

Trabajo Fin de Grado.

Grado en ingeniería de las Tecnologías Industriales.

**Diseño y análisis de un pequeño horno solar
con Tonatiuh**

Autor: Fernando Sánchez Medina

Tutor: Manuel Silva Pérez

**Departamento de Ingeniería Energética
Grupo de Máquinas y Motores Térmicos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en ingeniería de las Tecnologías Industriales

Diseño y análisis de un pequeño horno solar con Tonatiuh

Autor:

Fernando Sánchez Medina

Tutor:

Manuel Silva Pérez

Departamento de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Diseño y análisis de un pequeño horno solar con Tonatiuh.

Autor: Fernando Sánchez Medina

Tutor: Manuel Silva Pérez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mi tutor

Agradecimientos

Agradecer a mi familia, amigos y todos los que me han apoyado a lo largo de mi carrera, así como a todos aquellos profesores y docentes que hicieron posible mi formación universitaria. Es un honor para mí haber formado parte de esta gran escuela.

RESUMEN

Los hornos solares se definen como dispositivos que concentran la radiación solar en un área pequeña llamada foco donde las temperaturas pueden alcanzar los 3500 °C.

Su diseño consta de dos o más etapas en las que intervienen heliostatos, reflectores parabólicos, y otro tipo de reflectores. Las aplicaciones de la energía solar son diversas entre las que podemos destacar la fabricación de combustible de hidrógeno o nanomateriales, la fundición de acero, generación de electricidad...

Este proyecto trata del diseño de un pequeño horno solar que usará como concentrador primario una antena parabólica, disponible en el Departamento, de 1800 mm de diámetro y 778 mm de distancia focal. El diseño incluye el dimensionado de un heliostato plano y la estimación de la distribución de flujo radiante y potencia máxima obtenible sobre un objetivo plano (*target*) situado a la distancia focal, así como un análisis paramétrico para estimar la influencia de la posición del blanco con respecto al foco (*slant range*) y de las posibles desviaciones constructivas con respecto al diseño. La potencia máxima obtenible sobre un objetivo plano de xx mm de diámetro ha resultado ser igual a 2,32 kW. Para la realización de los cálculos se ha recurrido al software de trazado de rayos de código abierto "*Tonatiuh*".

Agradecimientos

Resumen

Índice

Índice de Tablas

Índice de Figuras

1	Introducción: Hornos solares y sus aplicaciones	1
1.1.	<i>Introducción</i>	1
1.2.	<i>Esquema de un horno solar</i>	1
1.3.	<i>Aplicaciones de los hornos solares</i>	4
2	Definición de objetivos	7
3	Antecedentes	8
3.1.	<i>Componentes de un horno solar</i>	8
3.2.	<i>Hornos solares existentes</i>	14
3.3.	<i>Herramientas de análisis óptico de sistemas concentradores</i>	25
3.3.1.	<i>HELIOS</i>	26
3.3.2.	<i>CIRCE2</i>	27
3.3.3.	<i>ASAP</i>	27
3.3.4.	<i>SolTRACE</i>	28
3.3.5.	<i>Tonatiuh</i>	28
4	Metodología	30
4.1.	<i>Tonatiuh</i>	30
4.1.1.	<i>Parámetros</i>	31
4.1.2.	<i>Simulación</i>	39
4.2.	<i>Diseño de horno solar con código Tonatiuh</i>	42
4.2.1.	<i>Forma solar</i>	44
4.2.2.	<i>Diseño del sistema</i>	45
4.2.3.	<i>Simulación</i>	53
5	Resultados	56
6	Conclusiones	74
	Referencias	76

Tabla 1. Diferentes códigos de análisis de sistemas de concentración.

Tabla 2. Energía obtenida al variar el slant range.

Tabla 3. Energía obtenida en el receptor al variar sigma slope.

Tabla 4. Variación de la potencia al variar la inclinación.

Tabla 5. Variación de la potencia con la componente acimutal.

Tabla 6. Geometría del heliostato

Tabla 7. Geometría del concentrador parabólico

Figura 1. Heliostato plano

Figura 2. Esquema de superficie parabólica concentradora

Figura 3. (a) Diagrama de funcionamiento (b) Horno solar con lamas de atenuación

Figura 4. Comparación concentradores secundarios reflectivo y refractivo

Figura 5. Heliostato Plano.

Figura 6. Tipos de concentradores

Figura 7. Características de los concentradores de la figura 5

Figura 8. Formulación del concentrador de Sheffler

Figura 9. Esquema concentrador tipo Sheffler

Figura 10. Concentrador del sistema Vanguard

Figura 11. Concentrador formado por multitud de láminas formando estructura

Figura 12. Concentrador parabólico facetado

Figura 13. Lamas de atenuación de la P.S.A

Figura 14. Horno solar de Lavoisier

Figura 15. Horno solar de Mont-Louis

Figura 16. Horno solar de Odeillo, Francia

Figura 17. Horno solar de Parkent, Uzbekistán

Figura 18. Horno solar de PSI, Suiza

Figura 19. Lámparas de xenón horno solar PSI

Figura 20. (a) Heliostato horno DLR; (b) Concentrador matriz facetada horno DLR

Figura 21. Simulador solar situado en el DLR (Colonia), Alemania

Figura 22. Horno solar Universidad de Valparaíso

Figura 23. Horno Solar Valparaíso

Figura 24. Horno Solar del NSTTF, Albuquerque

Figura 25. SF-60 PSA, Almería (España)

Figura 26. SF-40 PSA, Almería (España)

Figura 27. Horno solar SF-5, Almería

Figura 28. Horno solar de Colorado (NREL)

Figura 29. Distintos sistemas de concentración en Tonatiuh

Figura 30. Error cometido VS Rayos lanzados

Figura 31. Distribución angular tipo Pillbox

Figura 32. Captura de pantalla Tonatiuh definiendo forma solar

Figura 33. Selección de la posición solar

Figura 34. Propiedades ópticas de Tonatiuh

Figura 35. Formas geométricas en Tonatiuh

Figura 36. Comandos para establecer coordenadas

Figura 37. Tipos de nodos

Figura 38. Parámetros para definir disco parabólico

Figura 39. Parámetros para definir disco plano

Figura 40. Tipos de materiales

Figura 41. Opciones de trazado de rayos con Tonatiuh

Figura 42. Evolución del error cometido al aumentar el número de rayos a lanzar

Figura 43. Elección del tipo de almacenamiento y superficie a exportar

Figura 44. Representación 3D

Figura 45. Mapa de densidades

Figura 46. Características técnicas antenas Televés

Figura 47. Boceto acotado del horno solar

Figura 48. Curva Energía vs Área para solsticio de verano

Figura 49. Distribución energética tipo PILLBOX

Figura 50. Definición de la forma solar para nuestro horno solar

- Figura 51.** Heliostato en Tonatiuh
- Figura 52.** Propiedades ópticas heliostato
- Figura 53.** Características geométricas del concentrador parabólico
- Figura 54.** Concentrador parabólico en Tonatiuh
- Figura 55.** Propiedades ópticas del concentrador parabólico
- Figura 56.** Receptor en Tonatiuh.
- Figura 57.** Características geométricas del receptor
- Figura 58.** Propiedades ópticas del receptor
- Figura 59.** Horno solar en Tonatiuh
- Figura 60.** Diferentes vistas del horno solar diseñado con Tonatiuh
- Figura 61.** Desglose de nodos en Tonatiuh
- Figura 62.** Almacenamiento en archivo binario
- Figura 63.** Selección de superficie para almacenar mapa de fotones
- Figura 64.** Información a almacenar tras la simulación con Tonatiuh
- Figura 65.** Interfaz de Tonatiuh tras el lanzamiento de rayos
- Figura 66.** Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,778m
- Figura 67.** Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,728m
- Figura 68.** Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,678m
- Figura 69.** Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,628m
- Figura 70.** Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,828m
- Figura 71.** Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,878m
- Figura 72.** Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,928m
- Figura 73.** Distribución de flujo radiante en el receptor para un sigma slope = 2 mrad
- Figura 74.** Distribución de flujo radiante en el receptor para un sigma slope = 3 mrad
- Figura 75.** Distribución de flujo radiante en el receptor para un sigma slope = 4 mrad
- Figura 76.** Relación potencia – inclinación

Índice figuras

Figura 77. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Theta = 2^\circ$

Figura 78. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Theta = 1,5^\circ$

Figura 79. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Theta = 1.25^\circ$

Figura 80. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Theta = 0.75^\circ$

Figura 81. Representación de la variación de la componente acimutal

Figura 82. Relación potencia – componente acimutal

Figura 83. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Phi = 2^\circ$

Figura 84. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Phi = 1.5^\circ$

Figura 85. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Phi = 1.25^\circ$

Figura 86. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Phi = 0.75^\circ$

1. INTRODUCCIÓN: HORNOS SOLARES Y SUS APLICACIONES

1.1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas termosolares de concentración se basan en la energía del sol para obtener energía térmica la cual puede utilizarse directamente (por ejemplo, calor de proceso industrial) o indirectamente para la producción de electricidad mediante un ciclo de potencia o para otras aplicaciones.

Dentro de los sistemas termosolares de concentración se encuentran los hornos solares, los cuales mediante la concentración de la radiación en varias etapas logran alcanzar elevadas temperaturas y ratios de concentración en el punto receptor

1.2. ESQUEMA DE UNA INSTALACION

Los componentes de los que consta un horno solar pueden variar dependiendo del número de etapas para el cual lo diseñemos. Entre los posibles componentes se encuentran: heliostato plano, concentrador parabólico, CPC (*Compound parabolic concentrator*), etc...[2]

De manera más general, un horno solar simple de 2 etapas consta de:

- Heliostato plano:

Se trata de un espejo plano que suele colocarse al norte del concentrador y se encarga de seguir el sol captando la radiación solar y redirigiéndola hacia el concentrador. Su centro de rotación se encuentra en línea con el eje óptico del concentrador parabólico. La diferencia entre los heliostatos que se utilizan para sistemas de torre central y los utilizados en un horno solar es que en estos últimos los rayos la superficie reflectora es plana, de forma que los rayos se reflejan paralelamente al eje óptico del heliostato, mientras que los heliostatos usados en centrales termosolares presentan una cierta curvatura (normalmente esférica) para concentrar la radiación solar. [2]

1. Introducción: hornos solares y sus aplicaciones



Figura 1. Heliostato plano

- Concentrador:

Se trata un paraboloide de revolución, también conocido como disco parabólico. Un paraboloide se define como la superficie tridimensional curva creada a partir de la revolución de una parábola alrededor de su eje. La expresión que lo define es la siguiente[3]:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f}$$

En la ecuación anterior (x y z) representan las coordenadas de los puntos pertenecientes al paraboloide.

“f” es la distancia focal, distancia a la que se encuentra el punto en el cual son reflejados todos los rayos que llegan al concentrador paralelamente a su eje óptico.

1. Introducción: hornos solares y sus aplicaciones

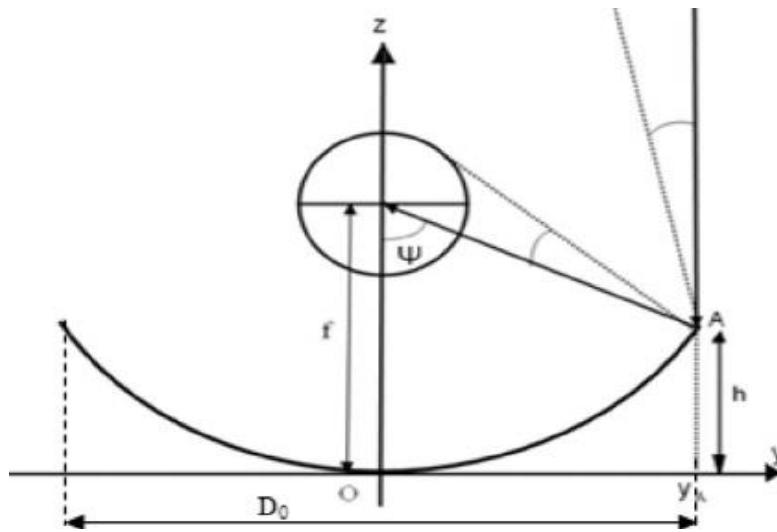


Figura 2. Esquema de superficie parabólica concentradora

En la imagen anterior se puede apreciar los parámetros citados anteriormente así como un ángulo Ψ , denominado rim angle (“ángulo de borde”). El rim angle se define como el ángulo formado entre el eje del concentrador y la línea que une el foco con el borde del mismo. Es un parámetro que caracteriza la geometría de un concentrador parabólico ya que existe una estrecha relación entre Ψ , D_0 y h :

$$\tan(\Psi) = \frac{1}{\frac{D_0}{8h} - \frac{2h}{D_0}}$$

Donde D_0 y h representan el diámetro del disco y la profundidad de este respectivamente.

- Atenuador:

Existen diferentes opciones para regular el flujo que queremos que le llegue a nuestro foco. Por un lado podemos tener un foco móvil, el cual colocaremos a una distancia (“slant range”) u otra dependiendo de la potencia requerida. [2]

Por otro lado podemos utilizar lamas atenuadoras, como su nombre indica consiste en una serie de lamas colocadas paralelas unas a otras que regulan la cantidad de flujo que le llega al concentrador parabólico

1. Introducción: hornos solares y sus aplicaciones

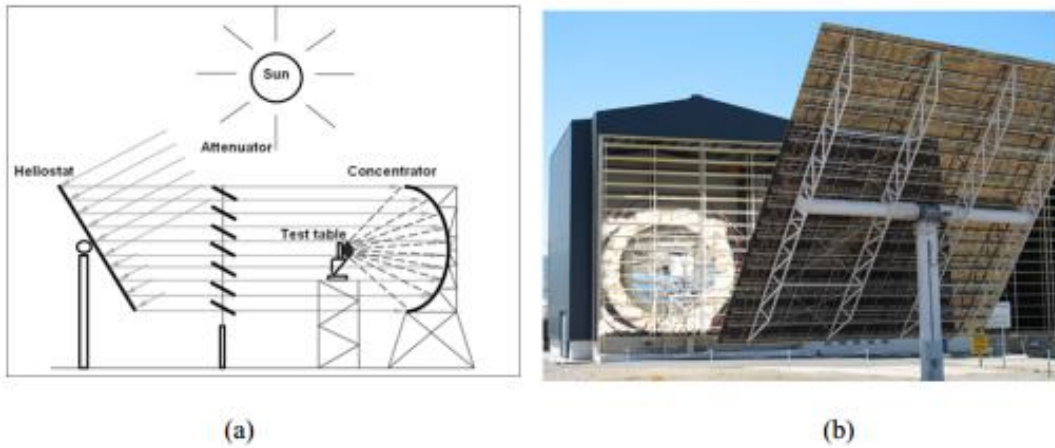


Figura 3. (a) Diagrama de funcionamiento (b) Horno solar con lamas de atenuación [2]

1.3 APLICACIONES

Un horno solar permite calentar rápidamente la superficie de una muestra gracias a su capacidad de concentración de la energía [4].

Estudios en el NREL han revelado que la utilización de concentradores secundarios refractivos permite conseguir una concentración altísima, record hasta ahora [4]. Un concentrador refractivo está compuesto por un material de cristal único sólido. Este usa la refracción y reflexión total interna para dirigir el flujo solar alcanzando ratios de concentración mucho mayores que con los concentradores secundarios reflectivos (del orden de 20:1 frente a 7:1)[5].

1. Introducción: hornos solares y sus aplicaciones

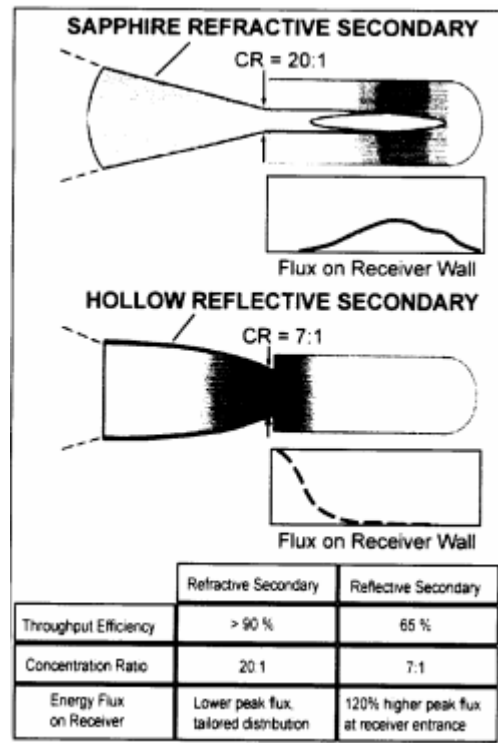


Figura 4. Comparación concentradores secundarios reflectivo y refractivo [5].

Sus aplicaciones dependiendo de la temperatura alcanzada en el foco pueden variar:

- Cerca de los 1000 °C para la producción de aire caliente.
- Cerca de los 1400 °C producción de hidrógeno por la ruptura de moléculas de metano.
- Entorno a los 2500 °C para probar materiales en condiciones extremas como pueden ser reactores nucleares.
- Temperaturas superiores a los 3500°C para la producción de nanomateriales por energía solar inducida por sublimación y enfriamiento controlado.

Indagando un poco en las aplicaciones destacables:

- En lo que respecta al tratamiento de materiales, la capacidad de un horno solar de calentar de forma selectiva la superficie de una muestra ha conseguido obtener materiales cuyas propiedades han sido mejoradas en lo que respecta a conductividad (se logran materiales superconductores), resistencia a la corrosión, fricción y oxidación. [6]

1. Introducción: hornos solares y sus aplicaciones

- Permite realizar estudios de envejecimiento ultra acelerado. Se sabe que todos los materiales se acaban descomponiendo por culpa de la exposición a luz ultravioleta. En materiales utilizados para algunos sistemas de energía solar esto no es admisible por lo que es necesario estudiar como resultará el envejecimiento de estos con el paso de los años. Métodos convencionales permitían estudiar este envejecimiento con una aceleración de 5 veces, con los hornos solares se ha demostrado una aceleración de 100 veces. Esto permite estudiar el envejecimiento de materiales a 20 años en 2 meses y medio.[4]
- Desintoxicar los desechos peligrosos. Con un haz de luz concentrada se pueden romper los enlaces de numerosos productos químicos tóxicos. Estos procesos implican un reactor solar que alcanza los 700°C con una concentración de aproximadamente 500 soles.[4]

2. DEFINICION DE OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es el diseño de un horno solar a partir de un disco parabólico existente de 1,8m de diámetro (D_0) y 0,27m de altura (h). Esto se lleva a cabo mediante la herramienta de trazado de rayos “Tonatiuh” en la cual se modela el horno solar en cuestión calculando el área óptima del heliostato para obtener la máxima potencia.

Tras todo esto se van a realizar 4 estudios de sensibilidad:

- En el primero de ellos se estudia la influencia del “slant range” distancia desde el centro del concentrador hasta el foco, mostrando como varía la potencia obtenida en el foco al variar el slant range entorno a la distancia focal ($f=0.778\text{cm}, \pm 15\text{cm}$)
- El segundo hace referencia al parámetro “sigma slope” el cual engloba tanto el error de pendiente como el efecto de la no specularidad. Se estudiará una variación de este en el concentrador disco parabólico de $\sigma = 3\text{mrad} \pm 1\text{mrad}$
- En tercer lugar se realiza un estudio de sensibilidad sobre la variación de la inclinación $\theta = \frac{\pi}{2} \pm 0.035\text{rad} (2^\circ)$
- Por último se estudiara una variación de la componente acimutal $\varphi = 0 \pm 0.035\text{rad} (2^\circ)$

3. ANTECEDENTES

3.1 Componentes de un horno solar

Como se reflejó anteriormente, un sistema de horno solar básico está formado por un heliostato plano, un concentrador y un receptor.

- Heliostato:

Se trata de un espejo o conjunto de espejos que en conjunto forman la superficie reflectora y poseen seguimiento en uno o dos ejes de forma que permiten reflejar la máxima cantidad de energía solar recibida durante todo el día.

El heliostato de un horno solar posee 3 elementos básicos: los espejos, el sistema de seguimiento del sol en doble eje y la estructura que le da soporte. [7]

Entre los principales usos del heliostato se encuentran:

-Plantas termoeléctricas donde el campo de heliostatos concentra la energía para obtener energía eléctrica. Actualmente, los heliostatos comerciales de centrales termosolares llegan a medir hasta 150 m².

-Realización de observaciones astronómicas, ya que permite mantener fija la imagen del Sol o de un astro sobre el aparato de observación. En concreto los heliostatos se utilizan para concentrar algunos tipos de radiación.

-Experimentación con materiales, es el caso de los hornos solares, que permiten alcanzar temperaturas en el foco de hasta 3500°C.



Figura 5. Heliostato Plano.

