



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO SOLAR INCIDENTE EN UN SISTEMA DE
CONCENTRACIÓN DE TIPO FRESNEL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

NICOLÁS HERNÁN SILVA PIZARRO

PROFESORA GUÍA:
MÓNICA ZAMORA ZAPATA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
BENJAMÍN HERRMANN PRIESNITZ
REYNALDO CABEZAS CIFUENTES

SANTIAGO DE CHILE
2023

DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO SOLAR INCIDENTE EN UN SISTEMA DE CONCENTRACIÓN DE TIPO FRESNEL

Como es sabido, una de las fuentes más utilizadas de energía renovable es la radiación solar, la cual se ha estudiado y ha permitido diseñar diferentes formas de obtener este recurso para usos industriales. Además de la energía solar fotovoltaica, se encuentran los sistemas de CSP: concentración solar de potencia. Esta tecnología se puede utilizar tanto para producir electricidad como uso de energía térmica para otras aplicaciones industriales. Entre los sistemas de CSP se encuentran la torre central, el disco parabólico, el cilindro parabólico y el lineal Fresnel.

El sistema de concentración de tipo Fresnel destaca por su simplicidad de diseño y construcción, además de sus menores costos en el mercado. Este sistema consta de un conjunto de espejos planos que reflejan la radiación a un reflector secundario y finalmente hacia un tubo absorbedor que contiene un fluido que recibe este calor. En este trabajo de título se busca analizar este tipo concentrador, caracterizando la distribución del flujo solar incidente en el tubo que transporta el calor concentrado. Para esto se realizó una investigación del estado del arte de los concentradores de este tipo y su funcionamiento, de manera de tener una referencia sobre prototipos de mercado en funcionamiento. Hecho esto, se procedió a diseñar un concentrador Fresnel con medidas propias inspiradas en el mercado para poder analizarlo.

Se utilizó Autodesk Inventor para generar la geometría del reflector secundario, Tonatiuh para generar el resto de elementos y realizar las simulaciones de trazado de rayos, Wolfram Mathematica para procesar los datos generados en la simulación con un código computacional y poder exportarlos y por último Excel para analizar los datos.

Se definió un total de 11 casos para simular, variando el ancho de módulo de espejos reflectores (separación entre espejos), altura del tubo receptor y número de espejos del módulo, variando también por otro lado las posiciones del sol para observar su efecto en el concentrador. Al analizar los escenarios se muestra que los mejores parámetros son 4040 mm de altura de tubo receptor y 6 m ancho de módulo. En la variación de espejos, el caso de utilizar 13 de éstos es el más eficiente ópticamente, superando el 40%. De esta manera también se logra una uniformidad de 0.8 y potencia generada de 30 kW. Esta configuración, al tener mejor uniformidad en la radiación incidente, extiende la vida útil del sistema, debido a que los esfuerzos térmicos del material del tubo absorbedor se ven reducidos.

*Si solo puedes hacer una cosa, trabájala hasta la perfección,
perfecciónala hasta el límite máximo*
Jigoro Kuwajima

Agradecimientos

Tuve tan poco tiempo para todo este último año y para redactar esto mismo que se siente como un pestañeo que apenas pasó, donde han ocurrido muchísimas cosas, muchas de ellas muy duras, tanto en lo personal como en la exigencia académica y deportiva.

En primer lugar quiero agradecer a Dios por llegar a mi vida y haberme escogido desde antes de nacer, por tomarme justo en el momento de mi vida en que más comencé a necesitarlo hasta el día de hoy, quien me acompañará hasta el final de mis días, pero sobre todo en la etapa que viene que apenas comienza.

Cada día de este año sentía que faltaba muchísimo, hasta el día de hoy de la entrega de esta memoria, sentí que nunca llegaría al final de este camino, pero cada día, absolutamente todos los días me repetía una y otra vez que yo puedo, que soy capaz, que lo lograré. Finalmente hoy me siento capaz y que he desarrollado tanto las herramientas de un ingeniero como las de un hombre capaz de enfrentar la vida, comerse al mundo y soñar de forma soberbia, pero siempre con humildad en el corazón.

Agradezco a mi familia por apoyarme siempre a su manera, a mi papá por estar, ya sea de lejos o de cerca y sobre todo a mi madre, quien es la persona que más tiempo ha estado para mí, quien siempre me verá como su hijo regalón y me ha enseñado tantas cosas sobre la vida, me ha entregado las herramientas para poder caminar este camino lleno de piedras y obstáculos, que me prepara para enfrentar muchos desafíos más, sueños por cumplir y objetivos que conseguir con ambición y mucho entusiasmo. Gracias por siempre decirme que sea feliz, muchos días olvido hacerlo, pero cada vez que lo recuerdo mis fuerzas se renuevan.

