinal

Se realiza el mismo cálculo para el modificador del ángulo de incidencia transversal. Se busca la posición del sol donde el ángulo de incidencia longitudinal es nulo (acimut 90°).

Az [°]	El [°]	Ángulo incidencia transversal [°]	Ángulo incidencia longitudinal [°]	Rendimiento óptico [p.u]	IAM _{trans}
90	0	90	0	0,00	0,00
90	10	80	0	0,08	0,15
90	20	70	0	0,17	0,30
90	30	60	0	0,26	0,46
90	40	50	0	0,34	0,60
90	50	40	0	0,41	0,72
90	60	30	0	0,48	0,85
90	70	20	0	0,54	0,95
90	80	10	0	0,56	0,99
90	90	0	0	0,56	1,00

Tabla 15- Modificador del ángulo de incidencia transversal

La ilustración 58 representa el modificador del ángulo de incidencia en función del ángulo de incidencia.:

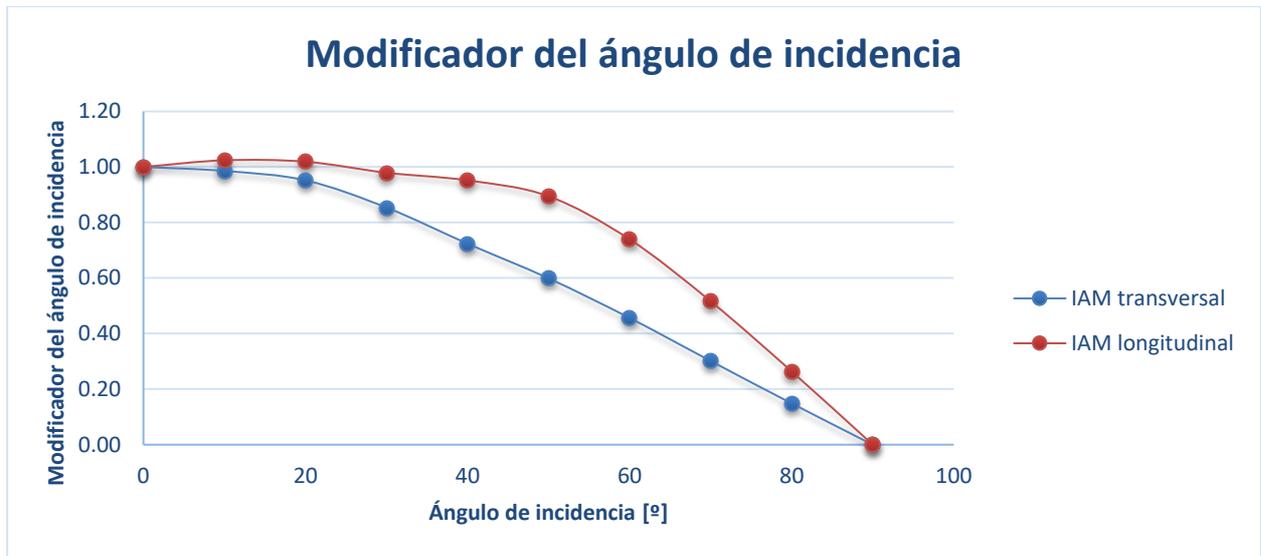


Ilustración 58-Modificador del ángulo de incidencia en función del ángulo de incidencia

Con esta gráfica se puede calcular el rendimiento óptico del campo para cada posición del sol. Como ejemplo se procederá al cálculo de una posición del sol (acimut=80° y elevación=70°)

En primer lugar, se calcula el ángulo de incidencia transversal y longitudinal para esa posición del sol.

$$\theta_t = \arctan\left(\frac{|\sin(\gamma)|}{\tan(\alpha)}\right)$$

$$\theta_l = \arcsin(\cos(\gamma) * \cos(\alpha))$$

Para acimut=80° y elevación=70°

$$\theta_t = 19,72^\circ$$

$$\theta_l = 3,41^\circ$$

Entrando con estos valores en la gráfica de la Ilustración 58, se calculan los modificadores del ángulo de incidencia transversal y longitudinal.