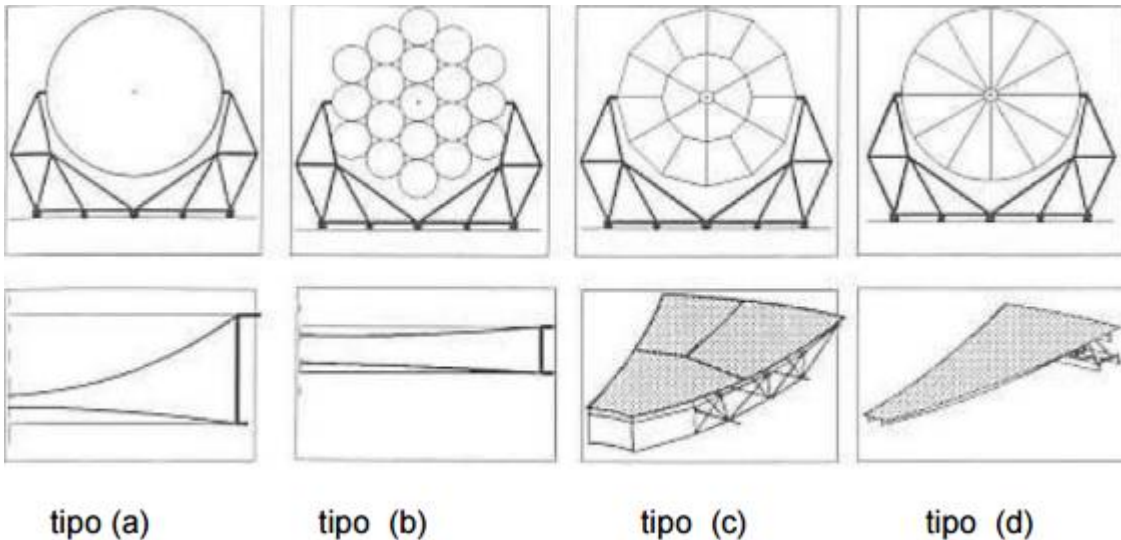
- **Concentrador:**

Como se explicó anteriormente se trata de una superficie de revolución que forma un paraboloide de revolución truncado cuya generatriz es una parábola que girada en alrededor de su eje forma el paraboloide cuya expresión es la siguiente:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f}$$

Donde ya se ha explicado anteriormente lo que representa cada parámetro.

La superficie cóncava del concentrador puede ser de distintos tipos [8]



tipo (a)

tipo (b)

tipo (c)

tipo (d)

Figura 6. Tipos de concentradores

3. Antecedentes

En la figura anterior se puede observar los distintos discos parabólicos que se han ido creando en la búsqueda por encontrar soluciones de compromiso entre coste y prestaciones.

	(a) Membrana de metal de un solo componente	(b) 19 membranas de metal el mismo perímetro.	(c) 18 espejos de fibra formando una superficie	(d) Multitud de láminas de cristal formando una estructura
Diámetro exterior (m)	8'76	9'68	8'5	8'5
f/D radio	0'57	0'65	0'53	0'53
Masa del concentrador (kg)	2800	2950	2170	1770

Figura 7. Características de los concentradores de la figura 6

De los distintos tipos de concentradores que nos podemos encontrar, vamos a hablar de algunos que se han utilizado en los últimos años:

1. Sheffler: La tecnología es sencilla, se basa en un concentrador parabólico excéntrico formado por planchas reflectantes que gira alrededor de un eje (en el caso de los hornos solares no gira ya que es el heliostato el encargado de seguir el sol). Se trata de una sección lateral de un paraboloide cortado de manera inclinada obteniendo una forma elíptica.[9]

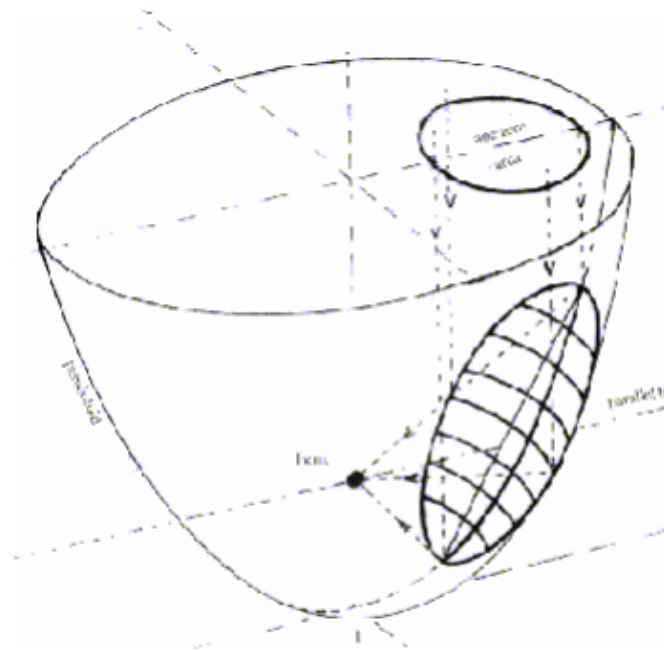


Figura 8. Formulación del concentrador de Sheffler

De esta forma vemos como este concentrador permite reflejar la energía en un punto que no se encuentra en el eje óptico como podemos apreciar en la siguiente figura. De esta forma se evita que el objeto donde se concentre la energía proyecte sombra sobre la superficie del concentrador.

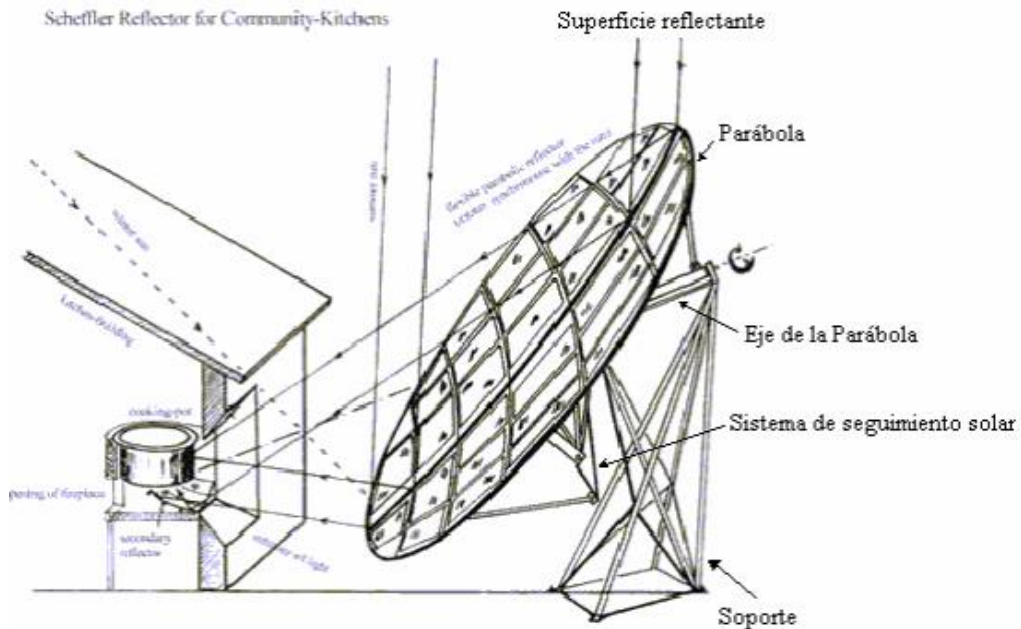


Figura 9. Esquema concentrador tipo Sheffler

2. En segundo lugar tenemos el sistema Vanguard, concentradores diseñados a partir de espejos facetados normalmente con formas cuadrangulares, hexagonales y hasta triangulares unidos sobre una estructura curva. Gracias a la pequeña curvatura de los espejos se logra una mayor precisión y consecuentemente una mayor razón de concentración. Además poseen una alta reflectividad que oscila entre un 91% y 95% [10]. El inconveniente es el coste de montaje ya que requiere un alineamiento preciso para tal cantidad de espejos.

Figura 10. Concentrador del sistema Vanguard [11]



3. Recientemente se ha desarrollado en un proyecto hispano-alemán el concentrador EURODISH, concentrador construido pretendiendo actuar sobre los siguientes aspectos:
 - Menor precio de componentes al identificar los elementos de uso estándar en la industria
 - Nuevo método de fabricación del disco dejando de lado la tecnología de membrana tensionada para utilizar un sistema de moldes con material compuesto. [12]

El concentrador está construido por segmentos individuales hechos de fibra de vidrio montados formando la estructura parabólica.

Además consta de espejos de cristal delgado pegados sobre los segmentos con el fin de lograr una alta reflectividad. [13]



Figura 11. Concentrador formado por multitud de láminas formando estructura

4. Se han desarrollado también concentradores multifaceta (tuvo lugar a finales de los 90), en estos una serie de espejos independientes (facetas) se colocan a modo de concentrador para concentrar la energía en un foco.[11]



Figura 12. Concentrador parabólico facetado

- El atenuador: Como se explicó en el apartado anterior, en los hornos solares cuando no se requiere utilizar la potencia máxima posible, se puede optar por dos procedimientos. [14]

-El primero consiste en no permitir que llegue el flujo máximo al receptor variando su "slant range", es decir, moviendo el receptor a lo largo del eje óptico del concentrador.

-El segundo método consiste en colocar unas lamas atenuadoras que reducen el paso del flujo hacia el concentrador.



Figura 13. Lamas de atenuación de la P.S.A

3.2 Hornos solares existentes

En lo que respecta a hornos solares, no es algo creado tan recientemente como parece, el primer horno solar fue creado por Lavoisier en 1772 utilizando una serie de lentes para concentrar la luz solar y logró alcanzar la temperatura de fusión del platino (1773°C).[15]

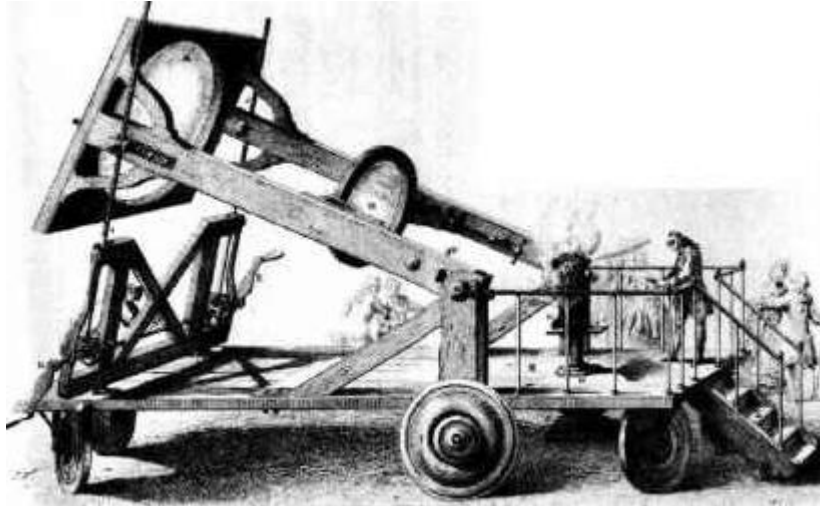


Figura 14. Horno solar de Lavoisier

Tras Lavoisier el tema de los hornos solares se dejó de lado hasta que en 1949 Félix Trombe construyó un horno similar a los de la actualidad en Mont-Louis (Francia). Este horno era capaz de proporcionar 50 kW y se construyó con el propósito de fundir minerales y extraer sustancias más puras.



Figura 15. Horno solar de Mont-Louis

Entre los hornos solares actuales se encuentran:

- **Odeillo:**

Se trata de un horno solar de 1000kW de potencia situado en los Pirineos Orientales en Francia. Utiliza 63 heliostatos planos de 7,5m por 6m que concentran la luz en un gran espejo parabólico de 54m de ancho por 40m de alto que a su vez concentra toda la energía solar en un que se encuentra a 18 metros. Con una eficiencia del 58% y un flujo máximo de $1600W/cm^2$ este horno solar puede llegar a alcanzar los $3500\text{ }^\circ\text{C}$, rango de temperatura que le permite:

- Evaluación y desarrollo de materiales para ser usados en la conversión dinámica de energía térmica en eléctrica.
- Determinación de propiedades dieléctricas a alta temperatura de materiales cerámicos.
- Procesado de materiales refractarios de elevada pureza
- Evaluación de materiales expuestos a elevadas condiciones ambientales como los utilizados en servicios nucleares. [16]



Figura 16. Horno solar de Odeillo, Francia

- **Uzbekistán:**

Es junto al de Odeillo el más grande del mundo. Formado por un disco parabólico de 54m de diámetro y 62 heliostatos con una superficie reflectiva total de 3022.5 m². Proporciona una potencia de 1000kW, y con un flujo máximo de $1000W/cm^2$ llega a alcanzar los $3000\text{ }^\circ\text{C}$. : [17]

Las aplicaciones son similares a las del horno de Odeillo diferenciándose de este en que entre sus aplicaciones proporciona una línea de procesamiento de materiales sintéticos para su uso en la producción cerámica y un sistema de control de proceso automatizado.



Figura 17. Horno solar de Parkent, Uzbekistán

- **PSI “Paul Scherrer Institut” Solar furnace:**

Horno solar situado en Suiza en el instituto Paul Scherrer.

Formado por un heliostato plano de $120m^2$ con seguimiento solar y un concentrador parabólico fijo de 8.5m.

Concentrando el flujo radiante en un foco a una distancia de 5.13m puede proporcionar hasta 40 kW de energía solar térmica alcanzando una concentración de hasta 5000 soles ($1sol=1kW/m^2$) pudiendo alcanzar los 2500K. [18]

Entre las aplicaciones más destacadas de este horno solar se encuentra:

- Metalurgia solar
- Síntesis de gas por craqueo
- Termo gravimetría solar.



Figura 18. Horno solar de PSI, Suiza [18]

Además del horno solar, poseen un simulador solar de alto flujo que consta de una tabla con 10 lámparas de xenón que pueden encenderse o apagarse individualmente, consumiendo aproximadamente 15 kW cada una.

Dichas lámparas son capaces de proporcionar 50 kW logrando una concentración de 11000 soles. Esto permite realizar pruebas también los días en los que la radiación solar no lo permitiría.



Figura 19. Lámparas de xenón horno solar PSI [18]

- **DLR:**

Situado en Colonia, Alemania: Este horno solar está compuesto por un heliostato plano de 57 m^2 y un concentrador de 159 espejos facetados hexagonales con un área total de 42 m^2 .

3. Antecedentes

Con una concentración de 5200 soles y un flujo máximo de 4.5 MW/m^2 consigue una potencia de 22 kW alcanzando temperaturas de 2770K. [19]

Además cuenta con un simulador solar para los días en que las condiciones ambientales no permiten usar el horno solar.

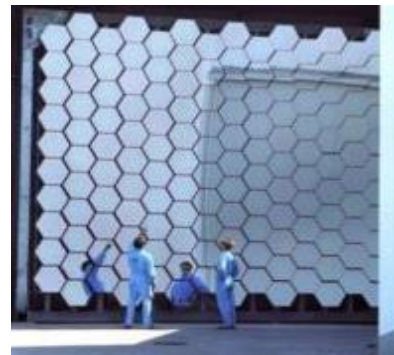
Este consta de 10 lámparas de xenón de 6 kW cada una que consiguen concentración de 4500 soles alcanzando una potencia en el receptor de 20 kW.

Las aplicaciones más destacadas de este son:

- Las pruebas de estrés de células solares de satélites
- Tratamiento de materiales de desecho.
- Pruebas en materiales sometidos a calentamientos elevados en atmósferas oxidantes.



(a)



(b)

Figura 20. (a) Helioestato horno DLR; (b) Concentrador facetado horno DLR [1]



Figura 21. Simulador solar situado en el DLR (Colonia), Alemania

- **Valparaíso:**

Interesante horno creado por alumnos de la Universidad de Valparaíso.

Este horno formado por un heliostato de (6mx6m) que refleja la radiación sobre un conjunto de 305 espejos pequeños hexagonales formando un reflector parabólico con 5.5m de diámetro que concentra finalmente la energía en el receptor.

Es capaz de proporcionar una energía de 5kW alcanzando temperaturas de entorno a los 1650 °C. [20]

Entre las aplicaciones de este horno que podemos destacar se encuentran:

- Producir magnesio con un 90% menos de combustible fósil y un 93% menos de emisiones de carbón ya que el magnesio sería de mucha utilidad para la automoción creando vehículos más ligeros.

- También en el sector de la automoción, la alimentación de vehículos con pilas de hidrogeno supondría eliminar las emisiones de carbono. Para la producción de hidrogeno en Valparaíso recurren al calentamiento de óxido de hierro que al introducirlo posteriormente en agua actúa como un catalizador que produce hidrógeno.



Figura 22. Horno solar Universidad de Valparaíso [20]

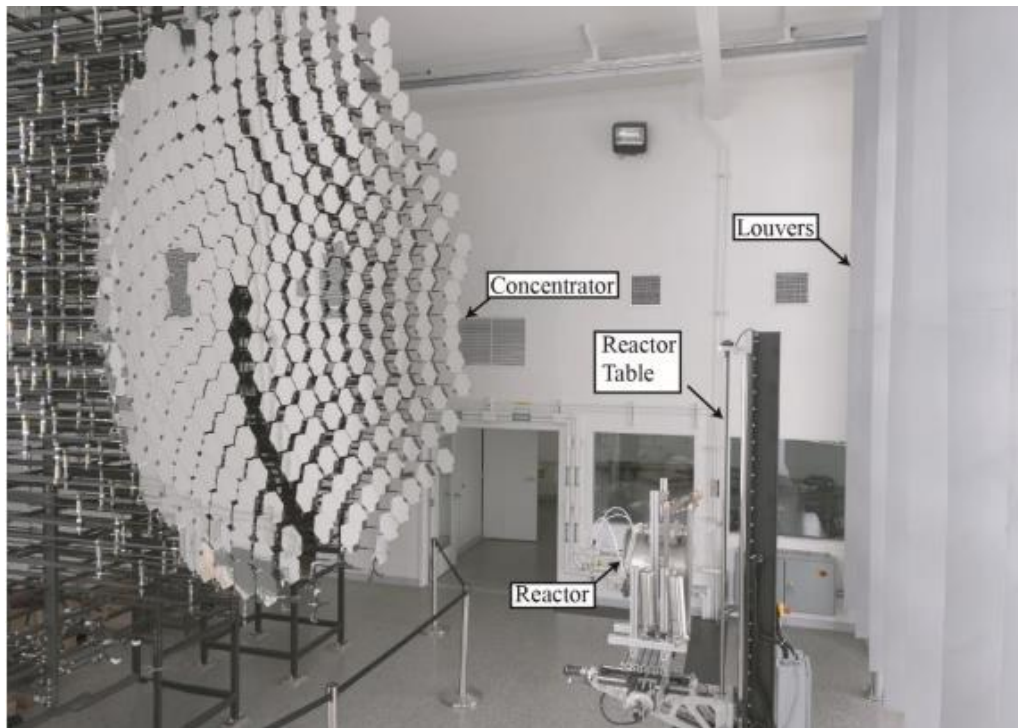


Figura 23. Horno Solar Valparaíso [20]

- **Horno solar de Albuquerque:**

Utiliza un heliostato con seguimiento para dirigir la luz solar hacia un concentrador parabólico que concentra toda la energía en un receptor inmóvil.

Al ser inmóvil el receptor es necesario instalar un atenuador formado por una persiana veneciana.

El heliostato constituye una superficie de 95 m^2 y el concentrador parabólico posee 6.7 m de diámetro. Con todo esto, dicho horno solar consigue una potencia total de 16 kW con un flujo máximo de 500 W/cm^2 . [21]

Este horno solar posee un control de potencia que permite simular transitorios térmicos nucleares. Entre las aplicaciones más destacadas incluye:

- Investigación en las propiedades termofísicas de materiales sometidos a concentraciones solares elevadas.
- Simulación de efectos térmicos de materiales en explosiones nucleares.

-Determinación de los umbrales de funcionamiento y fallo de cerámicas de alta temperatura y materiales refractarios.



Figura 24. Horno Solar del NSTTF, Albuquerque

- **SF-60:**

Horno solar situado en la PSA (Plataforma Solar de Almería) formado por un heliostato constituido por 28 espejos planos que conforman una superficie total de 120 m^2 , un concentrador parabólico con una superficie de 100 m^2 y una reflectividad del 92%.

El receptor se encuentra a una distancia focal de 7,45m el cual recibe una potencia máxima de 69 kW alcanzando un flujo máximo de 300 W/cm^2 . [22]

Entre las aplicaciones principales se encuentran:

- Tratamiento térmico de superficies en materiales tanto metálicos como cerámicos (sinterizado, nitruración, carburación...).
- Experimentos químicos solares.
- Producción de calor mediante el uso de receptores



Figura 25. SF-60 PSA, Almería (España)

- **SF-40:**

Se trata de otro horno solar situado en la PSA, constituido por un heliostato de $100m^2$ que refleja la luz solar sobre un disco parabólico del tipo Eurodish con un diámetro de 8,5 m y una superficie total de $56,5m^2$.

A 4.5m del concentrador parabólico (distancia focal) se encuentra el receptor, sobre el cual incide la energía solar alcanzando concentraciones de $700 W/cm^2$ y una potencia máxima de 40 kW. [23]

De entre las aplicaciones a destacar de este horno solar, se encuentran:

- Tratamientos térmicos de materiales en el aire, atmosfera controlada y vacío (enfriamiento rápido, sinterización, carburación...).
- Investigaciones en aplicaciones a altas temperaturas.



Figura 26. SF-40 PSA, Almería (España) [18]

- **SF-5:**

Horno solar de la plataforma solar de Almería construido para realizar ensayos que requieren altos flujos radiantes, gradientes térmicos y elevadas temperaturas de ensayo.

Este horno es capaz de alcanzar concentraciones de hasta 6000 soles dedicándose principalmente a los tratamientos térmicos a altas temperaturas en atmósferas controladas así como en vacío.

Su gran peculiaridad es que se trata de un horno solar de eje vertical.

La ventaja de esto es que el foco se encuentra en un plano horizontal de modo que las probetas pueden ser tratadas en una superficie horizontal con solo colocarlas sobre un soporte sin necesidad de sujeción. De esta forma se evita la pérdida de material en fundiciones debido a la gravedad.[24]



Figura 27. Horno solar SF-5, Almería

- **Golden, Colorado:**

Horno solar desarrollado por el NREL que proporciona una potencia de 10 kW.