Me siento agradecido de los profesores de esta facultad, por muchos conflictos que tuvimos, aprendí mucho de ustedes, gracias por exigirme para ser mejor. Especial gracias a la profesora Mónica por siempre disponer de su tiempo para resolver mis dudas, al profesor Herrmann por estar cuando se le necesita e interesarse en mi tema y al profesor Williams por corregirme y darle un valor a mi trabajo de título. Muchas gracias también a Benjamín y a Lisa por compartirme sus memorias y guiarme en el proceso, me ayudaron muchísimo y no podría haberlo logrado sin todo lo que me enseñaron.

Gracias a mis compañeros de la u, a los que conocí en el gym que tantas alegrías me dieron, a mis compañeros de mecánica con quienes hasta nos amanecemos estudiando, jugando videojuegos, tirando chistes, compartiendo después de clases. Espero que los que ya se han titulado tengan mucho éxito en esta vida y sean muy felices, mientras que a los que les falta aún que no se rindan, ustedes pueden, solo hay que seguir intentando y caminando hasta lograrlo, que el final llega cuando uno menos lo espera.

¡¡¡Nunca hay que rendirse!!! Ese es el secreto para todo en esta vida, hay que entrenar, estudiar, ser feliz, una y otra vez, día tras día, durante 7 años eso fue casi lo único que hice, buscar ser la mejor versión de mi. Gracias a todos los que he conocido hasta ahora, dentro y fuera de la universidad, a quienes me enseñaron que debo ser yo mismo sin importar nada, sin miedo, algo que aún sigo trabajando para ser cada vez más y más yo mismo, lo que hace que los demás también puedan hacerlo.

Espero haber sido una inspiración para quienes conocí y ojalá seguir siéndolo para muchas personas más. Esto es sólo el comienzo de un gran camino, grandes cosas vienen y las tomaré, no importa cuánto haya que esforzarme.

¡¡¡¡Gracias a todos!!!!

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.1.1. Tecnologías de CSP	3
1.2. Motivación	4
1.3. Objetivos	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos	4
1.4. Alcances	5
2. Antecedentes Específicos	6
2.1. Colectores Fresnel	6
2.2. Conceptos Importantes	8
2.3. Geometría del concentrador e incidencia de rayos reflejados	10
2.4. Diseño de Concentrador	13
2.5. Localización	14
2.6. Niveles de Radiación	15
2.7. Posición del Sol	16
2.8. Diseño del reflector secundario	18
2.9. Caracterización de Flujo de Calor	19
3. Metodología	21
3.1. Creación de configuración de espejos	21
3.2. Simulación de trazado de rayos	24
3.3. Procesamiento de datos obtenidos en simulación	29
4. Resultados	30
4.1. Caso Base	30
4.2. Variación de ancho de módulo	32
4.3. Variación de ángulo azimutal	34
4.4. Variación de ángulo de elevación	40
4.5. Variación de número de espejos	42
5. Resumen de Resultados y Conclusiones	45
5.1. Resumen de Resultados	45
5.2. Conclusiones	47
Bibliografía	48

Anexos	51
A. Configuraciones de Espejos	51
B. Variación de número de fotones	58
C. Códigos computacionales	60

Índice de Tablas

2.1.	Comparativa de Concentradores Fresnel Comerciales. [6]	13
2.2.	Comparativa de Diseños de Receptor. [7]	18
4.1.	Valores estadísticos obtenidos en caso base	31
4.2.	Valores estadísticos obtenidos en caso ancho de módulo 7m	32
4.3.	Valores estadísticos obtenidos en caso ancho de módulo 8m	33
4.4.	Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 0°	35
4.5.	Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 15°	36
4.6.	Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 30°	37
4.7.	Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 45°	38
4.8.	Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 60°	39
4.9.	Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 90°	40
4.10.	Valores estadísticos obtenidos en caso azimutal 90°	41