$$IAM_t = 1,005$$

$$IAM_l = 0,914$$

Sabiendo que el rendimiento óptico en el cenit es de 0.56:

$$\eta_{\text{óptico}} = \eta_{\text{óptico cenit}} * IAM_l * IAM_t$$

El rendimiento óptico es de 51,9%. El valor del rendimiento óptico calculado con la matriz de eficiencia óptica es de 52,3%, una diferencia porcentual de 0,76%. Esta diferencia se ha calculado como:

$$error = \frac{\text{rendimiento matriz} - \text{rendimiento IAM}}{\text{rendimiento matriz}}$$

Haciendo esto para todas las posiciones del sol calculadas en la matriz de eficiencia se puede ver la diferencia entre la matriz y el modificador del ángulo de incidencia:

Az/EI	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,00	38,24	16,48	5,64	1,76	4,60	6,57	4,09	2,91	2,91
10	0,00	17,26	7,19	0,72	0,67	4,01	4,92	3,48	2,78	2,90
20	0,00	3,73	0,23	3,03	0,18	3,85	4,69	4,10	3,42	3,01
30	0,00	7,29	5,73	5,87	0,72	4,29	6,06	6,14	4,90	3,25
40	0,00	14,99	8,42	4,42	1,56	5,09	4,18	3,57	4,12	2,95
50	0,00	17,99	6,47	0,71	3,89	5,46	3,27	1,50	2,35	2,94
60	0,00	15,35	2,43	6,48	6,38	5,49	3,47	0,03	0,32	3,21
70	0,00	5,87	15,83	8,90	5,15	3,54	2,30	0,82	1,24	3,13
80	0,00	7,68	15,35	6,70	2,78	1,37	0,18	0,76	1,05	2,99
90	0,00	15,89	0,62	0,04	0,51	0,85	3,75	4,58	0,88	2,81

Tabla 16-Error porcentuales en % entre el IAM y la matriz de eficiencia óptica

Donde:

error>5%	
5%<error<1%	
error<1%	

Debido a la simetría de la matriz solo se han calculado estas posiciones, con las cuales ya se pueden extrapolar todo el resto de posiciones.

Se puede apreciar que para posiciones del sol muy bajas (elevación 10° y 20°) los errores son mayores que para posiciones altas.

Si se calcula el rendimiento óptico medio anual con el modificador del ángulo de incidencia se obtiene un valor de 36,75%, mientras que el valor del rendimiento óptico medio anual calculado con la matriz de eficiencia es de 36,00%, una diferencia porcentual de 2,08%.

6.8 Cálculo de mapas de flujo

Se ha procedido al cálculo de mapas de flujo sobre el receptor y el reconcentrador secundario para dos posiciones del sol, por un lado, la posición del sol el medio día solar en el solsticio de invierno (la posición del sol más alta para Sevilla) y por otro lado el amanecer en el solsticio de invierno. Con los mapas de flujo se puede ver la distribución de flujo en la superficie analizada para estudios térmicos (temperaturas que se pueden alcanzar en las superficies, arranques y paradas...).

- Medio día solar en el solsticio de verano

El sol se encuentra en un acimut de 180° y una elevación de 76°.

El mapa en el receptor se puede ver en la Ilustración 59.