La peculiaridad de este horno es que presenta 3 elementos principales: el heliostato, el concentrador primario y un concentrador secundario refractivo.

Al poseer un concentrador secundario refractivo aumenta la concentración en el receptor llegando a alcanzar elevados ratios de concentración, record alcanzado por un horno solar hasta ahora.

Las aplicaciones principales de este horno son:

- Tratamiento de metales y cerámicas para obtener materiales de mayor valor.
- Fabricación de materiales avanzados como fullerenos y nanotubos.
- Estudio del desgaste ultra acelerado de materiales.
- Desintoxicación de desechos peligrosos[6]



Figura 27. Horno solar SF-5, Almería

3.3 Herramientas de análisis óptico de sistemas concentradores

A la hora de diseñar un sistema de concentración surge la necesidad de una herramienta que permita la simulación del comportamiento que seguirá este con el fin de obtener la distribución de flujo en el receptor.

Dentro de las distintas herramientas que se utilizan para llevar a cabo dicha simulación, podemos diferenciar entre dos:

- En primer lugar las que obtienen la distribución de la densidad de flujo en el receptor de forma analítica empleando entre otros métodos la óptica de conos.
- Por otro lado se encuentran las herramientas que se basan en el trazado de rayos mediante el cual simulan la actuación óptica de distintos sistemas.

Estas herramientas se encargan de simular el fenómeno de recepción y reflexión así como de tener en cuenta los factores que intervienen en el proceso como la

reflectividad, factores de pérdidas... Para de esta forma hacer la simulación lo más real posible.

La siguiente tabla expone a modo de resumen algunos de los códigos para el análisis de los sistemas de concentración [25]:

CÓDIGO	USO
HELIOS	Modela la densidad del flujo solar de un campo de heliostatos mediante la caracterización de la curva de potencia de estos.
CIRCE	Con la versión de CIRCE2, aplicaciones en sistemas de disco y sistemas de concentración lineal
ASAP	Simulaciones ópticas de diferentes sistemas y geometrías
SOLTRACE	Software de trazado de rayos para captadores solares
MIRVAL	Proporciona un modelo de densidad de flujo de campos de heliostatos con trazado de rayos
TONATIUH	Sistema de trazado de rayos que proporciona la distribución de flujo en una superficie elegida

Tabla 1. Diferentes códigos de análisis de sistemas de concentración.

3.3.1 HELIOS

Nos remontamos a 1970, fecha durante la cual fue desarrollado el software de HELIOS por F. Biggs y C.N. Vittitoe en los laboratorios Sandia. Este software resultó ser el más adecuado para la larga variedad de configuraciones de receptor y reflectores de los sistemas de focos puntuales. [26]

El código de HELIOS simula el comportamiento óptico de reflexión en un concentrador para evaluar la distribución de densidad de flujo en un campo de heliostatos aunque también se puede usar para la evaluación de disco parabólico y otras formas.

HELIOS tiene en cuenta las sombras, bloqueos, posición solar, refracción atmosférica, reflectividad, distribución de errores... [20]

Como resultado de la simulación se obtiene una distribución de flujo sobre la superficie elegida como receptor. Utiliza de técnicas de procesamiento de distribuciones como la

convolución de distribuciones gaussianas o el uso de transformadas de Fourier de distribuciones discretas.

En conclusión podemos decir que HELIOS es un código de simulación para plantas solares bastante completo siendo capaz de hacer estimaciones en un instante concreto respecto a potencia y distribución de flujo.

3.3.2 CIRCE2

A mediados de la década de los 80 Ratzel y Boughton movidos por la meta de simplificar y especializar HELIOS en el análisis de los sistemas de tipo disco, crearon CIRCE1 (“Convolution of Incident Radiation with Concentrator Errors”) permitiendo de esta forma al usuario construir y analizar una gran variedad de concentradores solares de foco puntual.

En CIRCE los errores del concentrador así como las convoluciones del perfil de intensidad solar son idénticas que en HELIOS.

Este código de CIRCE del que hablamos hace referencia a la versión CIRCE.001 que presentaba restricciones en el análisis de sistemas reflectores con receptores planos circulares o rectangulares. Posteriormente se actualizó este a CIRCE2 que permitía realizar análisis bidimensionales de geometrías de objetivos internas y externas.

La salida de este código incluye un mapa de flujo de densidad bidimensional sobre la superficie del receptor[27] .

En torno a 1994 Vicente Romero, investigador de los laboratorios Sandia, presentó el programa CIRCE2 que presenta entre sus características la generación y análisis 3D de receptores internos y externos de geometría arbitraria, modelado de la apertura del receptor, mejores resoluciones y más control de la forma solar y de las distribuciones de errores en el concentrador entre otras.

3.3.3 ASAP

Se trata de un software comercial de trazado de rayos que simula la actuación óptica de varias geometrías y sistemas. ASAP une la óptica geométrica y física con modelos 3D de

sistemas mecánicos y ópticos. Construido con herramientas gráficas ASAP permite la visualización de geometría, detalles de trazado de rayos, y análisis de resultados. Además ASAP puede optimizar los sistemas ópticos e importar datos de la geometría SolidWorks.

Permite el modelar la dirección de la radiación solar así como un error de pendiente, además de las características ópticas que hacen referencia a la reflexión, refracción, dispersión y absorción. [20]

3.3.4 SOLTRACE

SolTrace es una herramienta de trazado de rayos desarrollada por el NREL (“National Renewable Energy Laboratory”) utilizada para el análisis y diseño de sistemas de energía solar. [28]

Tiene la finalidad de modelar captadores cilindro parabólico y otras formas y contornos analizando su rendimiento óptico. SolTrace se basa en el trazado de rayos por el método Monte Carlo seleccionando el número de rayos a trazar el usuario y teniendo en cuenta las interacciones ópticas.

Al ser realistas las interacciones de los fotones, el sistema proporciona resultados bastante precisos para sistemas de geometrías complejas que no podían ser modelados de otra forma.

3.3.5 TONATIUH

Es una potente herramienta de código abierto que simula cómo se comporta un sistema solar de concentración desde el punto de vista óptico-energético desarrollado por el CENER (Centro de Energías Renovables) en colaboración con la Universidad de Texas en Brownsville (UTB). [30]

Este software es similar a otros como SolTrace desarrollado por el NREL o CIRCE2 por Sandia pero tiene la peculiaridad de una sencilla interfaz que facilita el diseño y representación.

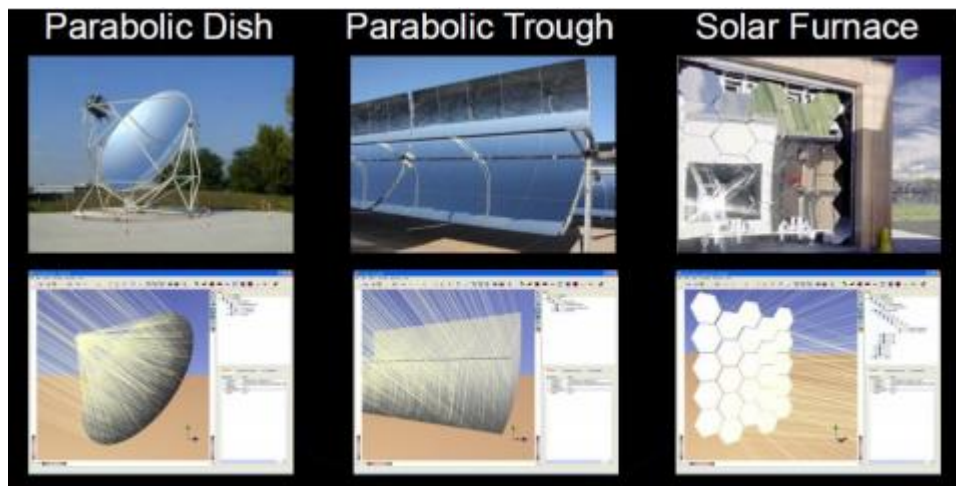


Figura 29. Distintos sistemas de concentración en Tonatiuh

4. METODOLOGÍA

4.1 TONATIUH

En la redacción de los siguientes apartados se han tenido en cuenta las referencias [30] y [31].

Tonatiuh utiliza la metodología de Montecarlo de trazado de rayos. Cada rayo es trazado por el sistema mientras interacciona con las distintas interacciones ópticas (reflectividad, distribución de errores, absortividad...) o ambientales (radiación proveniente del disco solar, forma solar, posición solar...).

El método de Montecarlo es un método numérico que ayuda a resolver problemas físicos y matemáticos usando secuencias de números aleatorios.

La importancia de este radica en que en ocasiones se presentan problemas difíciles de resolver por métodos analíticos o numéricos pero sin embargo se pueden asociar a un modelo probabilístico.

Utilizando este método, la precisión del resultado dependerá del número de rayos a lanzar elegido, disminuyendo el error cometido al aumentar el número de rayos lanzado como se puede ver en la siguiente figura.

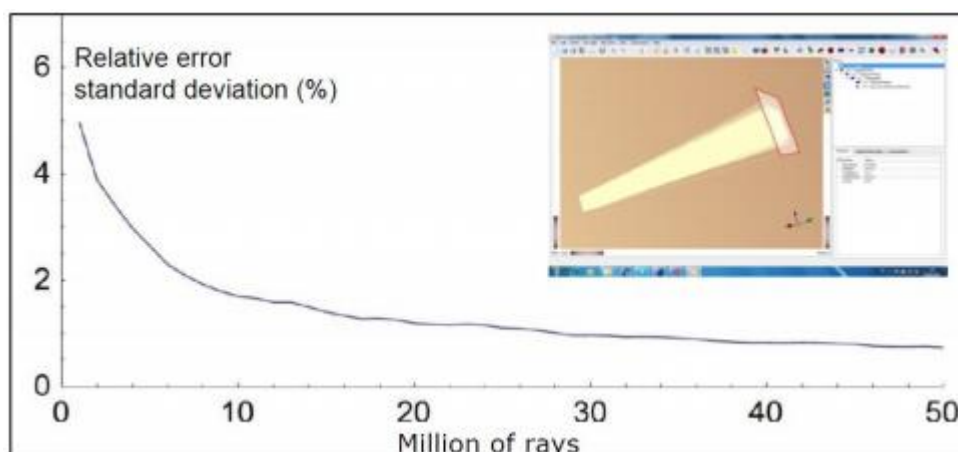


Figura 30. Error cometido VS Rayos lanzados

Una vez hecha la simulación, Tonatiuh devuelve una serie de archivos de elección por el usuario a ser en sistema SQL o archivos binarios en los que contiene información de los impactos de los fotones sobre la superficie que deseamos estudiar.

En el caso del archivo binario, es necesario emplear un script o una secuencia de códigos en Matlab o Mathematica para ilustrar la distribución de flujo sobre el sistema.

4.1.1 Parámetros

Como todo código informático de simulación de un sistema, Tonatiuh tiene unos parámetros de entrada que definen la distribución óptica, geométrica y energética de la forma solar.

FORMA SOLAR:

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:

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.

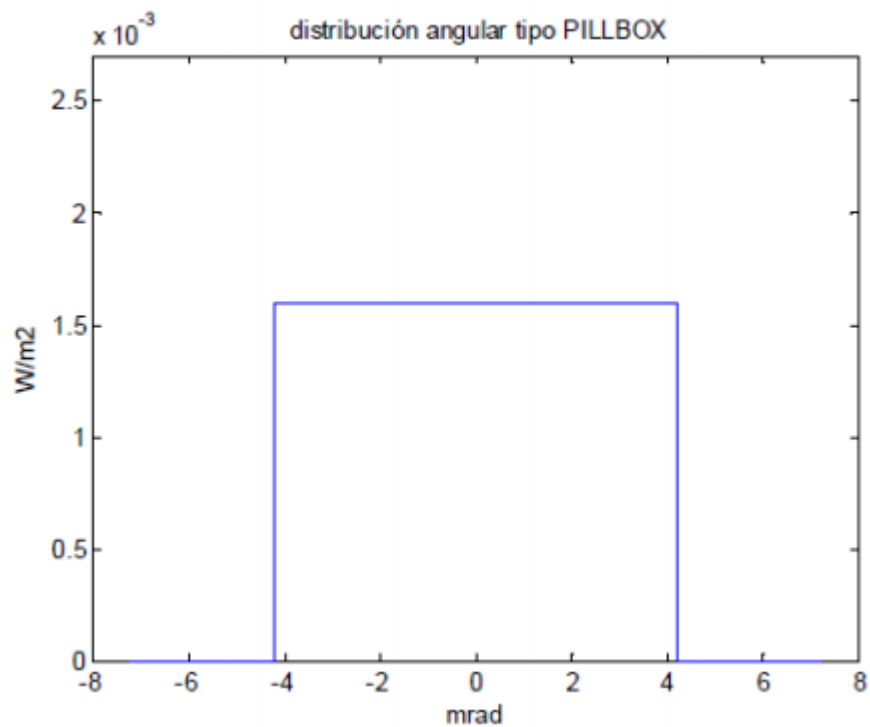


Figura 31. Distribución angular tipo Pillbox

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.

Buie y Monger (2001) y Neumann et al. (2002) de forma independiente dedujeron que la distribución energética del Sol, si es representada por su relación circunsolar (CSR), no varía con la ubicación geográfica. [29]

El CSR (χ) ("Circumsolar ratio") se puede traducir como razón circumsolar. Esta se define como el cociente entre la radiación circumsolar (ϕ_{CS}) y la radiación incidente (ϕ_i). La radiación incidente es la suma de la radiación circumsolar y la radiación procedente del disco solar.

$$\chi = \frac{\phi_{CS}}{\phi_i}$$

Buie et al. (2003) definieron un algoritmo que se utiliza como forma solar con el nombre de distribución de Buie.

$$\phi(\theta) = \begin{cases} \frac{\cos[0,326 \theta]}{\cos[0,308 \theta]} & \text{Para } 0 < \theta < 4,65 \\ e^k \theta^\gamma & \text{Para } 4,65 < \theta < 44 \end{cases}$$

[23]

Estando θ expresado en miliradianes y donde k y γ están definidos por:

$$\begin{aligned} k &= 0,9 \cdot \ln[13,5\chi]\chi^{-0,3} \\ \gamma &= 2,2 \cdot \ln[0,52\chi]\chi^{0,43} - 0,1 \end{aligned}$$

[23]

Con este algoritmo se pone de manifiesto que la distribución espacial de la energía por el disco solar es definida por la relación circumsolar por lo que puede usarse este modelo como forma solar.

Tenemos por tanto dos posibles formas solares las cuales seleccionamos en Tonatiuh de la siguiente manera

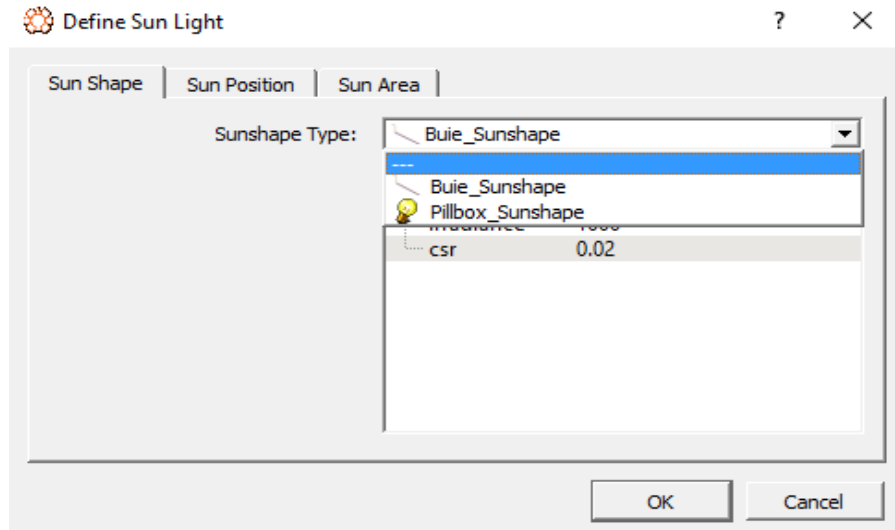


Figura 32. Captura de pantalla Tonatiuh definiendo forma solar

Una vez seleccionada la forma solar, hay que introducir las propiedades físicas del Sol, una de ellas será común para ambas formas solares (irradiancia en W/m^2) y la otra dependiendo de la forma solar elegida se pedirá el CSR (para la distribución Buie) o θ_{max} (para la distribución Pillbox).

A continuación se precisa definir la posición del Sol para el instante que va a ser estudiado el sistema respecto a un observador que se sitúa en el origen de coordenadas.

Esto requiere de dos parámetros, el acimut (ángulo respecto al eje Sur) y la elevación (respecto al plano del horizonte)

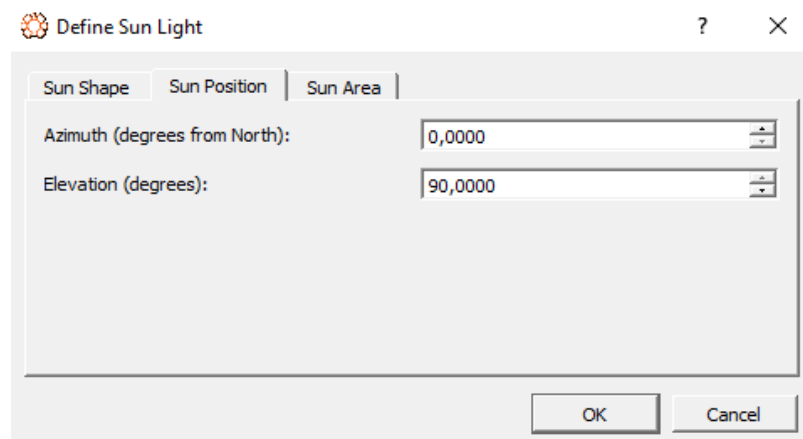


Figura 33. Selección de la posición solar

CALIDAD OPTICA

La calidad óptica de un sistema hace referencia a las propiedades ópticas que este posea. El parámetro que más influye en esta es el error óptico, este reúne los diferentes errores existentes asociados a una desviación normal del sistema reflectivo, y deja fuera los efectos asociados a la forma solar.

Los errores asociados a un sistema reflectivo, son los errores locales de pendiente (deformaciones a causa de la estructura soporte, ondulación superficial...), los de seguimiento y el efecto de la no especularidad.

Tonatiuh considera mediante el parámetro *sigma_slope* el error de pendiente y el efecto de la no especularidad, no teniendo en cuenta el error de seguimiento.

El seguimiento provoca una incertidumbre sobre error en la dirección del rayo incidente, que al aplicar la ley de Snell supone incertidumbre de error de la dirección del rayo a la salida.

La no especularidad provoca un error angular en la dirección del ángulo de salida.

Los errores de superficie suponen las variaciones angulares de la dirección normal que se traduce como una variación del ángulo de salida.

Parameter	Value
m_reflectivity	0.94
m_sigmaSlope	3
m_distribution	NORMAL
m_ambientColor	0.2 0.2 0.2
m_diffuseColor	0.80000001 0.80000001 0.80000001
m_specularColor	0 0 0
m_emissiveColor	0 0 0
m_shininess	0.2
m_transparency	0

Figura 34. Propiedades ópticas de Tonatiuh

Generalmente se otorga un valor aleatorio al valor del parámetro “*sigma slope*” siempre teniendo en cuenta que a mayor error, más probable será que el rayo se desvíe de su trayectoria ideal resultando en una abertura del cono luminoso.

La distribución elegida será la distribución NORMAL

En cada etapa de concentración al incidir la radiación sobre un medio reflexivo esta es modificada por las distribuciones que modelan los errores ópticos dando lugar en la última etapa a una distribución final conocida como forma solar efectiva.

Además de los errores mencionados anteriormente, Tonatiuh tiene en cuenta otros factores como reflectividad, trasmisividad o emisividad y otros que ayudan a definir el perfil óptico completo. A continuación se da una explicación de los parámetros que aparecen en la figura 34:

-AmbientColor: Se trata del color que refleja un objeto según la iluminación ambiente que haya en la escena. Valor por defecto [0,2 0,2 0,2].

-DiffuseColor: Representa el color base de un objeto. Valor por defecto [0,8 0,8 0,8].

-SpecularColor: Calidad reflectiva de los puntos más destacados de un objeto. Valor por defecto [0 0 0].

-EmissiveColor: Luz emitida por un objeto. Valor por defecto [0 0 0].

-Shininess: Representa el brillo de la superficie de un objeto. Su rango es de 0 (superficie difusa sin brillo) a 1 (superficie altamente pulida). Valor por defecto 0,2

-Transparency: Transparencia de una superficie, 0 significa totalmente opaca y 1 completamente transparente. Valor por defecto 0.

GEOMETRIA

En lo que respecta a geometrías posibles hay que decir que Tonatiuh presenta una gran variedad de geometrías (cono, esfera, cilindro, rectángulo, disco parabólico...) además tiene una opción "*betzierpath*" con la que a partir de un archivo .txt Tonatiuh representa la forma geométrica.