Índice de Ilustraciones

1.1.	Consumo energía en el mundo al 2018	1
1.2.	Consumo energía en Europa al 2018	2
1.3.	Mapa Mundial de Radiación Solar	3
1.4.	Tipos de Plantas de CSP	3
2.1.	Colector Fresnel [11]	6
2.2.	Gradiente de Flujo en el tubo absorbedor en un sistema de cilindro parabólico [8]	7
2.3.	Esquema de colector Fresnel [1]	9
2.4.	Sistema de Coordenadas para ángulos solares [6]	9
2.5.	Geometría de colector Fresnel [6]	11
2.6.	Ángulo de inclinación y auxiliares para un espejo [6]	11
2.7.	Curvas de producción energética en función de la altura del receptor y ancho de espejo. [7]	14
2.8.	Radiación normal directa anual [kWh/m ²] en Antofagasta [14]	15
2.9.	Radiación normal directa máxima al comienzo de cada mes del año 2013 [13] .	16
2.10.	Gráfica de posiciones del sol año 2022	17
2.11.	Geometrías del Receptor [7]	18
2.12.	Ejemplo de simulación sobre receptor Peak extendido [7]	19
3.1.	Tubo receptor (medidas en mm)	21
3.2.	Reflector secundario (medidas en mm)	21
3.3.	Espejo (medidas en mm)	22
3.4.	Posiciones de elementos del concentrador	22
3.5.	Posiciones del sol según pares de ángulos	23
3.6.	Posiciones de espejos en variación de cantidad	23
3.7.	Posiciones de elementos en [mm]	24
3.8.	Ejemplo de simulación de trazado de rayos en Tonatiuh [9]	24
3.9.	Red de nodos de concentrador	25
3.10.	Configuración de trackers	26
3.11.	Configuración de materiales	26
3.12.	Parámetros de radiación	26
3.13.	Posición del sol	27
3.14.	Opciones de trazado	27
3.15.	Exportación de datos	28
3.16.	No exportación de datos	28
3.17.	Vista previa de trazado de rayos	29
4.1.	Modelamiento caso base	30
4.2.	Flujo energético en el tubo receptor en el caso base	31
4.3.	Flujo energético en colector de ancho de módulo 7m	32
4.4.	Flujo energético en colector de ancho de módulo 8m	33

4.5.	Flujo energético en tubo receptor con elevación de 0°	34
4.6.	Flujo energético en tubo receptor con elevación de 15°	35
4.7.	Flujo energético en tubo receptor con elevación de 30°	36
4.8.	Flujo energético en tubo receptor con elevación de 45°	37
4.9.	Flujo energético en tubo receptor con elevación de 60°	38
4.10.	Flujo energético en tubo receptor con elevación de 90°	39
4.11.	Flujo energético en tubo receptor con ángulo azimutal de 90°	40
4.12.	Gráfica de posiciones del sol	41
4.13.	Flujo energético en tubo receptor según número de espejos	42
4.14.	Variables estadísticas según número de espejos	43
4.15.	Variables estadísticas según número de espejos	43
4.16.	Variables estadísticas según número de espejos	43
A.1.	Colector fresnel ancho módulo 6m	51
A.2.	Colector fresnel ancho módulo 7m	52
A.3.	Colector fresnel ancho módulo 8m	52
A.4.	Colector fresnel elevación y azimutal 45°	53
A.5.	Colector fresnel elevación 30° y azimutal 90°	53
A.6.	Colector fresnel elevación 30° y azimutal 0°	54
A.7.	Colector fresnel de 4 espejos	54
A.8.	Colector fresnel de 7 espejos	55
A.9.	Colector fresnel de 10 espejos	55
A.10.	Colector fresnel de 13 espejos	56
A.11.	Colector fresnel de 16 espejos	56
A.12.	Colector fresnel de 20 espejos	57
B.1.	Variación de Número de rayos (degradado)	58
B.2.	Variación de Número de rayos (colores)	59
B.3.	Variables estadísticas en variación número de rayos	59
C.1.	Código Wolfram Mathematica parte 1 (screenshot)	60
C.2.	Código Wolfram Mathematica parte 2 (screenshot)	61
C.3.	Código Wolfram Mathematica parte 3 (screenshot)	62
C.4.	Código Wolfram Mathematica parte 4 (screenshot)	62

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes Generales

El consumo total de energía en el mundo proviene en un 10,8 % de energías renovables al año 2018[2].