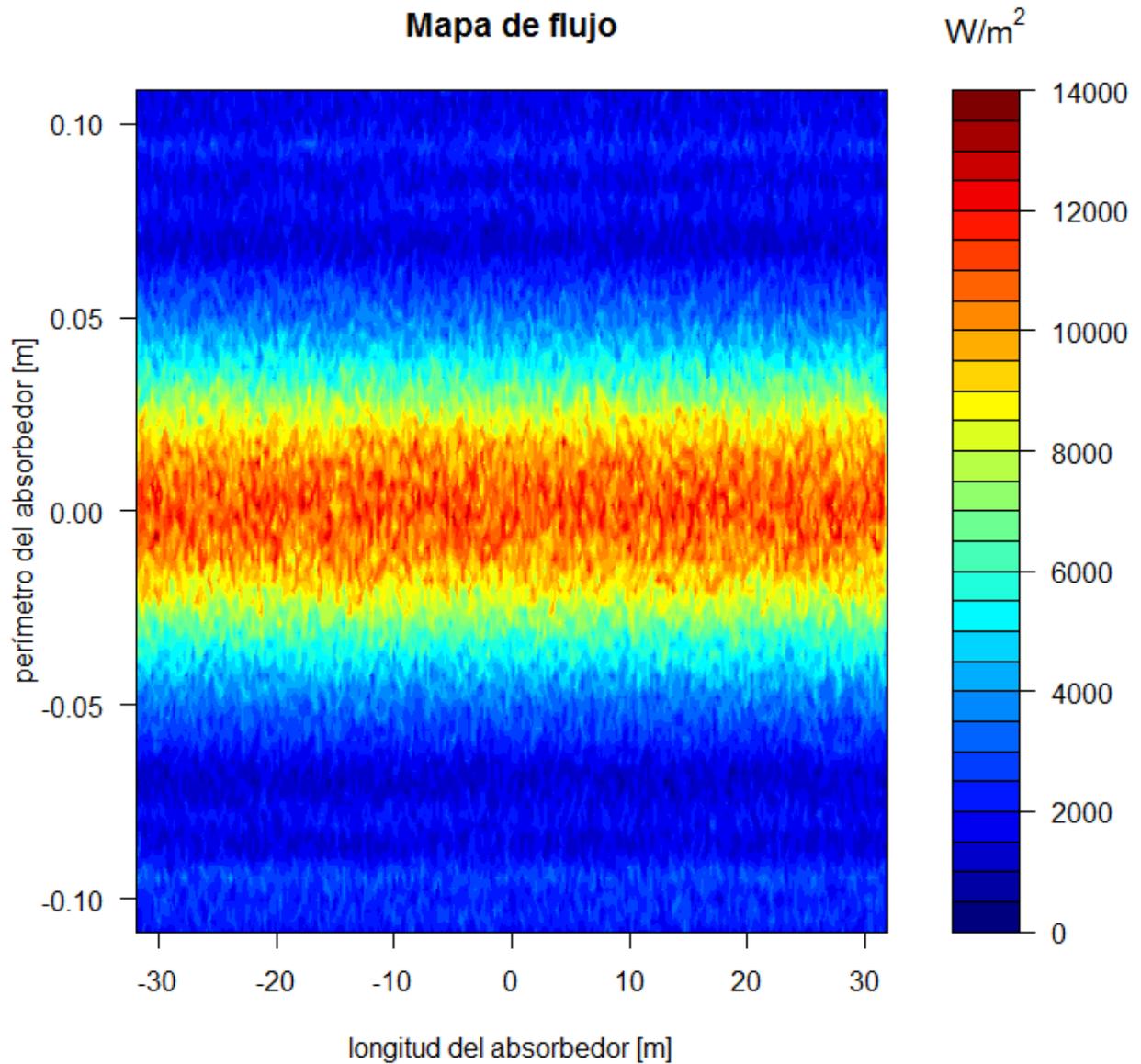


Ilustración 59-Mapa de flujo del absorbedor en verano

La potencia incidente en el receptor es de 207287 W.

El mapa en el reconcentrador secundario se puede ver en la Ilustración 60.