4. Metodología

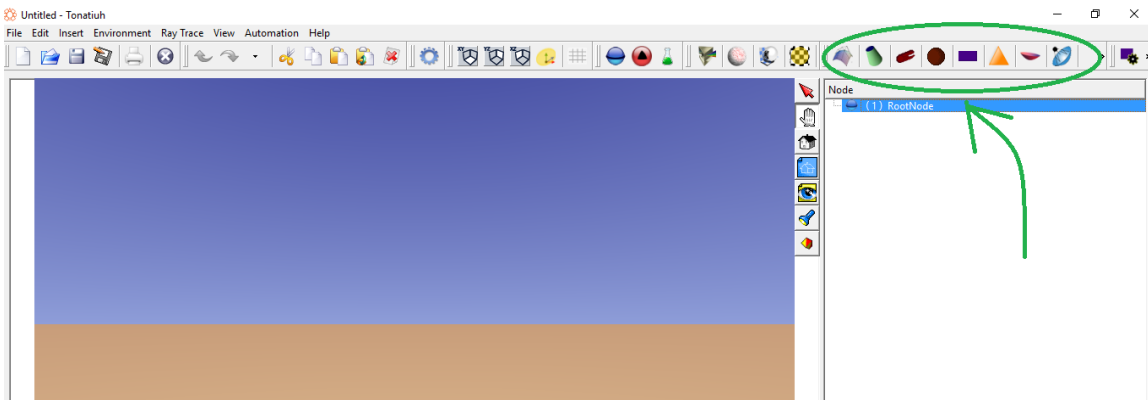


Figura 35. Formas geométricas en Tonatiuh

A la hora de crear una forma geométrica hay que saber que Tonatiuh trabaja con nodos. Cada componente del sistema está asociado a un nodo distinto denominado “*rootnode*” el cual una vez creado se le puede cambiar su nombre y sus coordenadas para situarlo en una posición determinada.

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

Figura 36. Comandos para establecer coordenadas

Una vez creado el *rootnode* hay que asociarle una geometría, para ello se recurre a otro tipo de nodo denominado *TShapeKit* el cual permite asociarle una geometría.

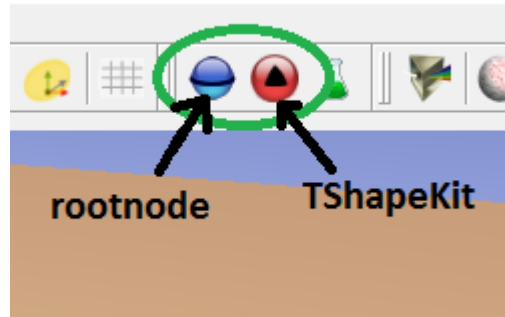


Figura 37. Tipos de nodos

Una vez seleccionado *TShapeKit* elegimos la geometría que queremos asignarle y nos saldrá una ventana de comandos para definir los parámetros que definen dicha geometría.

Parabolic_dish	
Parameter	Value
focusLength	0.125
dishMinRad...	0.1
dishMaxRad...	0.5
phiMax	6.2831855
activeSide	OUTSIDE

Figura 38. Parámetros para definir disco parabólico

Flat_disk	
Parameter	Value
radius	0.5
activeSide	FRONT

Figura 39. Parámetros para definir disco plano

Como se ve en las figuras anteriores, dependiendo del tipo de geometría elegida nos serán requeridos unos parámetros u otros para definir esta.

Una vez añadido el nodo *TShapeKit* se le puede asignar al material también unas características ópticas mediante la opción "*Specular Standard Material*" y "*Basic Refractive Material*".



Figura 40. Tipos de materiales

Una vez seleccionado el tipo de material nos aparecerá una ventana como la ilustrada en la figura 34 en la que seleccionaremos las propiedades ópticas.

4.1.2 SIMULACIÓN

Una vez descrito el sistema geométrica y ópticamente, se procede a la simulación. Para esto lo primero a realizar es la elección del número de rayos a lanzar en la casilla de opciones de trazado de rayo.

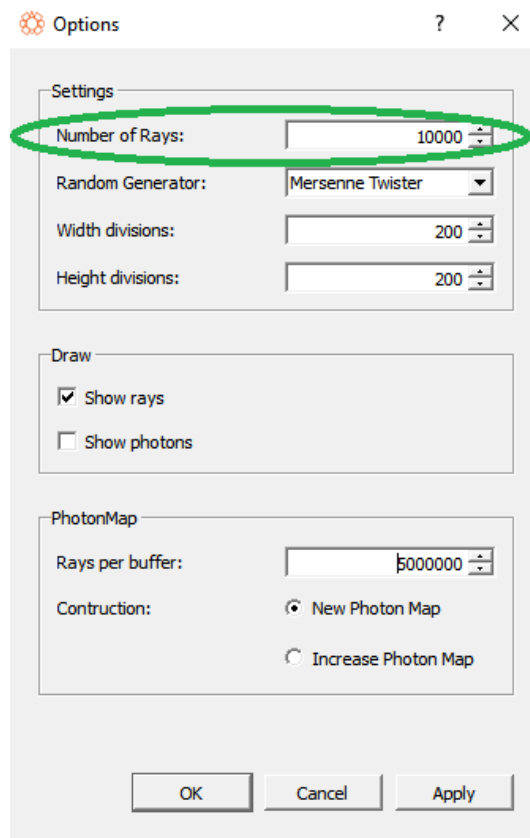


Figura 41. Opciones de trazado de rayos con Tonatiuh

Como se dijo anteriormente, al aumentar el número de rayos a lanzar disminuimos el error de los resultados considerablemente.

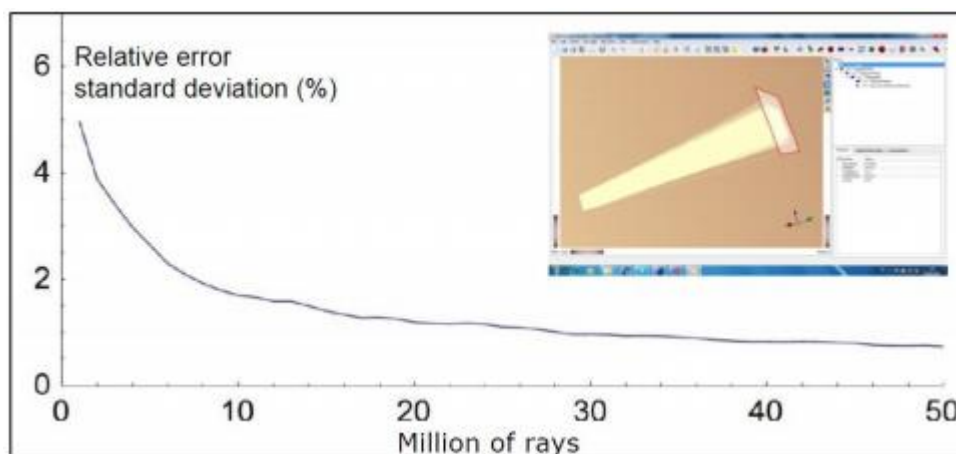


Figura 42. Evolución del error cometido al aumentar el número de rayos a lanzar

Seguido a esto, podemos elegir el tipo de almacenamiento del archivo que genera Tonatiuh eligiendo entre archivo binario o en base de datos SQL. Además elegimos la superficie que se desea analizar sobre la cual el programa proporcionará un “mapa de fotones” en el cual se indicara, el ID del fotón, la cara de impacto sobre la superficie, las coordenadas x, y, z y la energía de cada fotón.

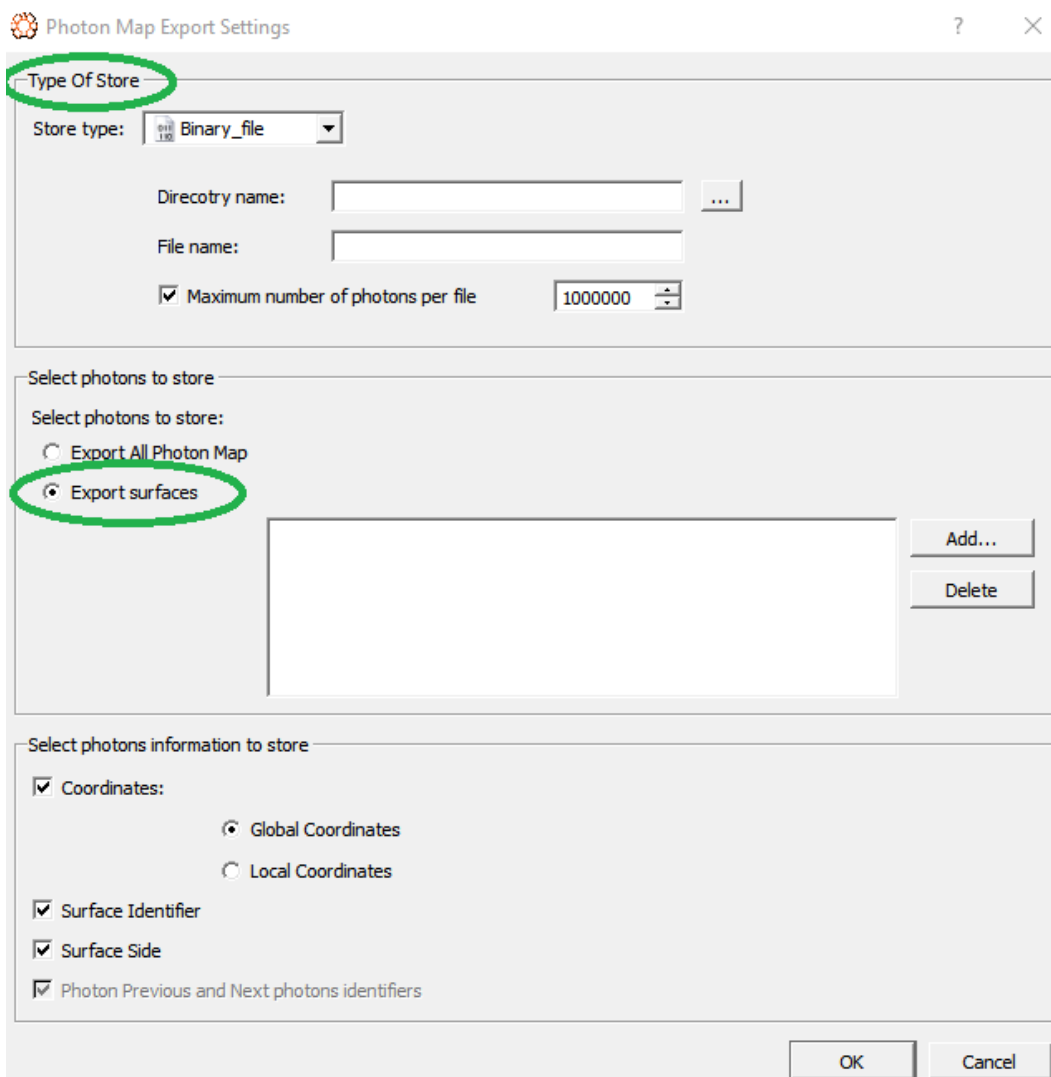


Figura 43. Elección del tipo de almacenamiento y superficie a exportar

Una vez concluido todo lo anterior Tonatiuh genera un archivo que será necesario procesar con Matlab o Mathematica mediante un código que generará mapas de densidades y gráficos en 3D

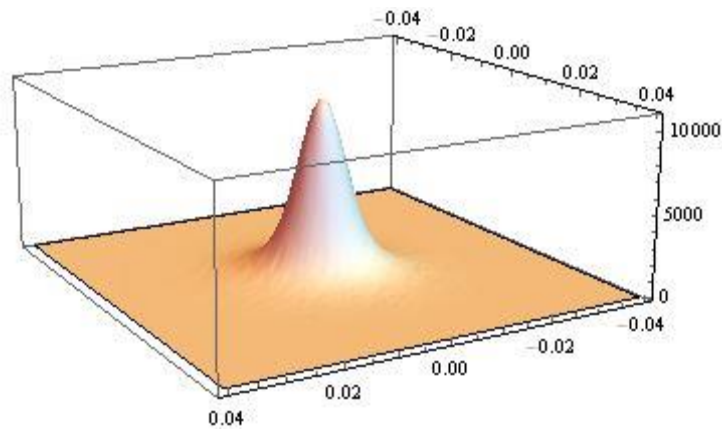


Figura 44. Representación 3D

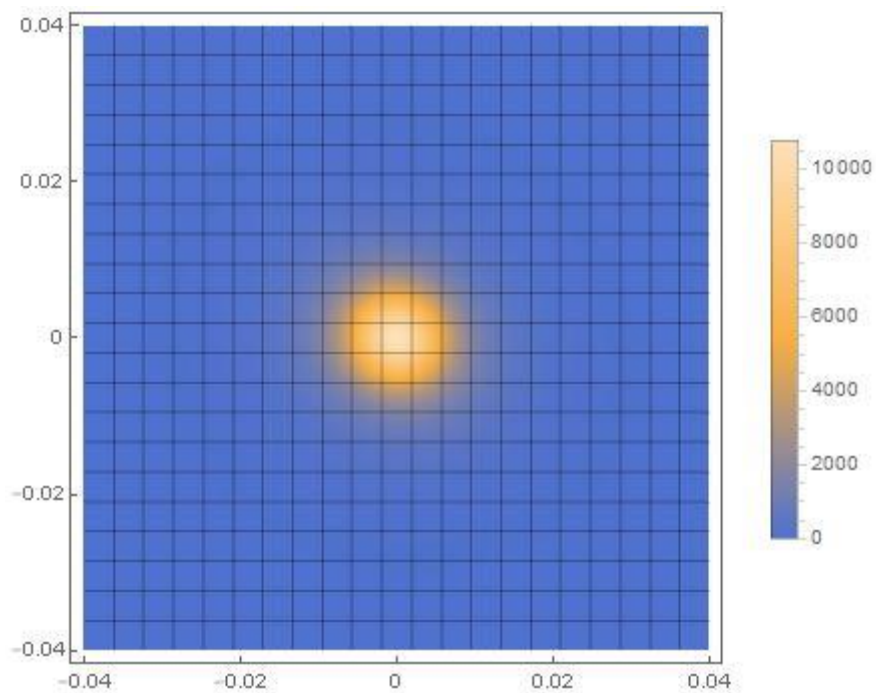


Figura 45. Mapa de densidades

4.2 DISEÑO DE HORNO SOLAR CON TONATIUH

Para el diseño de nuestro horno solar partimos de una antena parabólica Televés del modelo de foco centrado (FC-P180) de la que disponía el departamento. Una vez medida esta vimos que su diámetro era de 1800 mm por lo que buscando en la página

web de Televés encontramos las características técnicas de esta, más concretamente su distancia focal la cual resulta necesaria para definir el disco parabólico en Tonatiuh.

CARACTERISTICAS TECNICAS						
Referencia		7435	7434	9317	9316	9314
Diámetro (mm)		900	1200	1500	1800	2200
Ancho de banda (GHz)		10,75 a	10,75 a	10,75 a	10,75 a	10,75 a
		12,75	12,75	12,75	12,75	12,75
Ganancia a 11 GHz (dB)		39,0	41,5	43,1	44,8	46,5
Distancia focal (mm)		384	512	630	755	925
Espesor (mm)		2	2	2	3	3
Peso del sistema (Kg)		6,4	11,4	47,0	59,2	118,0

Figura 46. Características técnicas antenas Televés

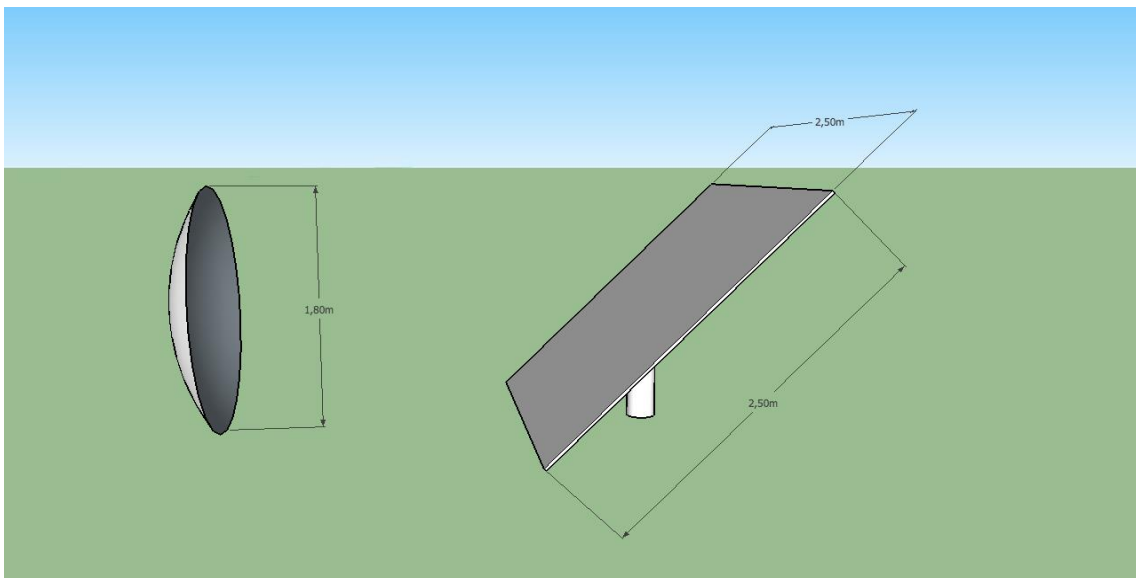


Figura 47. Boceto acotado del horno solar

Tras conocer las características geométricas de nuestro concentrador tratamos de calcular el área óptima de nuestro heliostato. Para ello realizamos un estudio en Tonatiuh para las condiciones extremase (solsticios y equinoccios) a la hora del medio día solar, en la cual el ángulo acimut es 180.

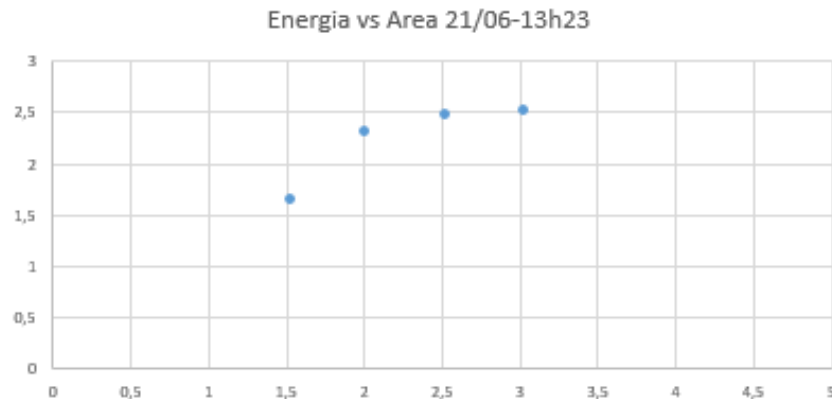


Figura 48. Curva Energía vs Área para solsticio de verano

El área del heliostato óptima resulto ser de $2,5 \text{ m}^2$ en el caso más extremo como se puede ver en la figura anterior (en los otros solsticios y equinoccios a partir de los 2 m^2 se estabilizaba la curva anterior).

La distancia del heliostato al concentrador la establecemos en 3,5m aunque no es un parámetro influyente ya que el haz de luz reflejado por el heliostato se refleja paralelo al eje óptico de este siempre.

Una vez disponemos de los datos anteriores procedemos a definir nuestro sistema en Tonatiuh.

4.2.1 FORMA SOLAR

Conocemos como forma solar la distribución angular de energía con respecto al rayo central saliente del centro del disco solar.

De entre los dos tipos de distribuciones posibles a elegir (PILLBOX o Buie), como se dijo antes la distribución PILLBOX consideraba una distribución energética constante en el rango angular.

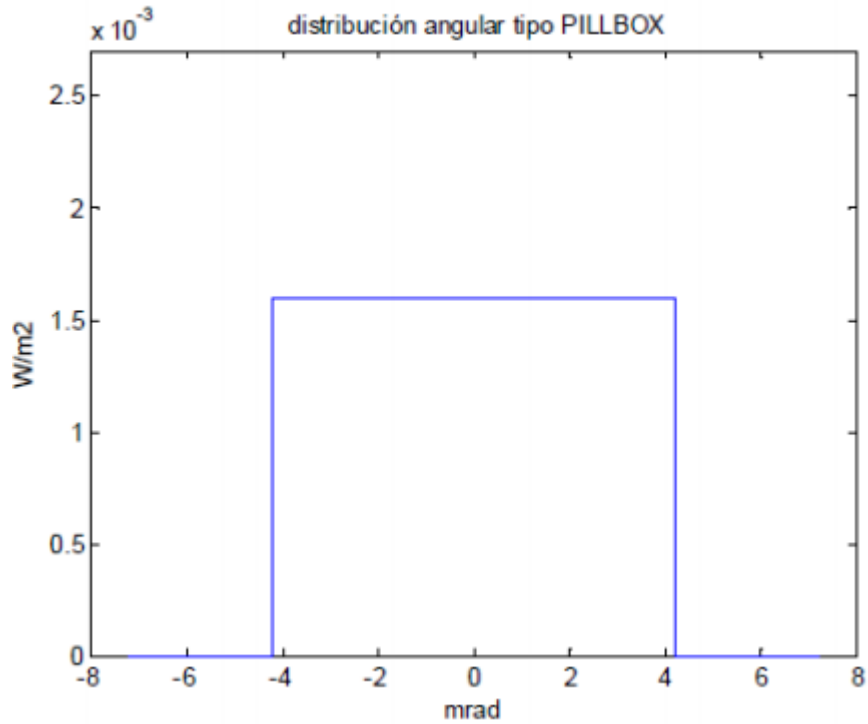


Figura 49. Distribución energética tipo PILLBOX

Elegimos la distribución Buie por representar una distribución energética más real, eligiendo como parámetros para definir esta una radiación normal directa de $1000 W/m^2$ y un CSR de 0,02.