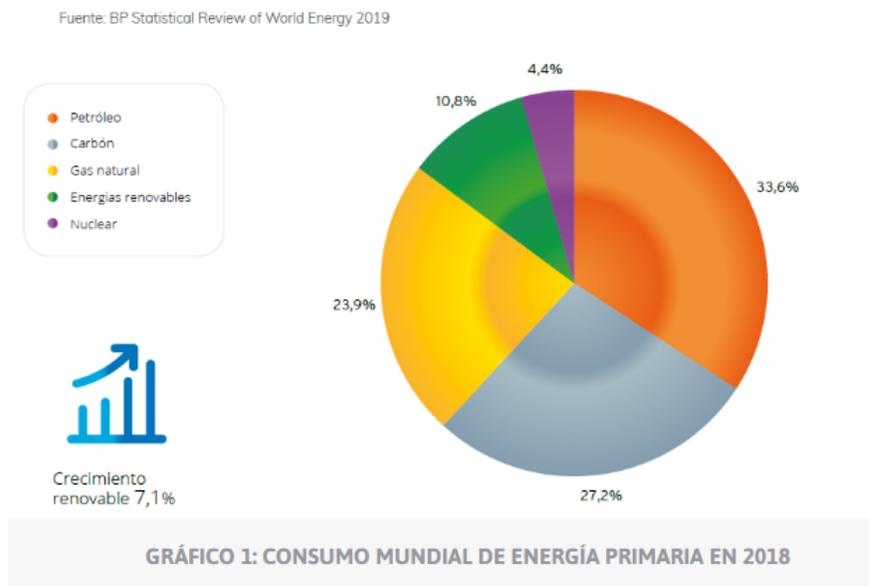


Figura 1.1: Consumo energía en el mundo al 2018

Como se puede observar en la Figura 1.1, aún se depende en gran medida de recursos que son no renovables, los cuales son liderados por Petróleo en un 33,6%, Carbón en un 27,2% y Gas Natural en un 23,9% .

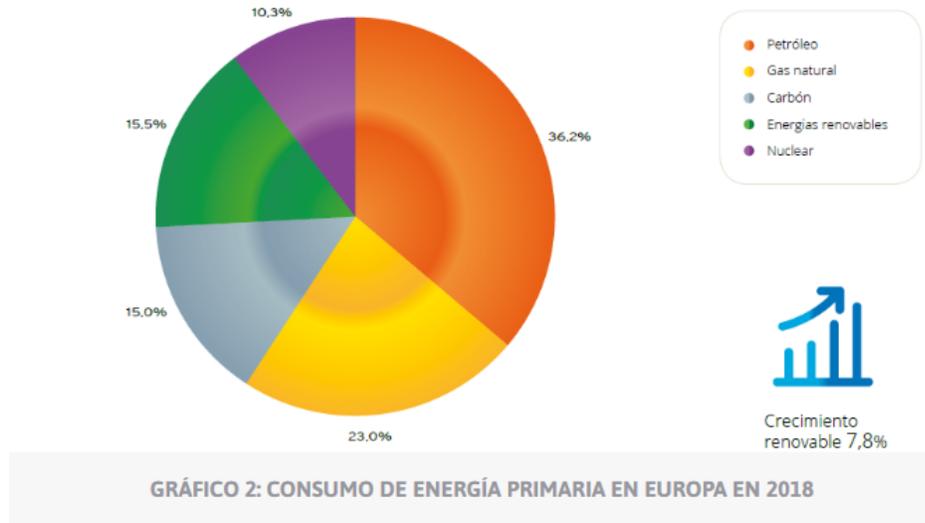


Figura 1.2: Consumo energía en Europa al 2018

Por otro lado, representan también un 15,5 % del consumo energético de Europa. Como se puede ver en la Figura 1.2, los números cambian a petróleo en un 36,2 %, carbón en un 15,0 % y gas natural en un 23,0 %.

En Chile se sabe que en los últimos 10 años se han logrado avances significativos en el desarrollo de tecnologías para producir energía limpia. Al año 2011 se tenía una capacidad instalada de energías renovables no convencionales (ERNC) de 540 [MW], mientras que hasta fines del 2019 se bordearon los 6 [GW], cifra que alcanza para alimentar aproximadamente 2,8 millones de hogares. Carlos Finat, director ejecutivo de la Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento (Acera), explica que la meta de Chile era tener una capacidad de generación instalada en las plantas de energías renovables no convencionales equivalente al 20 % de la matriz energética del país en 2025, pero ya se ha alcanzado el 23 % en la actualidad [3].

Como se puede ver en la Figura 1.3, Chile está ubicado en una zona privilegiada, pues está en el sector geográfico donde está el mayor DNI (Direct Normal Irradiance: radiación normal directa) en el mundo, indicador de cantidad de energía solar que se puede usar para concentración que llega en tal superficie, llegando cerca de los 10 [kWh/m²] por día. Dado esto, se puede decir que se tiene la oportunidad de invertir y desarrollar tecnologías para ser importantes productores de CSP a nivel global.