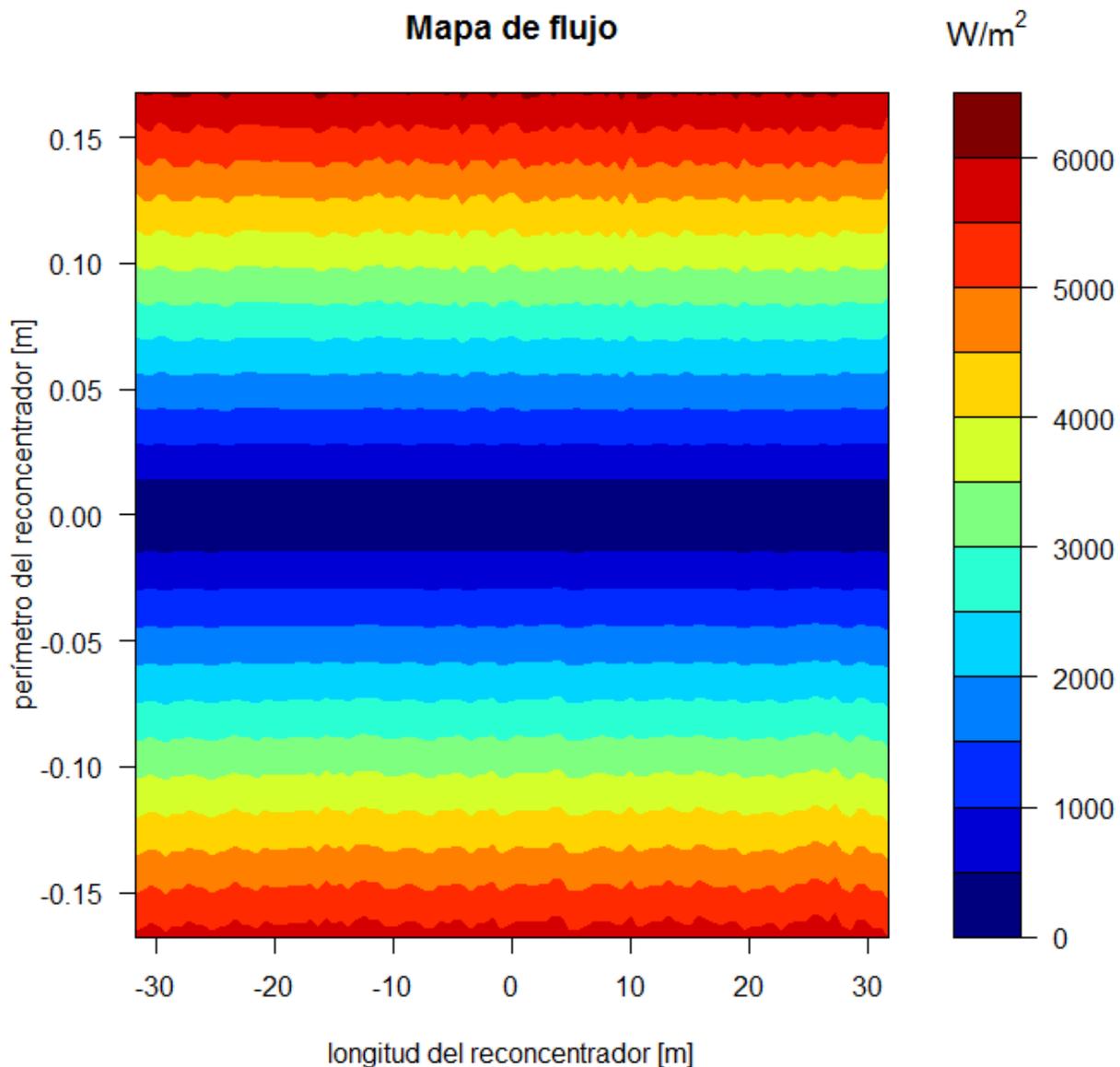


Ilustración 60- Mapa de flujo del reconcentrador en verano

Las coordenadas de estos mapas son:

- Absorbedor: La derecha de la imagen sería el este y la izquierda el oeste, mientras que la mitad superior sería el norte, y la mitad inferior el sur.
- Reconcentrador: La derecha de la imagen sería el este y la izquierda el oeste, mientras que la mitad superior sería el sur, y la mitad inferior el norte.
- Amanecer en invierno

El sol se encuentra en un acimut de 136° y una elevación de 15°.

El mapa en el receptor se puede ver en la Ilustración 61.