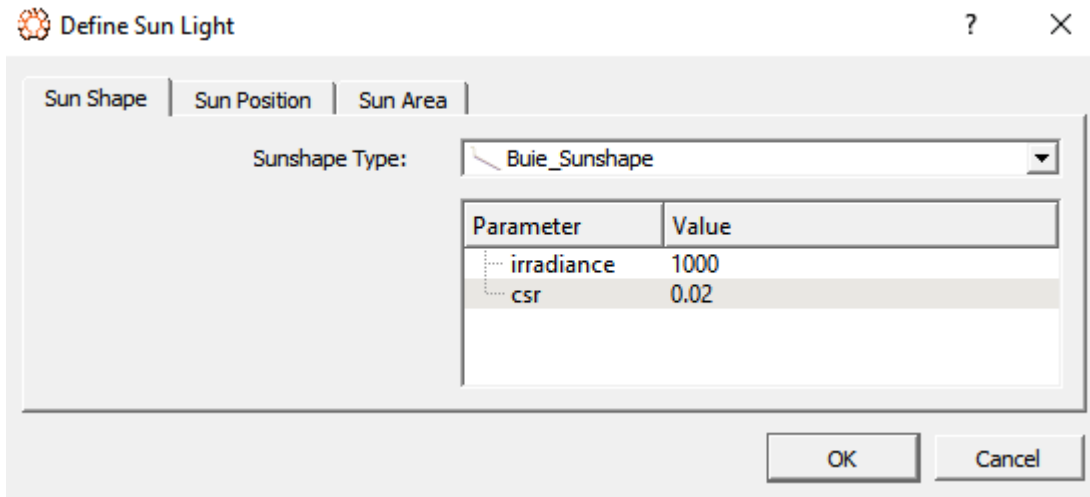


Figura 50. Definición de la forma solar para nuestro horno solar

4.2.2 DISEÑO DEL SISTEMA

Definiremos tres elementos:

- Heliostato:

Se trata de un espejo plano que refleja la radiación proveniente del sol hacia el concentrador parabólico. Definimos este con unas dimensiones de (2,5 x 2,5) m elegidas a partir del cálculo óptimo comentado anteriormente. Se selecciona también la cara interna como cara activa.

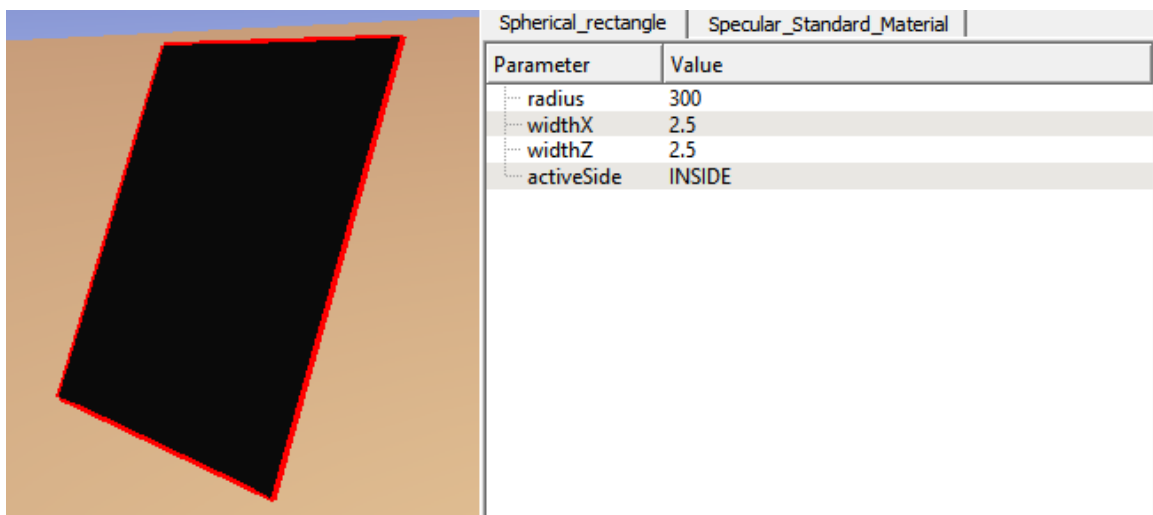


Figura 51. Heliostato en Tonatiuh

Para definir las características ópticas, se le agregara un nodo de “*Specular_Standard_Material*”. Se dejan los valores por defecto de todos los parámetros exceptuando:

-Reflectividad: Se fija en un 94%

-*Sigma_slope*: Como se dijo anteriormente este parámetro es resultado de la convolución de las distribuciones asociadas a los diferentes errores por lo que engloba los errores debidos a la pendiente y la falta de especularidad no teniendo en cuenta el error de seguimiento.

-La distribución elegida será la normal (práctica común en el análisis de sistemas de concentración solar).

Parameter	Value
m_reflectivity	0.94
m_sigmaSlo...	3
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

Figura 52. Propiedades ópticas heliostato

Además de todo esto para llevar el seguimiento del sol, ya que el concentrador se encontrará fijo en todo momento, se le instalara un *tracker* al heliostato que permitirá hacer esta función.

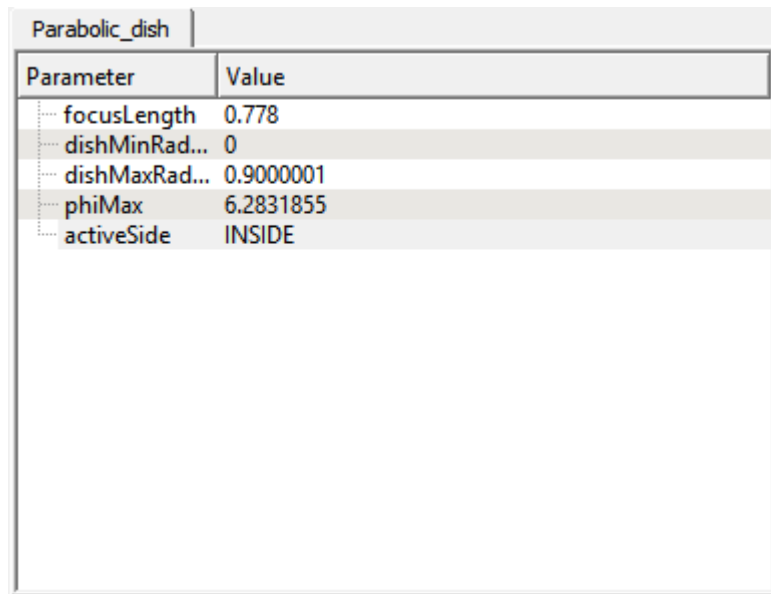
Para esto se creará un primer *rootnode* “HELIOSTATO” al cual se le asignaran las coordenadas donde situaremos el heliostato.

Dentro de este se colocara otro *rootnode* también llamado “heliostato” dentro del cual se colocaran el *tracker* y el *TShapeKit* que incluirá tanto las características geométricas como las ópticas.

A una distancia de 3m del heliostato situamos el siguiente elemento

- Concentrador:

Utilizaremos un concentrador con forma de disco parabólico que quedará definido por la distancia focal, radio mínimo y máximo, distancia focal y cara activa. Todos estos datos vienen impuestos ya que el concentrador a utilizar como se comentó anteriormente es una antena Televés de 1800 mm.



Parameter	Value
focusLength	0.778
dishMinRad...	0
dishMaxRad...	0.9000001
phiMax	6.2831855
activeSide	INSIDE

Figura 53. Características geométricas del concentrador parabólico.

Como se comentó en el apartado de componentes de un horno solar un concentrador parabólico es un cuerpo formado a partir de la revolución de una parábola. El parámetro *phiMax* representa los 360 grados de revolución que conforman el concentrador parabólico.

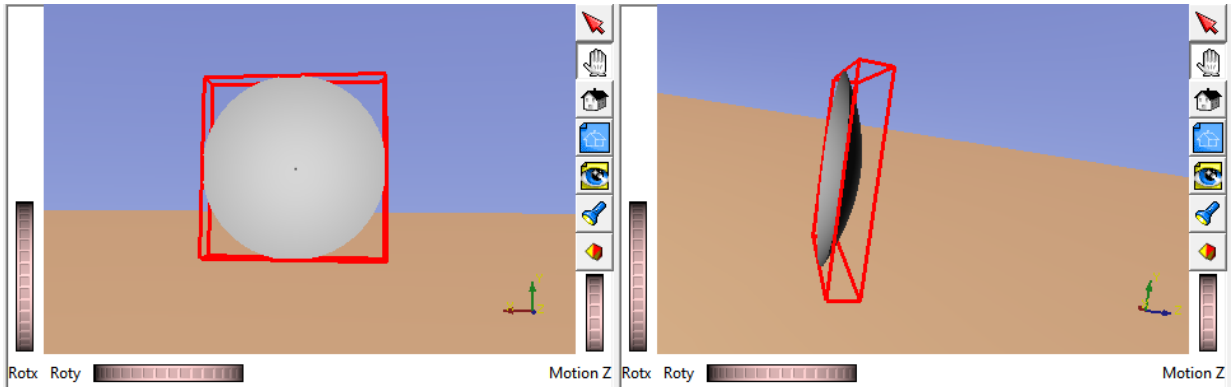


Figura 54. Concentrador parabólico en Tonatiuh

Respecto a las características ópticas se le impondrán las mismas que al heliostato: reflectividad 94%, sigma_slope 3 mrad, distribución normal y los demás valores por defecto.

Parameter	Value
m_reflectivity	0.94
m_sigmaSlo...	3
m_distributi...	NORMAL
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

Figura 55. Propiedades ópticas del concentrador parabólico

Posteriormente se analizará la sensibilidad de una variación en la componente azimutal y en la inclinación en un estudio realizado más adelante.

- Por último se diseña el punto receptor, lugar donde se concentrará finalmente toda la energía.

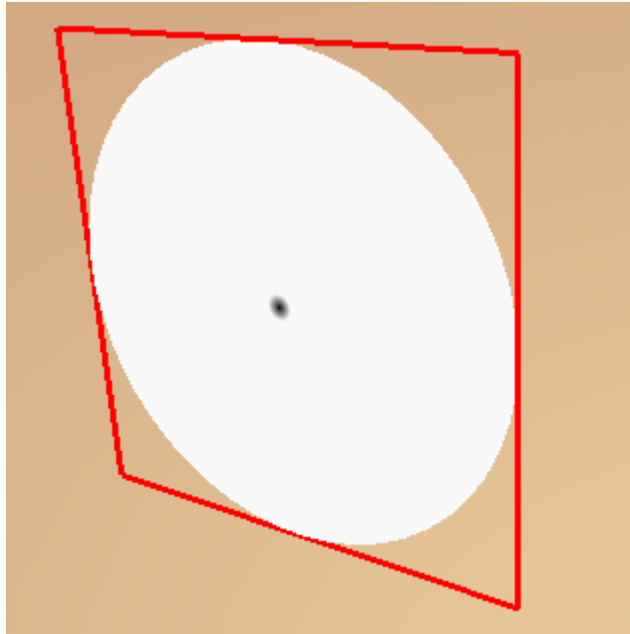


Figura 56. Receptor en Tonatiuh.

Se diseña este como un disco plano con un radio de 0.04m, valor óptimo para el cual se obtiene la máxima potencia en este punto.

Definimos *slant range* como la distancia desde el concentrador parabólico hasta el receptor, dándole a este el valor de 0.778 (valor de la distancia focal) que posteriormente variaremos en un análisis de sensibilidad.

Flat_disk		Specular_Standard_Material	
Parameter		Value	
radius		0.040001001	
activeSide		BACK	

Figura 57. Características geométricas del receptor

Para definir las propiedades ópticas se supone que el receptor no refleja nada fijando la reflectividad en 0, dejando el resto de parámetros igual que en el heliostato o concentrador (distribución normal, sigma slope 3 mrad y demás parámetros con valores por defecto).

Parameter	Value
m_reflectivity	0
m_sigmaSlo...	3
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

Figura 58. Propiedades ópticas del receptor

Finalmente tras diseñar elemento a elemento de nuestro sistema de horno solar en Tonatiuh queda así

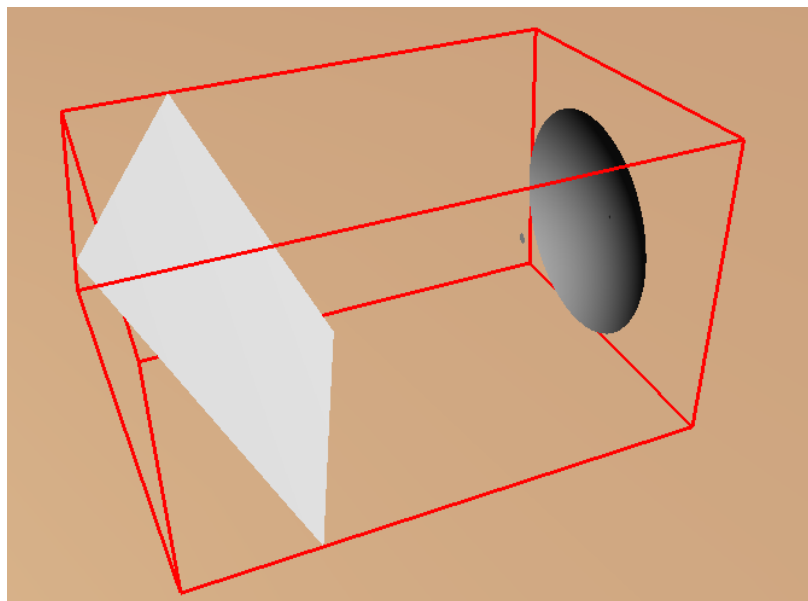


Figura 59. Horno solar en Tonatiuh

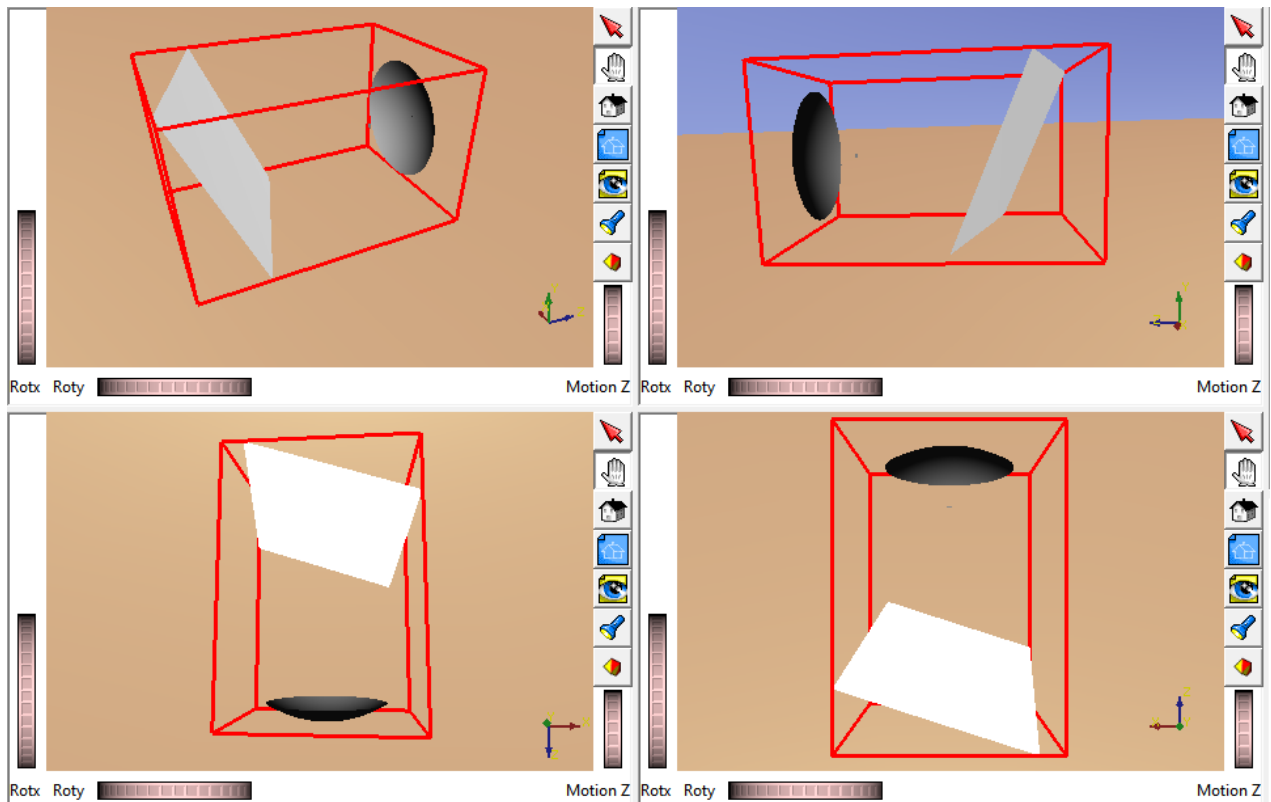


Figura 60. Diferentes vistas del horno solar diseñado con Tonatiuh

El conjunto de nodos quedaría finalmente de la siguiente forma:

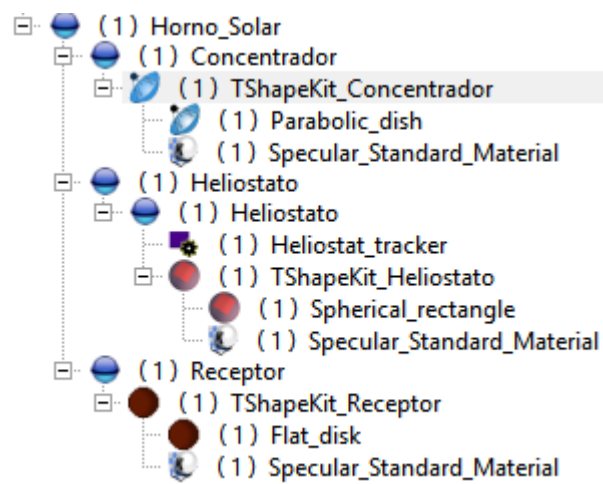


Figura 61. Desglose de nodos en Tonatiuh

4.2.3 SIMULACIÓN

Una vez definido el sistema por completo se procede a realizar la simulación con Tonatiuh. El número de rayos a lanzar elegido es de 75.000.000, límite del ordenador con el que se trabaja. Para este número de rayos el error se encuentra en torno a un 0.5%.

Además del número de rayos a lanzar se seleccionará la salida de Tonatiuh como archivo binario

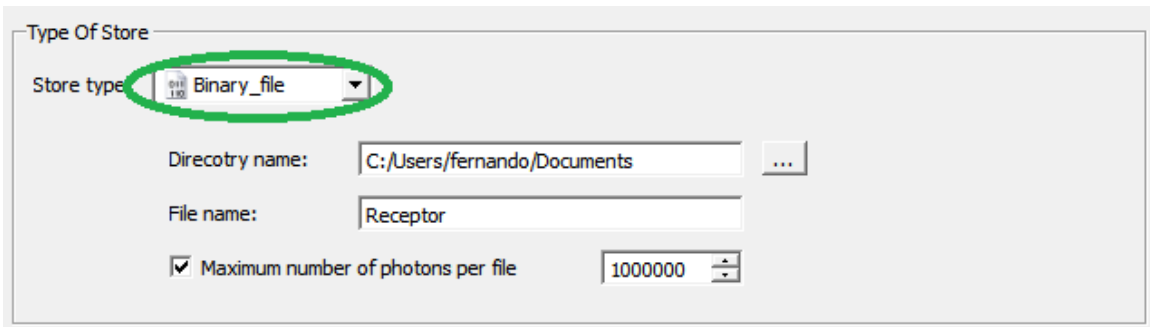


Figura 62. Almacenamiento en archivo binario

Y se elegirá el receptor como superficie sobre la que exportar el mapa de fotones

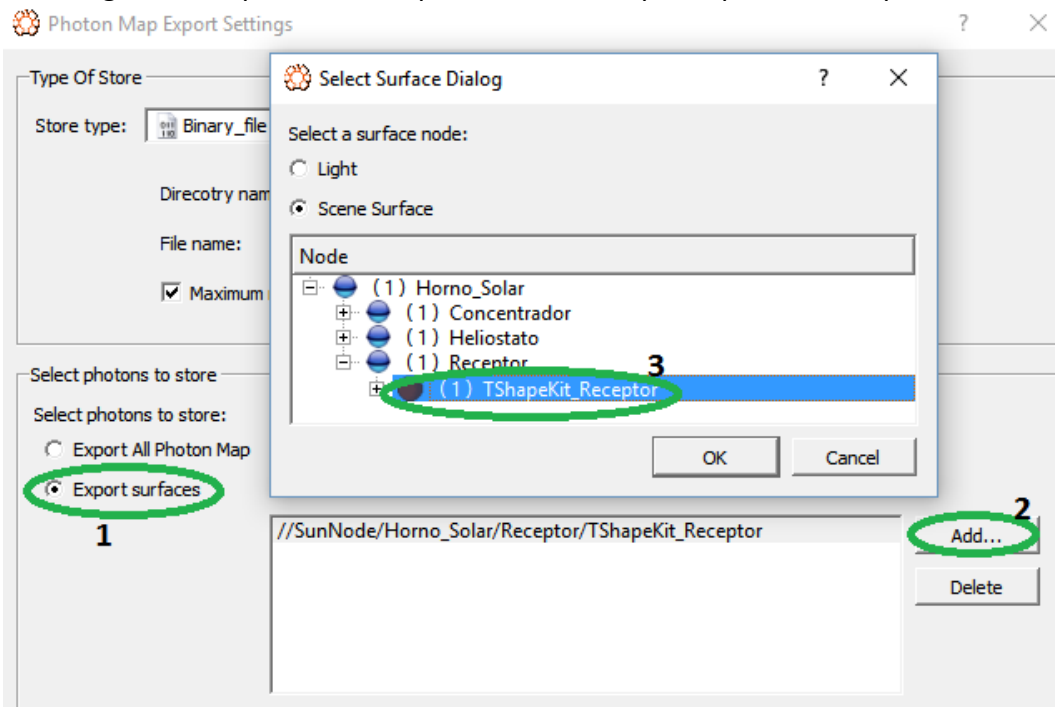


Figura 63. Selección de superficie para almacenar mapa de fotones

Finalmente se elegirán los parámetros de cada fotón a almacenar, seleccionando coordenadas locales (dan las coordenadas de cada fotón estableciendo el origen de coordenadas en la superficie elegida), deseleccionando la casilla “*Surface Identifier*” que viene seleccionada por defecto, y dejando seleccionadas las casillas “*Surface Side*” y “*Photon Previous and Next photons identifiers*” las cuales también vienen seleccionadas por defecto.

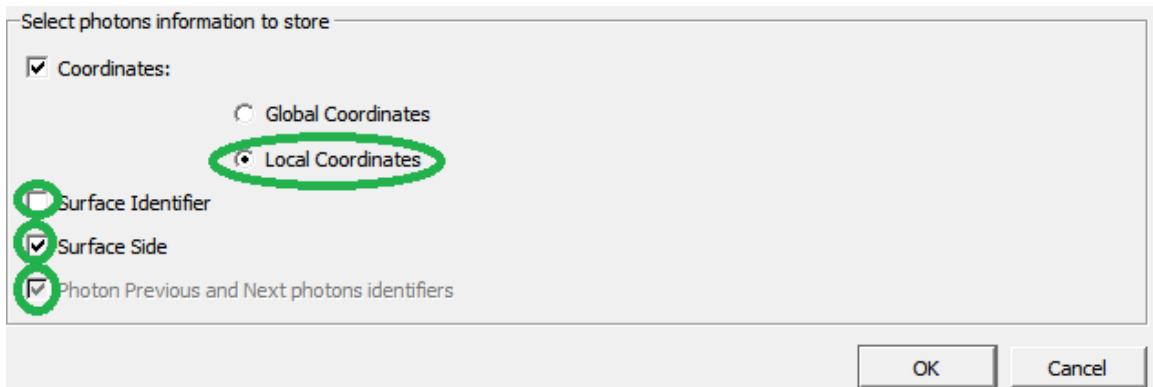


Figura 64. Información a almacenar tras la simulación con Tonatiuh

Después de todo esto se procede a la simulación tras la cual será necesario el procesamiento del archivo binario obtenido con un software matemático. En nuestro caso utilizaremos “*Mathematica*” con el cual crearemos un código que nos permitirá conocer la potencia obtenida en el receptor así como la representación de mapas de densidad de flujo, distribución de flujo y gráficos 3D.

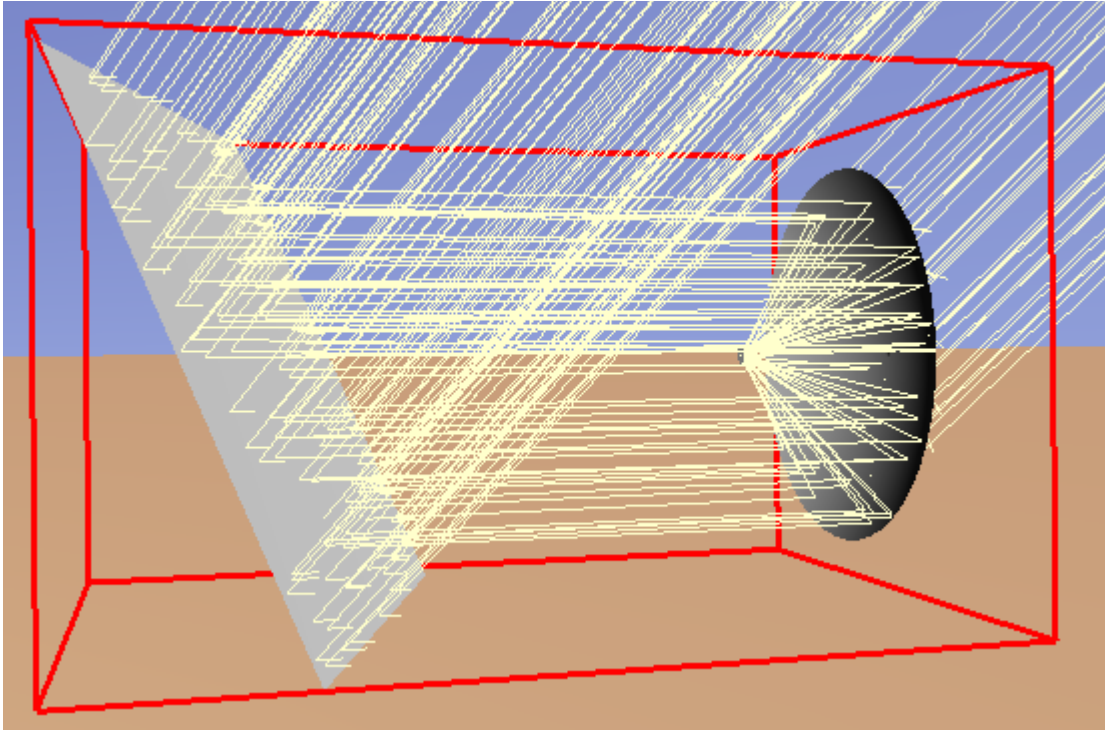


Figura 65. Interfaz de Tonatiuh tras el lanzamiento de rayos

5. RESULTADOS

En este apartado se busca la caracterización de la distribución del flujo radiante en el punto receptor y obtención de la potencia a obtener por nuestro horno solar. Para ello se necesita cuantificar la intensidad de la energía recibida.

La determinación de la distribución de flujo radiante es necesaria entre otros motivos para comprobar que no exista estrés térmico (exceso de temperatura en determinados puntos que provoca el desgaste).

POTENCIA OBTENIDA

Tras el diseño y su posterior simulación en Tonatiuh y procesamiento con Mathematica se comprueba como la potencia máxima obtenida en el receptor en las condiciones de medio día solar para una irradiancia solar de 1000 W/m^2 se encuentra en torno a 2,32 kW.

Una vez obtenida la potencia capaz de suministrar nuestro horno solar en el punto receptor, son realizados una serie de estudios de sensibilidad.

Los análisis de sensibilidad son necesarios ya que en la construcción del horno solar no habrá una precisión del 100% y debemos conocer los límites que provocan que se disparen las pérdidas

Por tanto será necesario conocer los límites de diseño que suponen que las pérdidas se disparen y nuestro modelo real se aleje del ideal diseñado.

Se realizan los siguientes análisis de sensibilidad:

1. Variación del slant range desde la distancia focal hasta $\pm 15\text{cm}$ con pasos de 5cm.
2. Variación del parámetro sigma slope $\pm 1\text{mrad}$
3. Variación de la inclinación $\theta = \frac{\pi}{2} \pm 0.035\text{rad}$ (2°)
4. Variación de la componente acimutal $\varphi = 0 \pm 0.035\text{rad}$ (2°)

1. Variación del slant range

En muchos hornos solares se coloca un atenuador formado por una serie de lamas que imitan una persiana veneciana e impiden el paso de toda la radiación solar.

Esto se realiza para ensayos en los cuales no se requiere la máxima potencia del horno solar sino una fracción de esta.

Con el atenuador se consigue variar la energía obtenida en el receptor mediante la regulación del flujo citada anteriormente.

En nuestro caso no dispondremos de atenuador, en su lugar nuestro punto receptor será móvil por lo que necesitaremos saber la potencia que se obtiene al variar el slant range.

El parámetro slant range se define como la distancia desde el concentrador hasta el punto donde se encuentra el receptor

Para este ensayo se ha ido variando este parámetro en (+15, +10, +5, -5, -10, -15) cm

Partimos de un **slant range = distancia focal (0,778cm)**

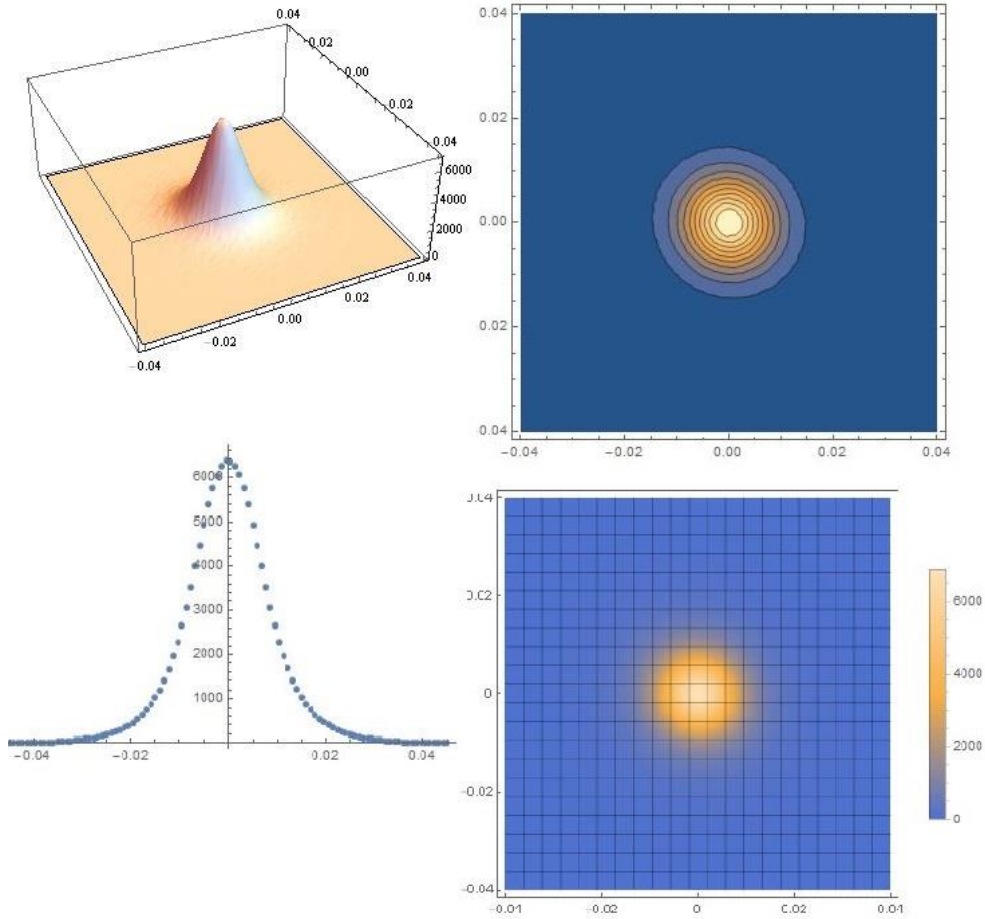


Figura 66. Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,778m

Para dicho valor del slant range se alcanza una potencia máxima en el receptor de 2,32kW obteniendo un perfil energético con forma de cono que denota una gran concentración en el punto central del receptor.

Pasamos a disminuir y aumentar el slant range progresivamente con un paso de 5cm

5. Resultados

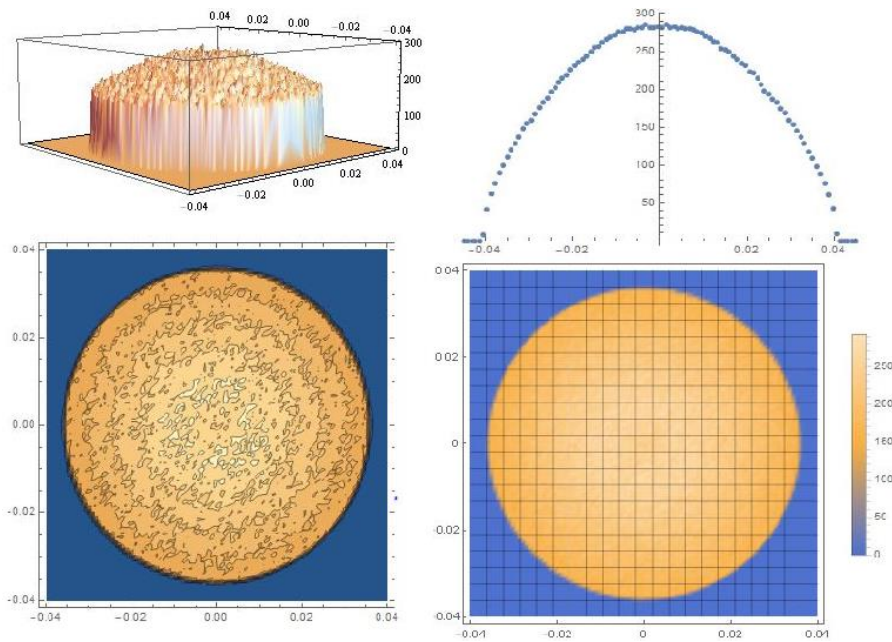


Figura 67. Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range =0,728m

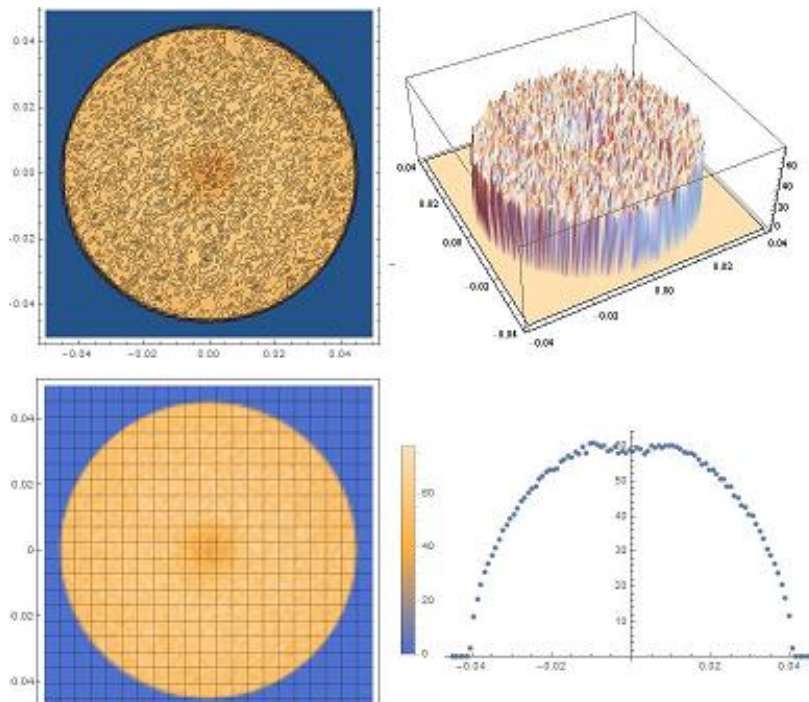


Figura 68. Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,678m

5. Resultados

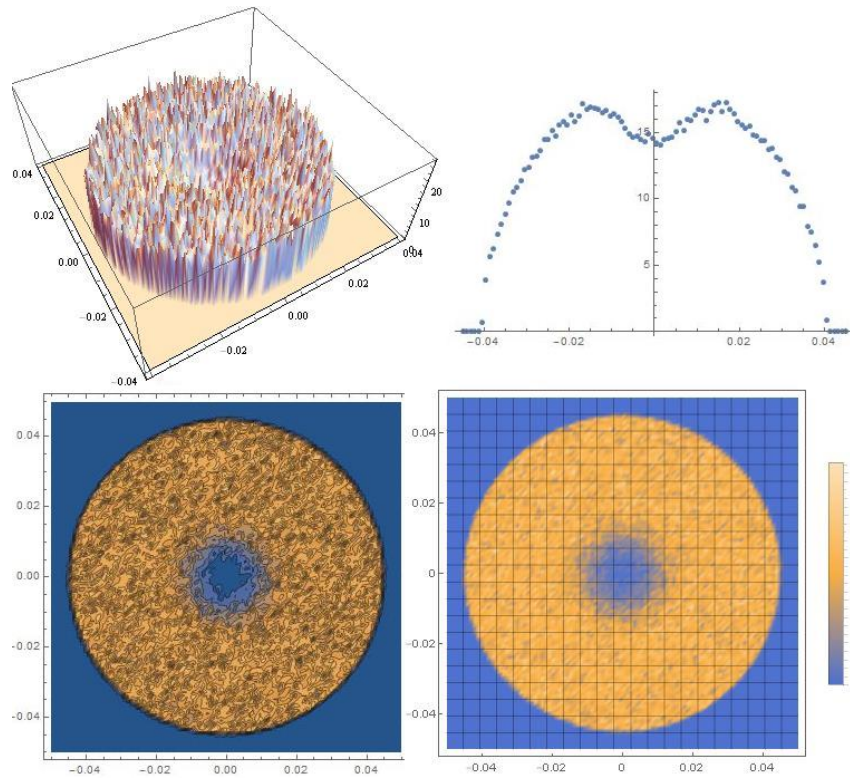


Figura 69. Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,628m

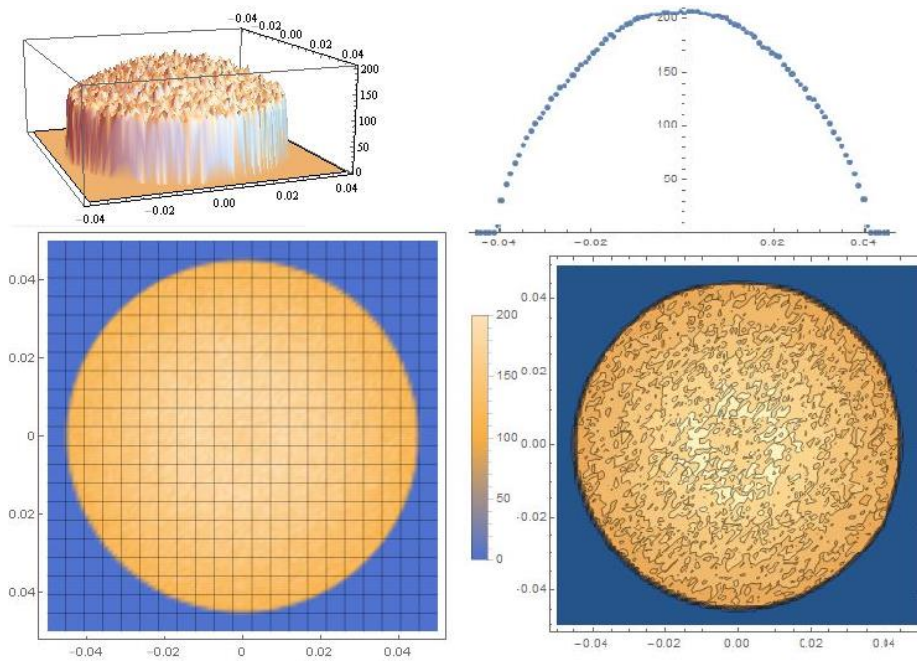


Figura 70. Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,828m

5. Resultados

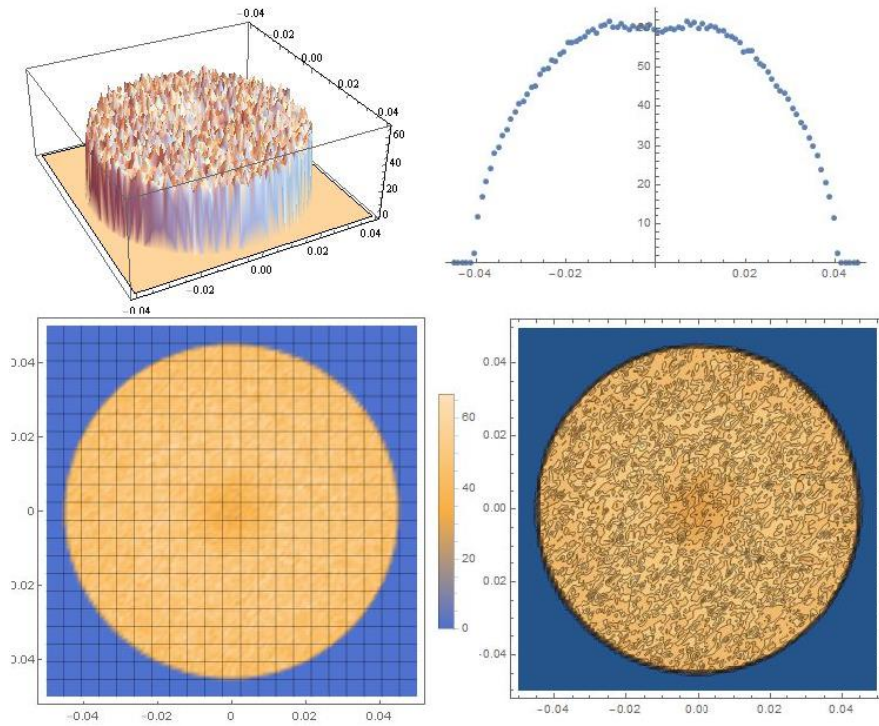


Figura 71. Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,878m

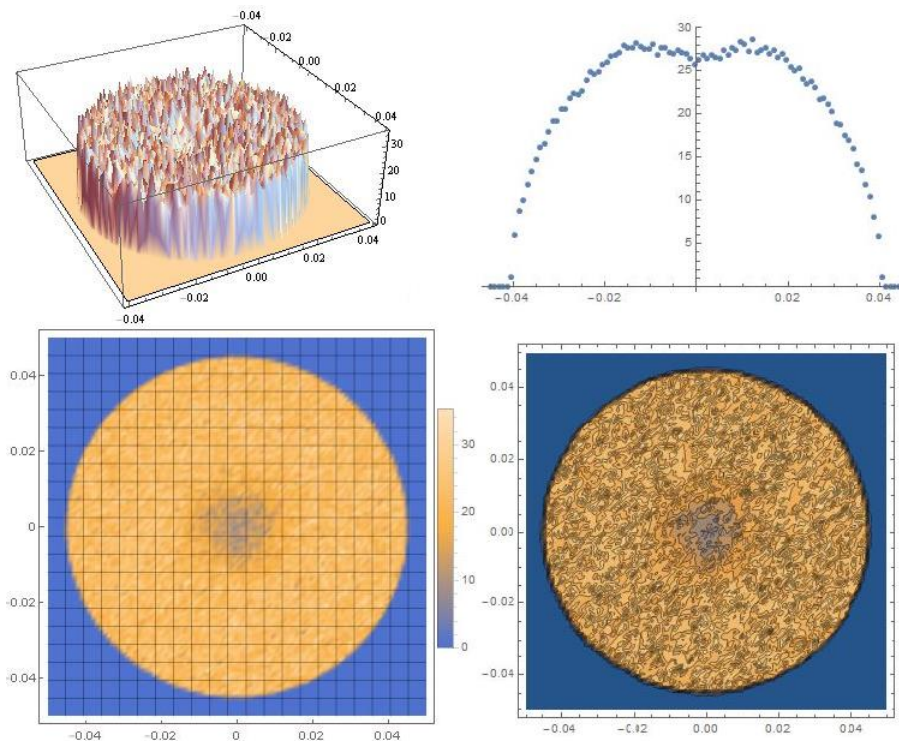


Figura 72. Distribución de flujo radiante en el receptor para un slant range = 0,928m

En las figuras anteriores se representan las distribuciones de flujo, y gráficos de contorno, densidad y 3D para los diferentes “slant ranges”.