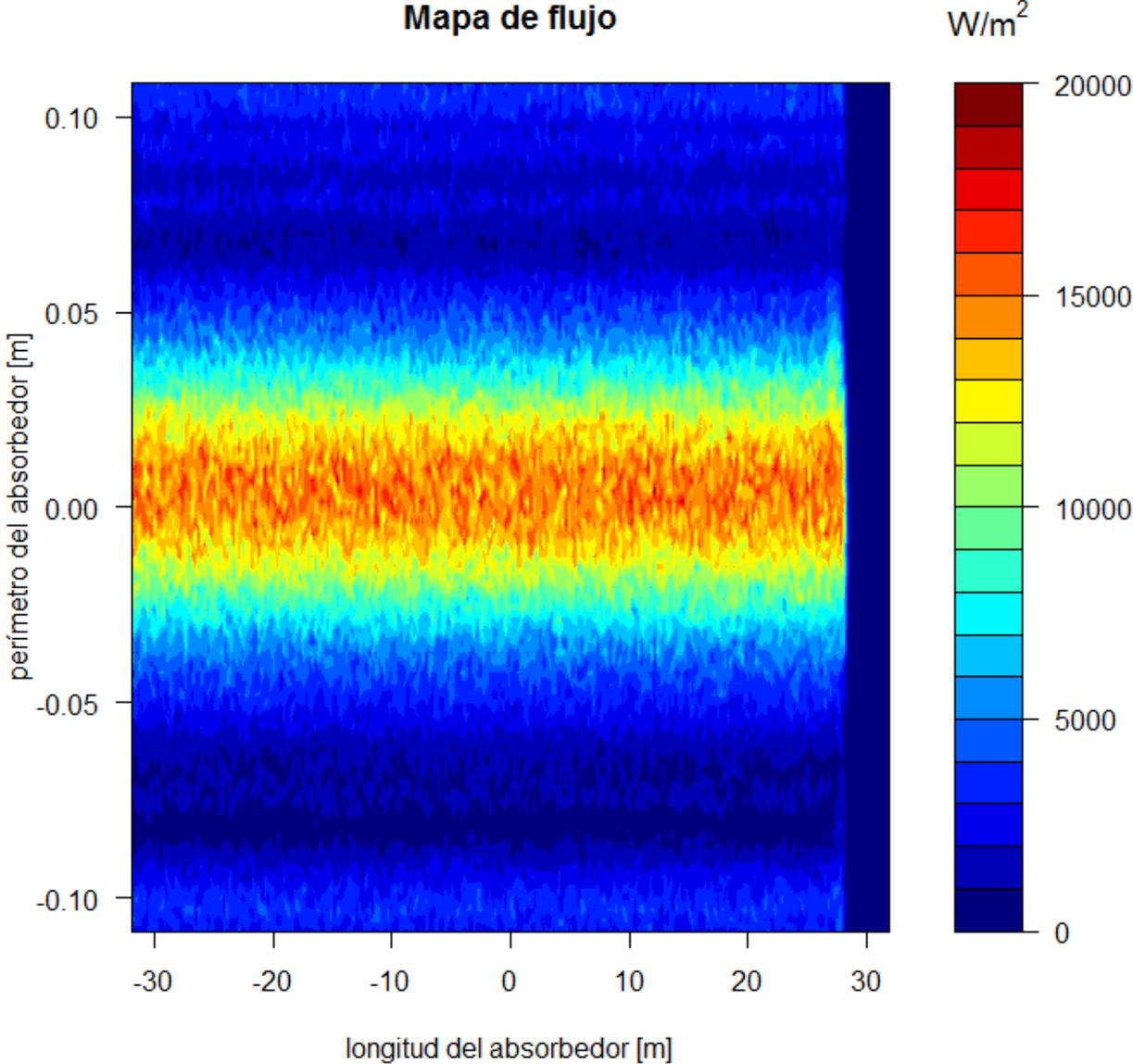


Ilustración 61- Mapa de flujo del absorbedor en invierno

La potencia incidente en el receptor es de 72872,3 W.

El mapa en el reconcentrador secundario se puede ver en la Ilustración 62.