Se puede observar como a medida que nos alejamos de la distancia focal la radiación obtenida en el receptor va siendo cada vez más difusa llegando a aparecer más radiación en la periferia del receptor que en el propio centro para valores muy alejados de esta distancia focal.

En la siguiente tabla se muestran además las distintas potencias obtenidas para cada ensayo donde se representa en azul el ensayo para la distancia focal y a ambos lados los ensayos variando esta distancia ya sea aumentándola o disminuyéndola.

Slant range(m)	0,628	0,678	0,728	0,778	0,828	0,878	0,928
Potencia(kW)	0,067	0,28	1,04	2,32	0,75	0,24	0,1

Tabla 2. Energía obtenida al variar el slant range

Podemos ver como a medida que se aumenta o disminuye el slant range la distribución de densidad de flujo va disminuyendo en receptor.

2. Variación de sigma slope

Como se dijo anteriormente este parámetro es resultado de la convolución de las distribuciones asociadas a los diferentes errores por lo que engloba los errores debidos a la falta de specularidad, los errores de pendiente y el error de seguimiento.

Tonatiuh en este parámetro no incluye el error de seguimiento.

Hay que tener en cuenta que a mayor error, más probable será que el rayo se desvíe de su trayectoria ideal creando una abertura del cono luminoso.

En este ensayo se analiza la variación de la radiación obtenida en el punto receptor al variar sigma slope desde 2mrad hasta 4 mrad.

5. Resultados

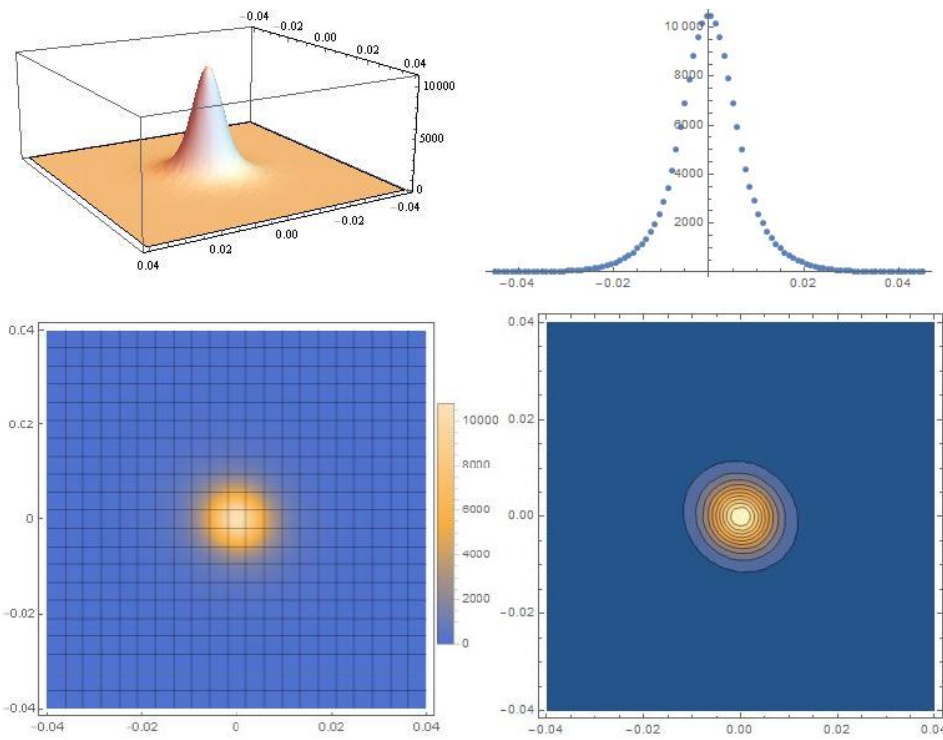


Figura 73. Distribución de flujo radiante en el receptor para un sigma slope = 2 mrad

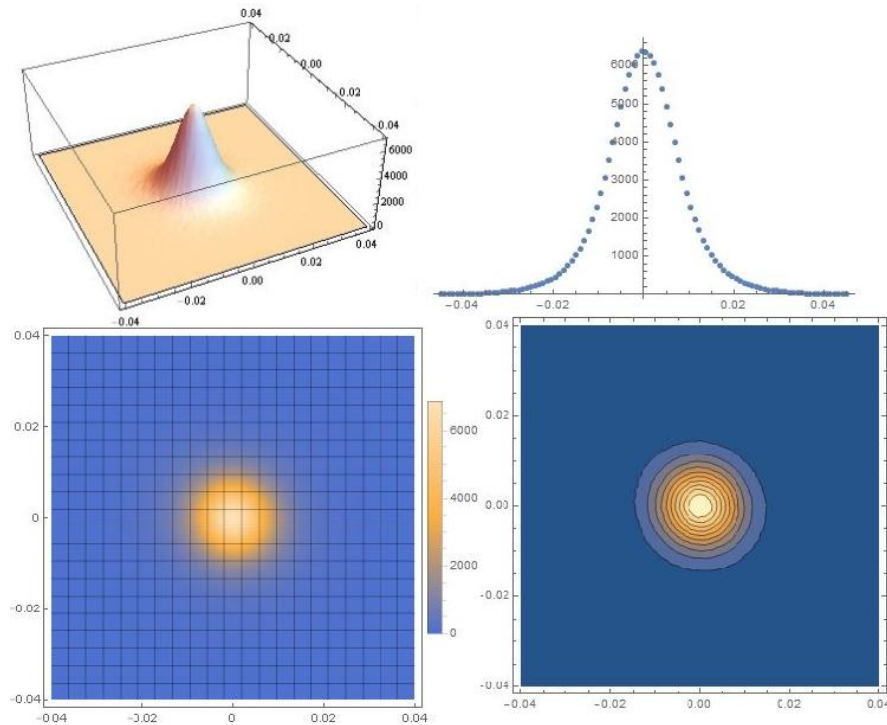


Figura 74. Distribución de flujo radiante en el receptor para un sigma slope = 3 mrad

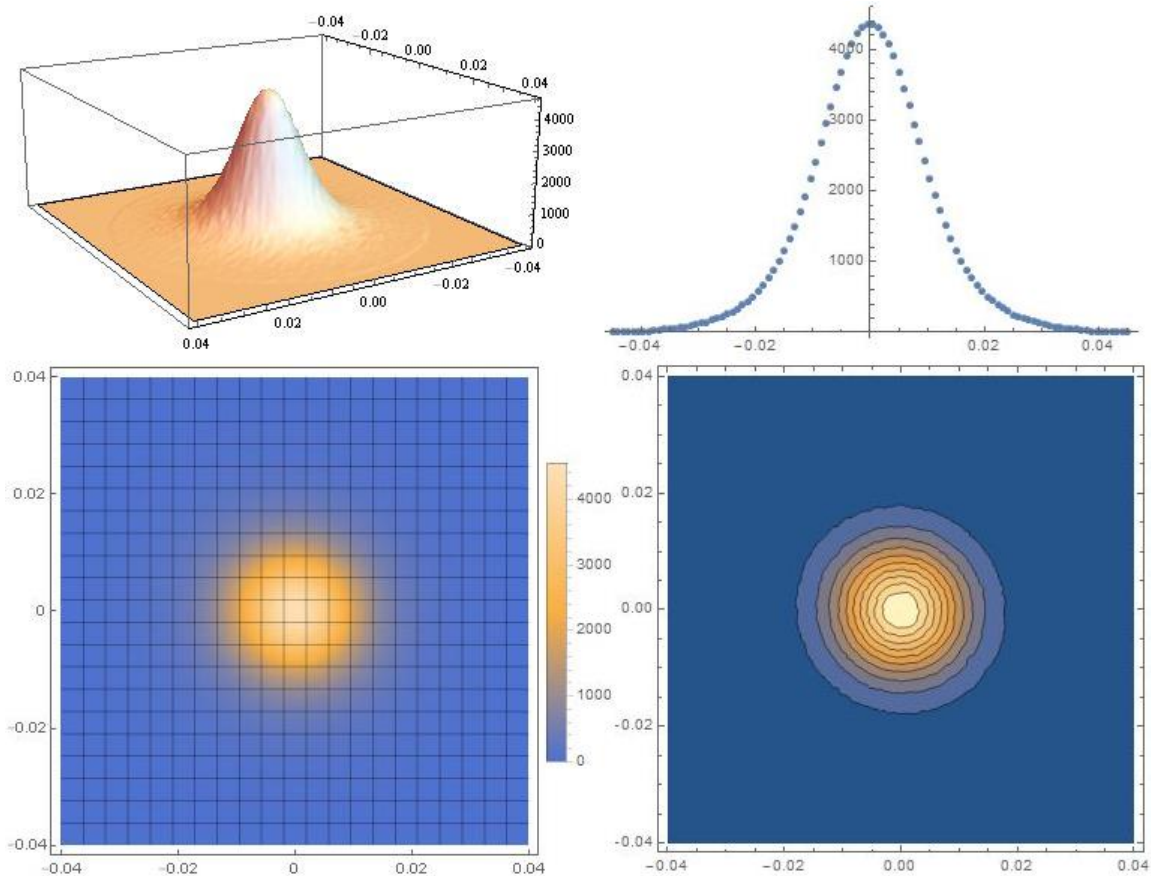


Figura 75. Distribución de flujo radiante en el receptor para un sigma slope = 4 mrad

La siguiente tabla recoge los valores de la potencia obtenida en los distintos ensayos al variar el parámetro sigma slope.

Sigma slope(mrad)	2	3	4
Potencia (kW)	2,34	2,32	2,29

Tabla 3. Energía obtenida en el receptor al variar sigma slope

Tras realizar este ensayo se puede observar como a medida que se va aumentando el error se obtiene algo menos de potencia pero la distribución energética en el receptor se vuelve más homogénea.

Hay que tener en cuenta la relación entre potencia y distribución homogénea ya que para valores bajos de sigma slope la potencia esta tan concentrada que generaría puntos de estrés térmico.

Debemos por tanto encontrar un equilibrio entre estos dos términos para obtener una potencia aceptable sin generar estrés térmico.

3. Variación de la inclinación

Todo diseño ideal acaba teniendo pequeños defectos, debemos saber cuáles son los límites que no podemos sobrepasar.

En lo que respecta a la inclinación, aunque nuestro diseño pretende construir un horno solar en el cual el concentrador se encuentra fijo formando 90 grados con la horizontal, es posible que se dé una pequeña desviación en la inclinación por fallos en la construcción.

El objetivo de este estudio es ver a partir de que fallo en la inclinación las pérdidas de potencia en el receptor empiezan a ser significativas.

Este tema tiene tanta importancia ya que al desviarse la normal x grados, la desviación del rayo reflejado es $2x$ por lo tanto las perdidas pueden ser bastante significativas para una desviación de la normal de apenas un grado como veremos a continuación.

El estudio se ha realizado variando la inclinación desde los 90 grados iniciales aumentando esta en (0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 2) y viendo la potencia obtenida en el receptor.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos

Ángulo theta(°)	2	1,75	1,5	1,25	1	0,75	0,5	0,25
Potencia Receptor(kW)	0,00423	0,0547	0,398	1,138	1,762	2,086	2,239	2,301

Tabla 4. Variación de la potencia al variar la inclinación

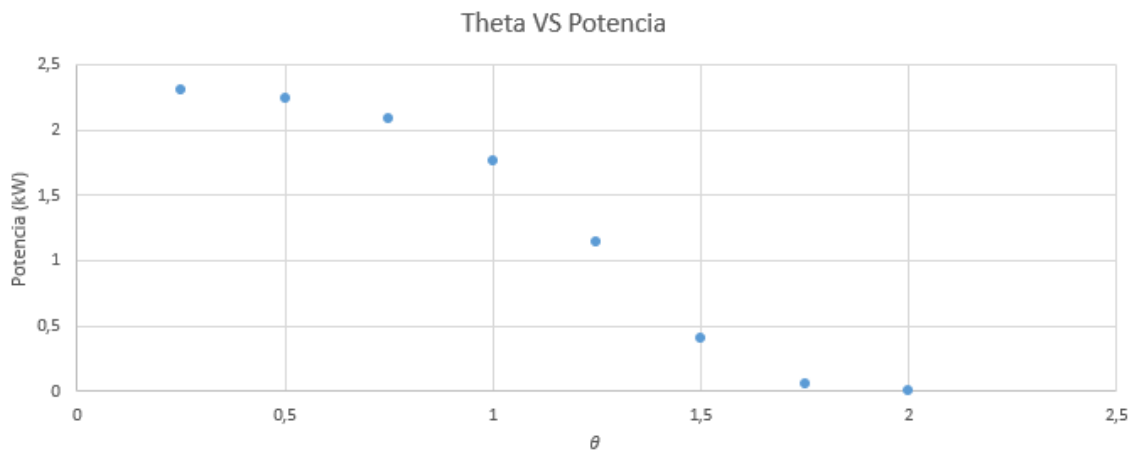


Figura 76. Relación potencia – inclinación

Como se puede ver, a partir de una inclinación de $0,75^\circ$ empieza a disminuir drásticamente la potencia obtenida en el receptor, ya que como se ha dicho antes, el ángulo de reflexión es el doble.

Debemos por tanto extremar la cautela al construir el concentrador de nuestro horno solar ya que como se acaba de ver, un mínimo fallo provoca un grave descenso de la potencia obtenida.

No se ha realizado este estudio para valores negativos de theta porque el comportamiento es simétrico para valores positivos y negativos.

Para facilitar el entendimiento del suceso, se muestran a continuación gráficos en 3D para distintos valores de theta donde se puede apreciar como el haz de luz reflejado al variar la inclinación “se sale” del punto receptor.

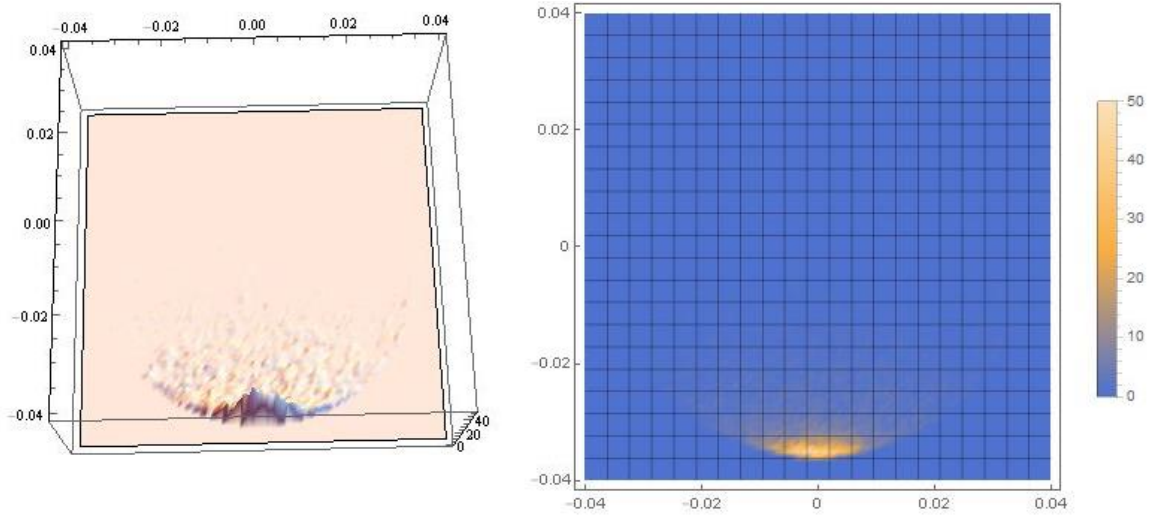


Figura 77. Distribución de flujo radiante en el receptor para Theta= 2°

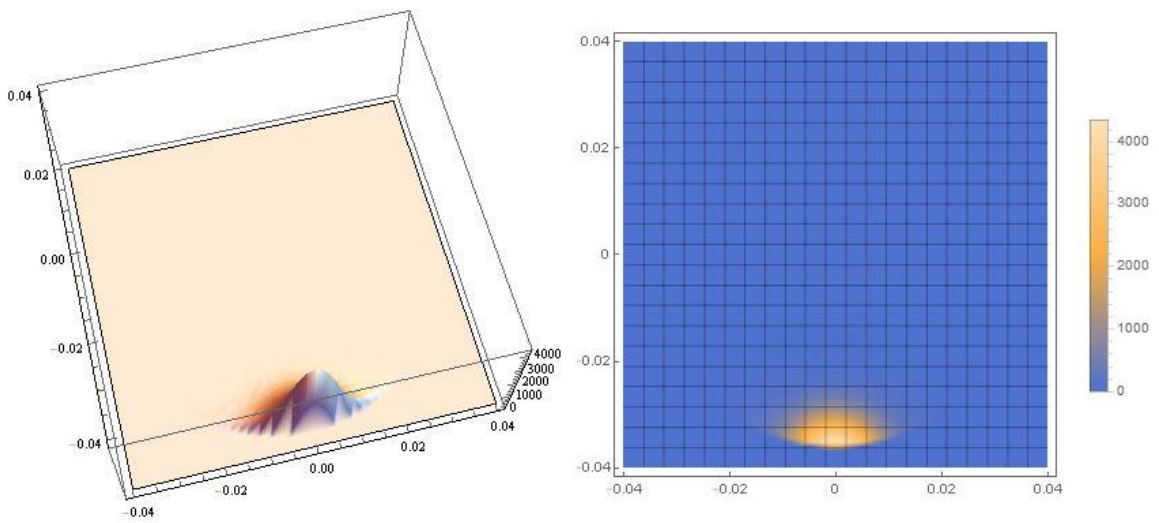


Figura 78. Distribución de flujo radiante en el receptor para Theta= 1,5°

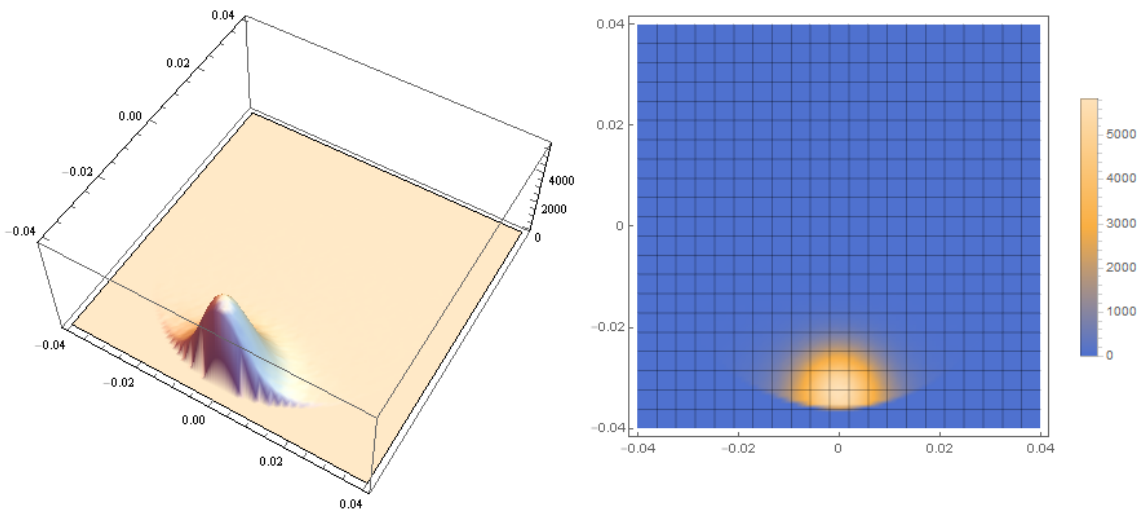


Figura 79. Distribución de flujo radiante en el receptor para Theta= 1.25°

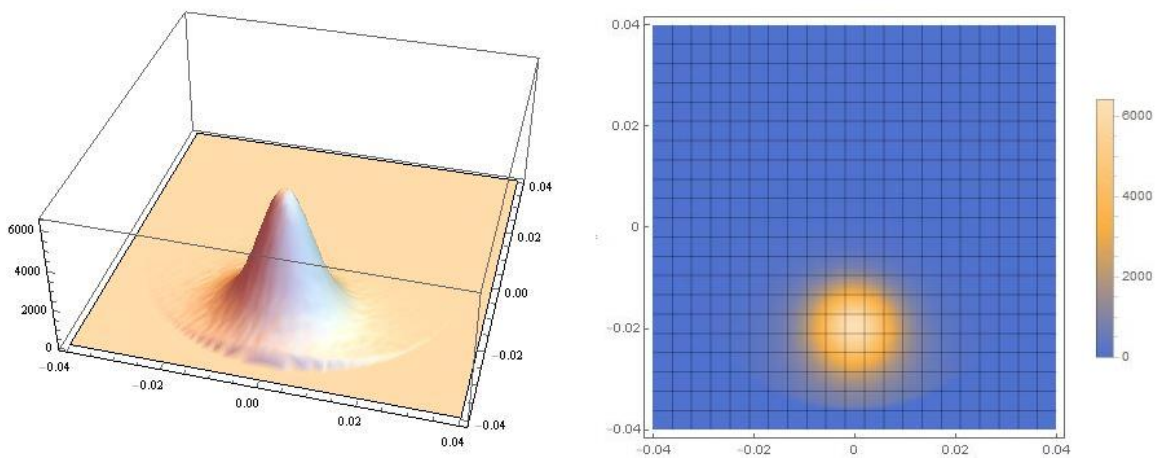


Figura 80. Distribución de flujo radiante en el receptor para Theta= 0.75°

4. Variación de la componente acimutal

Al igual que nos encontrábamos el problema de la variación en la inclinación respecto de la de diseño, pasa lo mismo con la componente acimutal.

Una variación mínima de esta puede provocar una disminución preocupante de la potencia obtenida como veremos a continuación.

El estudio se ha realizado variando la inclinación desde los 0 grados iniciales aumentando esta en (0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 2) y viendo la potencia obtenida en el receptor.

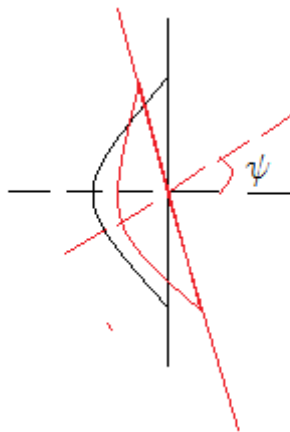


Figura 80. Representación de la variación de la componente acimutal

Como se explicó anteriormente al variar x grados la normal, el haz de rayos reflejados se desvían en $2x$ grados por lo que como veremos a continuación con una mínima variación se provoca una disminución drástica de la potencia obtenida.

La siguiente tabla recoge los datos de los ensayos realizados expresando la variación ensayada y la potencia obtenida para dicha variación.

Ángulo phi (°)	2	1,5	1,25	1	0,75	0,5	0,25
Potencia en receptor(kW)	0,0039	0,3890	1,1284	1,7612	2,0925	2,2440	2,3032

Tabla 5. Variación de la potencia con la componente acimutal

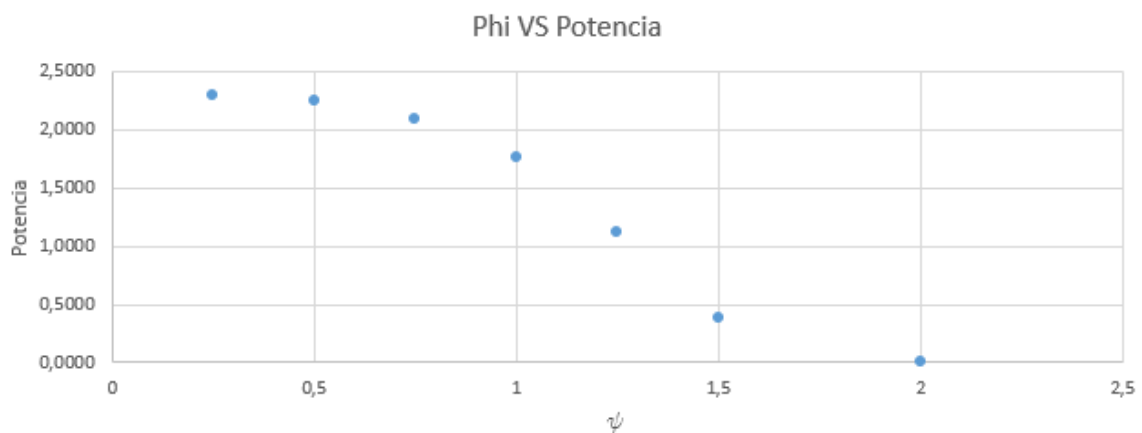


Figura 82. Relación potencia – componente acimutal

Se puede ver como el comportamiento es prácticamente idéntico al de la variación de la inclinación.

Para un valor de 0.75° se produce el inicio del descenso drástico de la potencia hasta llegados a los valores de $\psi = 2^\circ$ alcanzar una potencia prácticamente nula.

Al igual que con la inclinación, no se ha realizado este estudio para valores negativos de phi porque el comportamiento es simétrico para valores positivos y negativos.

Para facilitar el entendimiento del suceso, se muestran a continuación gráficos en 3D para distintos valores de phi donde se puede apreciar como el haz de luz reflejado al variar la inclinación “se sale” del punto receptor.

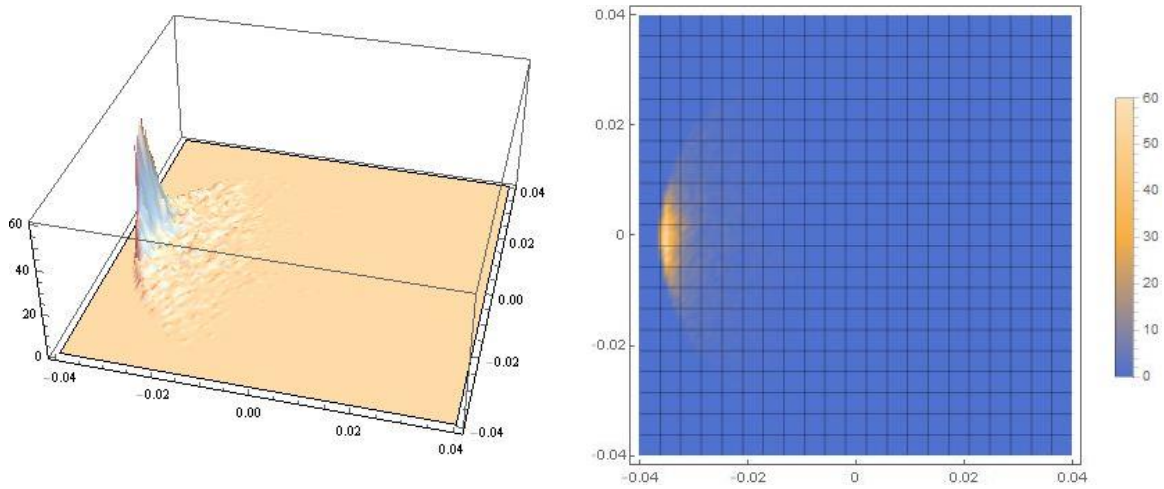


Figura 83. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Phi = 2^\circ$

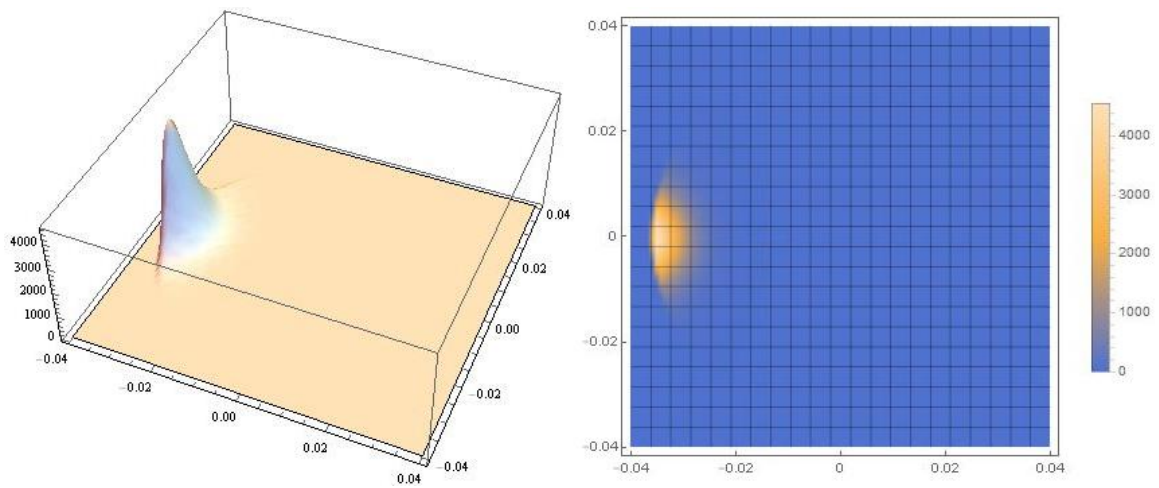


Figura 84. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Phi = 1.5^\circ$

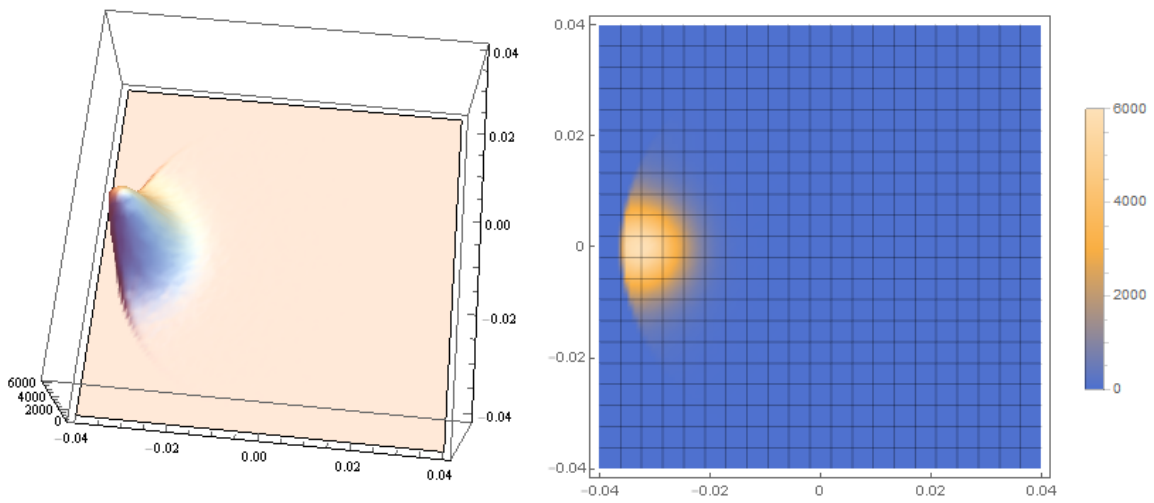


Figura 85. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Phi = 1.25^\circ$

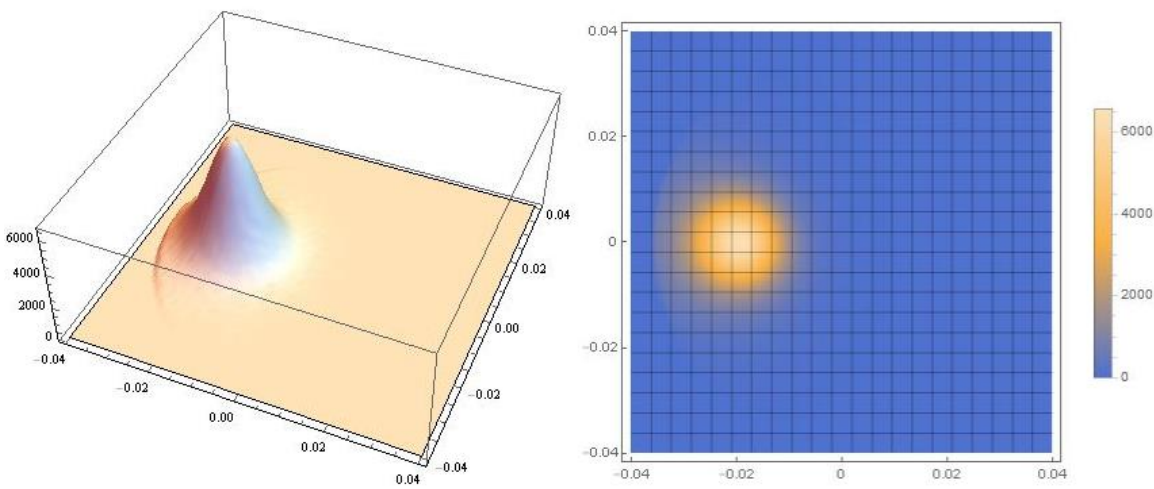


Figura 86. Distribución de flujo radiante en el receptor para $\Phi = 0.75^\circ$

En resumen, el estudio se ha realizado considerando:

- Condiciones solares:
 - Mediodía solar
 - Una irradiación solar de 1000 W/m^2
- Geometría:

Las geometrías de los componentes de nuestro horno solar vienen reflejadas en las siguientes tablas.

Geometría del heliostato

Altura	2,5 m
Anchura	2,5 m

Tabla 6. Geometría del heliostato

Geometría del concentrador parabólico

Distancia focal	0,778 m
Diámetro máximo	1,8 m
Diámetro mínimo	0 m

Tabla 7. Geometría del concentrador parabólico

Para el receptor se ha supuesto un disco plano de 8 cm de diámetro, esta medida se ha elegido tras realizar distintas simulaciones para obtener la máxima potencia.

Si el diámetro era mayor de este valor, el bloqueo que el receptor producía en el flujo que iba hacia el concentrador proveniente del heliostato causaba una disminución de la potencia obtenida, por el contrario si era menor no captaba todo el flujo proveniente del concentrador por lo que también disminuía la potencia obtenida.

Con todo lo anterior, como se ha especificado anteriormente se ha obtenido una potencia de 2.32 kW y un ratio de concentración de 458

6. CONCLUSIONES

El presente documento busca el análisis de un sistema de horno solar de cara a la obtención de la máxima potencia a conseguir en el receptor y un análisis de sensibilidad de diversos parámetros.

Partiendo de su diseño utilizando un programa de trazado de rayos con el cual se logra el cálculo de la distribución de flujo hasta el posterior procesamiento con un software matemático para la cuantificación de esta distribución de flujo.

Se concluye también que tras el diseño y posterior procesamiento se comprueba, como ya se ha comentado en el apartado anterior, que la potencia obtenida en el receptor para las condiciones de mediodía solar y una irradiancia solar de 1000 W/m^2 se encuentra en torno a los 2,32 kW.

Además en lo que respecta a los análisis de sensibilidad como se ha visto en el anterior apartado de resultados cabría comentar lo siguiente:

1. La sensibilidad del slant range es bastante alta ya que con alejarte tan solo 4 cm de la distancia focal la potencia obtenida en el receptor pasa de 2,32 kW a ser alrededor de 1 kW (43%).
Podemos decir que se trata de un descenso de la potencia exponencial al aumentar la distancia ya que si aumentamos otros 5 cm el slant range esta pasa a ser de en torno a 0,3 kW (13%) siendo prácticamente nula al aumentar otros 5 cm el slant range.
2. En lo que al término de errores se refiere (sigma slope), se comprueba como al variar este parámetro de menos a más pasando de valores de 2mrad a valores de 4mrad la variación de potencia no es significativa sin embargo si lo es la distribución de flujo obtenida en el receptor.
Siendo mucho más homogénea para los valores altos de sigma slope podemos concluir que es necesario buscar un equilibrio.
Esto se refiere a que para valores bajos de sigma slope aunque la potencia sea un poco más alta la concentración de la radiación puede causar puntos de estrés térmico lo cual es conveniente evitar.
3. Por otro lado en el análisis de la variación de la inclinación, análisis importante ya que por defectos de construcción es posible que no se dé la inclinación ideal de diseño.
Tras este análisis se comprueba el poco margen de error disponible, quedando clara la necesaria precisión ya que al sobrepasar la inclinación los $0,75^\circ$ comienza

a descender drásticamente la potencia obtenida siendo esta prácticamente nula para un exceso en la inclinación de 2° .

4. Por último, se da el análisis de la componente acimutal del concentrador, siendo el resultado de este análisis muy similar al anterior.

Se comprueba como al igual que en el caso anterior al excederse la componente acimutal en $0,75^\circ$ comienza a descender drásticamente la potencia obtenida siendo esta prácticamente nula para un exceso de 2° .

Queda claro tras la realización de este proyecto la importancia en la precisión a la hora de construir un horno solar ya que como anteriormente se ha visto, cualquier mínima variación en un parámetro geométrico conlleva un descenso drástico de la potencia obtenida en el receptor.

Señalar en último lugar que desde mi ámbito académico este trabajo ha servido para formarme en potentes herramientas como son los simuladores de trazado de rayos además de profundizar en el conocimiento de los sistemas de concentración en general y de los hornos solares en particular.

REFERENCIAS

- [1] DLR, "High-Flux Solar Furnace Xenon High-Flux Solar Simulator Customer Information."
- [2] J. Rodriguez, I. Cañadas, and E. Zarza, "PSA vertical axis solar furnace SF5," *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1511–1522, 2013.
- [3] J. Rodriguez, I. Cañadas, and E. Zarza, "New PSA high concentration solar furnace SF40," vol. 070028, p. 070028, 2016.
- [4] J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, "THE SOLAR FURNACES FOR SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL INVESTIGATION," *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, vol. 1, pp. 757–760, 2015.
- [5] A. Wong, P. Macosko, and B. Columbia, "Refractive Solar Secondary Concentrators Applications," no. July, 1999.
- [6] N. Facilities, "High-Flux Solar Furnace."
- [7] "Energías renovables."
<http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2008/06>. Acceso Junio 2016
- [8] G. Zabalza, "Proyecto Curso Fundamentos de Energía Solar Térmica Proyecto de Generación Energía con Disco Parabólico - Stirling," pp. 12–20, 2010.
- [9] J. E. Silva, "Implementación De Equipo Concentrador Solar," 2005.
- [10] A. A. I. Medina, "DISEÑO DE UN CONCENTRADOR STIRLING," pp. 1–55, 2014.
- [11] R. B. Stine, William B., Diver, "A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology. Sandia National Laboratories Technical Library. SAND93-7026 UC-236."
- [12] "eurodish @ www.psa.es." . Acceso Junio 2016
- [13] D. P. W. Schiel, "Stirling, Eurodish," 2001.
- [14] C. E. Bingham, K. L. Scholl, and A. A. Lewandowski, "Flux Attenuatio High-Flux Solar t NREL ' s ce," no. October 1994, 1995.
- [15] S. Furnace, "Volume XIX," vol. XIX, pp. 13–16, 1956.
- [16] CNRS, "Solar Energy Laboratory P.O. Box 5 ODEILLO." .
- [17] "Uzbekistan Academy of Sciences." p.
http://academy.uz/en/objects/akn.php?ELEMENT_ID=23. Acceso Junio 2016
- [18] H.-G. Dibowski, "High-Flux Solar Furnace and Xenon-High-Flux Solar Simulator," vol. 121, no. 1, 2014.
- [19] DLR, "www.dlr.de 'Solar Furnace.'" . Acceso Junio 2016
- [20] P. Id, G. S. Duncan, M. Engineering, M. Engineering, S. S. Nudehi, M. Engineering, E. Engineering, M. Engineering, M. Engineering, T. Sciences, H. Temperature, S. Chemistry, S. Fulbright, H. Temperature, Y. Award, C. Foundation, D. Blood, M. Engineering, L. J. Venstrom, M. E. Luke, M. Engineering, T. Cities, M. Engineering, and N. S. Founda-, "Student Development of a Five kW Solar Furnace for Solar

Referencias

- Thermal Chemistry Research Student Development of a Five kW Solar Furnace for Solar Thermal Chemistry Research,” 2015.
- [21] Sandia, “National Solar Thermal Test Facility.” p. <http://energy.sandia.gov/energy/renewable-energy/s>. Acceso Junio 2016
- [22] “sf60 @ www.psa.es.” p. <http://www.psa.es/en/instalaciones/hornos/sf60.php>. Acceso Junio 2016
- [23] “sf40 @ www.psa.es.” p. <http://www.psa.es/en/instalaciones/hornos/sf40.php>. Acceso Junio 2016
- [24] “sf5 @ www.psa.es.” . Acceso Junio 2016
- [25] C. K. Ho, “Software and Codes for Analysis of Concentrating Solar Power Technologies,” *Sandia Natl. Lab. Rep. SAND2008-8053*, no. December, pp. 1–35, 2008.
- [26] V. J. Romero, “A Software Package for Facilitated Optical Analysis of 3-D Distributed Solar Energy Concentrators,” *Sandia Rep.*, vol. 46, 1994.
- [27] A. Ratzel and B. Boughton, “CIRCE. 001: A computer code for analysis of point-focus concentrators with flat targets,” no. February, 1987.
- [28] “soltrace @ www.nrel.gov.” . Acceso Junio 2016
- [29] D. Buie and A. G. Imenes, “A Solar and vector class for the optical simulation of solar concentrating systems,” *Proc. ISES Sol. World Congr. Gothenburg, Sweden*, vol. 61, no. 0, pp. 6–76, 2003.
- [30] Blanco, M. J. Tonatiuh ray tracing for Solar Energy. Transparencias
- [31] Blanco, M. J., Tonatiuh: A Monte Carlo ray tracer for the optical simulation of solar concentrating systems. <http://code.google.com/p/tonatiuh/>. Acceso: Junio 2016.