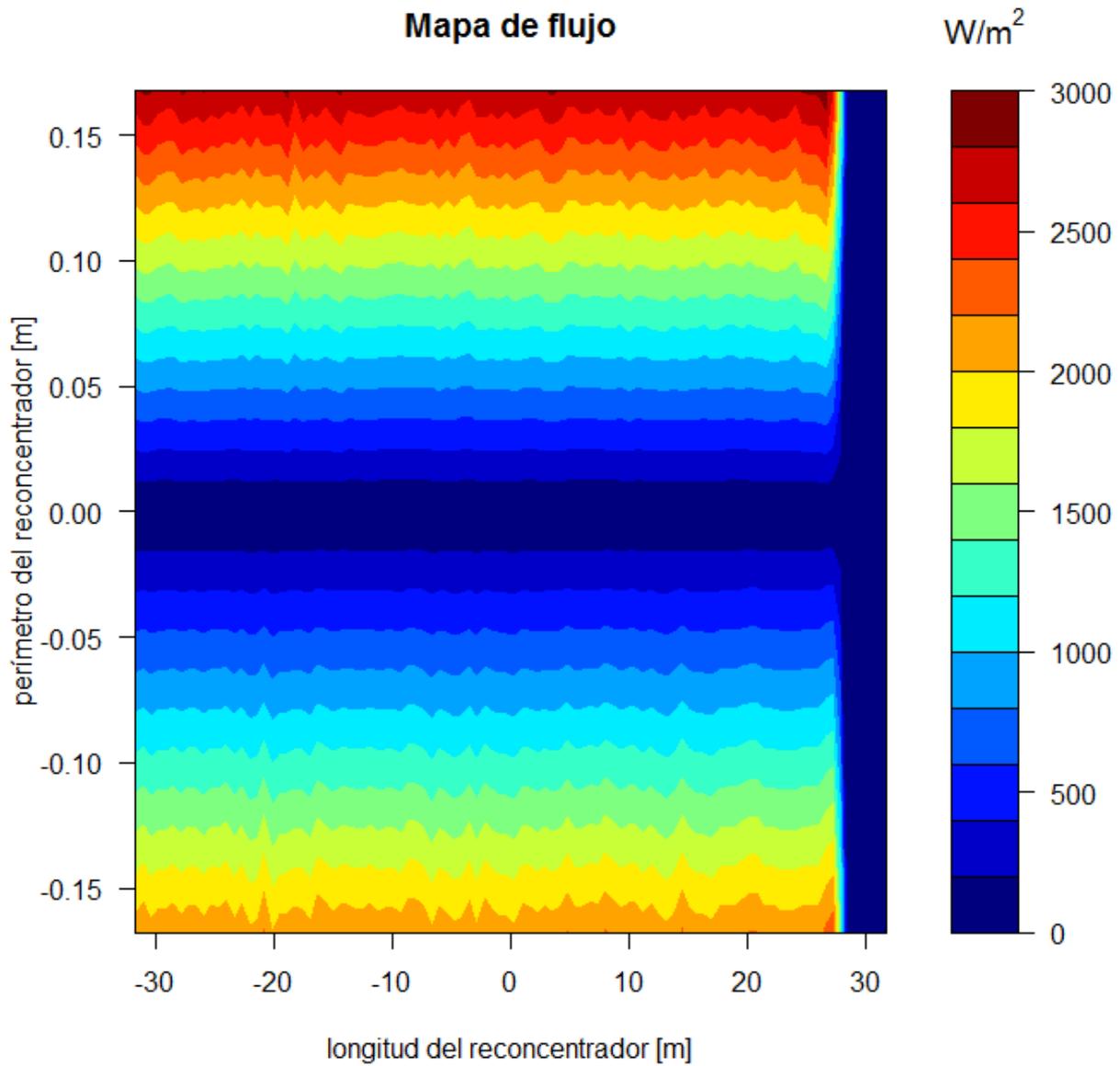


Ilustración 62- Mapa de flujo del reconcentrador en invierno

7 CONCLUSIONES

- Conclusiones del análisis óptico del concentrador lineal de Fresnel

La orientación de la planta afecta mucho significativamente al comportamiento óptico de la misma, y eso se puede apreciar en los rendimientos anuales y mensuales de las tres configuraciones estudiadas.

Rendimiento orientación N-S [%]	Rendimiento orientación E-O [%]	Rendimiento orientación real [%]
40,82	37,42	36,00

Tabla 17-Rendimientos para distintas orientaciones

La orientación Norte-Sur es la que presenta un rendimiento medio anual más elevado, mientras que la orientación real presenta el rendimiento medio anual menor. Si se analizan los rendimientos mensuales, la orientación Este-oeste y real presentan rendimientos más constantes a lo largo del año, como se puede ver en la Ilustración 53, lo cual resulta interesante en industrias con demanda energéticas constantes a lo largo del año, mientras que la orientación Norte-Sur presenta rendimientos mayores en verano que en invierno, por lo que es interesante en industrias donde la demanda es mayor en verano, como ocurre con la instalación de refrigeración solar de Sevilla.

El efecto del secundario es bastante importante en cuanto a rendimientos ópticos medios anuales. Se obtiene para el modelo con reconcentrador un valor del 36,00%, tal y como ya se ha visto, mientras que para el modelo sin reconcentrador el valor es de 30,46%, 5,54 puntos menos.

La calidad óptica de los espejos es un factor importante en el comportamiento óptico del sistema.

A partir de un error óptico de 2 mrad, la caída de rendimiento es muy acusada, de ahí el hecho de lo importante que es mantener los espejos limpios y disponer de un buen sistema de seguimiento, pues sin esto, los rendimientos caerían de forma considerable (se pasa de un 36,92% para un error de 3 mrad a un valor de 30,00% para 6 mrad, una caída de 6,92 puntos).

El efecto de los radios de curvatura no es tan importante como el de la calidad óptica de los espejos. El pasar del modelo real al modelo con radios de curvatura igual al doble de la distancia focal supone un aumento del rendimiento de 0,46 puntos.

El rendimiento óptico medio anual calculado con la matriz de eficiencia óptica es de 36,00% y con el modificador del ángulo de incidencia de 36,75%, una diferencia de 0,75 puntos. Comparando los errores para cada posición del sol se puede apreciar que para las posiciones del sol cuando este está bajo, los errores son mayores. Hay que tener en cuenta que estas posiciones se dan muy poco y se dan cuando el sol amanece o se pone, donde el nivel de radiación es bajo.

8 FUTURAS LÍNEAS DE I+D EN LA TECNOLOGÍA FRESNEL

Las plantas construidas con esta tecnología hasta la fecha, y las que están en construcción, son el claro ejemplo de que la tecnología de concentrador lineal Fresnel empieza a ser competitiva. En un futuro próximo, se debe estudiar la implantación de mejoras a estas plantas como sistemas de almacenamiento térmico e hibridación con otras tecnologías. Esto mejoraría la eficiencia global de las plantas y permitirían una mayor generación de energía, así como la mejora de la gestionabilidad de la planta, permitiendo almacenar energía en horas valle y venderla en horas pico. Las plantas de Puerto Errado I y II presentan ya almacenamiento térmico, pero solamente cuenta con media hora.

Las centrales de concentradores lineales de Fresnel presentan costes de inversión muy elevados, ya que se disponen de muy pocas centrales de este tipo. La estandarización de los procesos de producción y la fabricación de los mismos a gran escala reducirían en gran parte las inversiones necesarias para la construcción de estas centrales.

Las principales líneas de investigación de la tecnología de concentradores lineales de Fresnel son, por un lado, sistema Fresnel con sales fundidas como fluido de trabajo y sistema de almacenamiento y, por otro lado, sistema Fresnel con generación directa de vapor y almacenamiento con material en cambio de fase, como aparece recogido en el documento *“IDENTIFICACIÓN SISTEMÁTICA DE RELACIONES DE DEPENDENCIA ENTRE LAS DISTINTAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN I+D: SOLAR TÉRMICA DE CONCENTRACIÓN”* que el CTAER redactó para Solar Concentra, donde se explica al detalle dichas líneas de investigación.

- Conclusión final del autor

Como ya se ha dicho, el sol es una fuente energética brutal la cual tenemos que explotar al máximo de la manera más eficiente, que no eficaz. Para ello, cada vez se están construyendo más centrales termosolares con mayores rendimientos globales.

Hay que seguir el camino marcado hasta ahora dentro del mundo de la energía solar de concentración. Avanzar y mejorar, alcanzando objetivos a priori inalcanzables.

Los combustibles convencionales empiezan a escasear, pero una cosa está clara: el sol sale cada día, aprovechémoslo.

9 REFERENCIAS

- [1] Ruíz Hernandez, Valeriano y Silva Pérez, Manuel Antonio. *Radiación solar: Energías renovables, 5º curso de industriales*.
- [2] Cener.
- [3] International Energy Agency. <https://www.iea.org/>.
- [4] www.wikipedia.org.
- [5] Ruíz Hernandez, Valeriano, Silva Pérez, Manuel Antonio y Lillo Bravo, Isidoro (2009). *La electricidad solar térmica, tan lejos, tan cerca*
- [6] Silva Pérez, Manuel Silva. *Introducción a las centrales termosolares. Centrales termosolares, 4º curso del grado de ingeniería de la energía de la Universidad de Sevilla*.
- [7] Villar Fernández, Rafael. *Estudio del rendimiento óptico de un captador Fresnel*.
- [8] Mills, David R y Morrison Graham L (1999). *Compact linear Fresnel reflector solar thermal powerplants*. Solar Energy Vol.68 263-283.
- [9] <http://opex-energy.com/index.html>
- [10] B.S. Negi, T.C. Kandpal y S.S. Mathur (1989). *Designs and performance characteristics of a linear fresnel reflector solar concentrator with a flat vertical absorber*. Solar & Wind Technology Vol.7 379-392.
- [11] Guangdong Zhu, Tim Wendelin, Michael J. Wagner y Chuck Kutscher (2013). *History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors*. Solar Energy Vol.103 639-652.
- [12] R. Abbas, M.J. Montes, A. Rovira, J.M. Martínez-Val. (2015). *Parabolic trough collector or linear Fresnel collector? A comparison of optical features including thermal quality based on commercial solutions*. Solar Energy Vol.124 198-215.
- [13] P.L. Singh, S. Ganesan, G.C. Yadav (1998). *Performance study of linear Fresnel concentrating solar device*. Renewable energy Vol.18 409-416.
- [14] Bernhard, R., Laabs, H.G., de Lalaing, J., Eck, M., Eickhoff, M., Pottler, K (2008). *Linear Fresnel collector demonstration on the PSA. Part I - design: construction and quality control*.
- [15] Selig, M., Mertins, M. (2010). *From saturated to superheated direct solar. Steam generation - technical challenges and economical benefits*. SolarPACES 2010.
- [16] Gordon, J.M., Ries, H. (1993). *Tailored edge-ray concentrators as ideal second stages for fresnel reflectors*. Appl. Opt. 32 2243-2251.
- [17] Roberto Grena y Pietro Tarquini (2010). *Solar linear Fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid*. Energy Vol.36 1048-1056.
- [18] Andreas Häberle, Christian Zahler, Hansjörg Lerchenmüller, Max Mertins, Christof Wittwer, Franz Trieb, Jürgen Dersch. *The Solarmundo line focussing Fresnel collector. Optical and thermal performance and cost calculations*. SolarPACES 2002.
- [19] Liddell Solar Thermal Station.
- [20] <https://www.evwind.es/>
- [21] <http://www.psa.es>
- [22] https://www.researchgate.net/publication/262178578_Concentrated_Solar_Power_CSP
- [23] <http://blogdeviajesviajarvayprender.blogspot.com.es/2014/03/puerto-errado-2-la-central-electrica.html>
- [24] Sánchez Tapia, David (2011). *Estudio técnico y económico de una instalación solar con colectores lineales Fresnel*.

- [25] <http://helioscsp.com/india-reliance-powers-dhursar-concentrated-solar-power-csp-project-nears-completion/>
- [26] <http://www.protermosolar.com/>
- [27] http://ship-plants.info/?collector_type=6
- [28] <http://www.ferasrl.it/rinnovabili-primo-solare-termodinamico-fresnel-per-lagroalimentare-cesare-fera-con-la-tecnologia-csp-lenergia-del-sole-per-processi-industriali-meno-costosi-e-piu-sosten/>
- [29] <http://www.nrel.gov/>
- [30] M. Collares-Pereira, D. Canavarro, L.L. Guerreiro *.Linear Fresnel reflector (LFR) plants using superheated steam, molten salts, and other heat transfer fluids.*
- [31] <https://sam.nrel.gov/>
- [32] F.J. Pino, R. Caro, F. Rosa, J. Guerra (2011). *Experimental validation of an optical and thermal model of a linear Fresnel collector System.* Applied Thermal Engineering Vol.50 1463-1471.
- [33] Gabriel Morin,1, Jürgen Dersch, Werner Platzer, Markus Eck, Andreas Häberle (2011). *Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants.* Solar Energy Vol.86 1-12.
- [34] Martí Romero, Julio (2013). *Análisis energético de una planta de producción de frío solar mediante tecnología Fresnel.*
- [35] <https://www.google.es/maps/>
- [36] <https://es.climate-data.org/region/252/>
- [36] Miriam Ebert, Daniel Benitez, Marc Röger, Roman Korzynietz, José Antonio Brioso (2016). *Efficiency determination of tubular solar receivers in central receiver systems.* Solar Energy Vol.139 179-189.