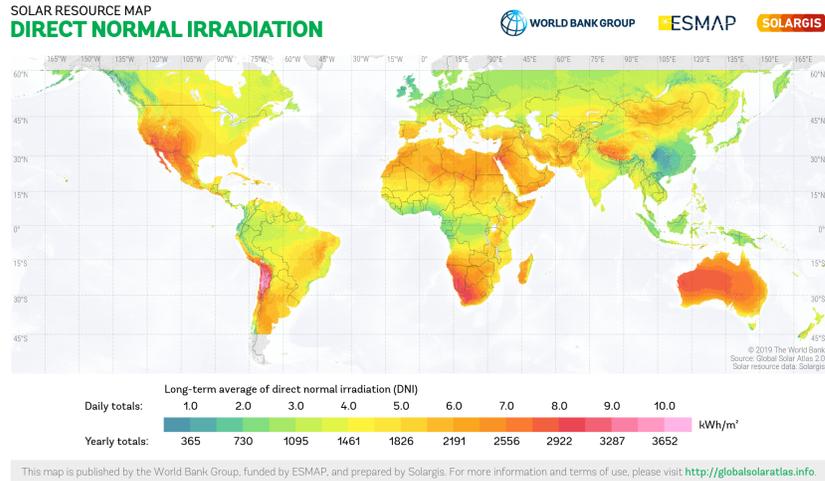


Figura 1.3: Mapa Mundial de Radiación Solar

En nuestro país se ha implementado hasta ahora sólo una planta de energía solar de concentración, que es la primera en instalarse en Latinoamérica, correspondiente a la Torre de Concentración Solar de Cerro Dominador, construida en la ciudad de Calama, con una capacidad instalada de 100 [MW] de potencia [4], sin embargo, ya se han aprobado 5 proyectos más para construir que son [5]:

- Planta de Concentración Solar de Potencia Likana Solar (450 MW)
- Planta de Concentración Solar de Potencia Tamarugal Solar (450 MW)
- Planta de Concentración Solar de Potencia Copiapó Solar (240 MW)
- Planta Termosolar Camarones (105 MW)
- Planta Solar CEME 1 (70 MW)

1.1.1. Tecnologías de CSP

Para aprovechar al máximo la radiación solar, se han creado diferentes tecnologías que están enfocadas en la captación de Energía Solar por Concentración (o también llamadas CSP: Concentración Solar de Potencia) [1]. Lo que caracteriza a estos sistemas es la utilización de espejos para concentrar la luz solar y convertirla en calor, de manera que se pueda utilizar en la industria o generar energía eléctrica.

Las plantas de CSP se dividen en 4 tipos principales como se pueden ver en la Figura 1.4:

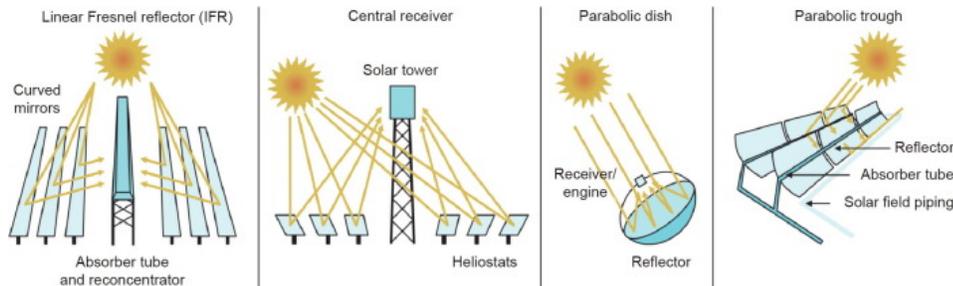


Figura 1.4: Tipos de Plantas de CSP

Estos son entonces: Reflector Lineal Fresnel, Torre Solar, Disco Parabólico y Cilindro Parabólico, respectivamente. Cada uno alcanza diferentes temperaturas y tiene diferentes eficiencias según su diseño, lo que incluye cantidad de espejos, área de apertura de éstos, ángulo de inclinación que determina incidencia de los rayos solares, entre otros. Todo esto es en gran medida la geometría que caracteriza al sistema CSP. Como se menciona anteriormente, este trabajo se enfocará en el reflector tipo Fresnel.

1.2. Motivación

A día de hoy, a pesar de los grandes avances en la ciencia, ingeniería e industria, aún la sociedad depende en gran medida de los combustibles fósiles para obtener la energía necesaria para funcionar. Como es sabido, esto ha traído graves consecuencias a nivel global producto de la contaminación y calentamiento global, además de que este tipo de recurso no renovable es cada vez más escaso. De esta manera, ha sido necesario transicionar urgentemente a la generación de energías renovables. Actualmente, se han desarrollado varias opciones, desde obtener energía del sol, de corrientes de agua e incluso del viento.

La principal motivación del estudiante para tomar este tema es el fuerte interés en trabajar en la generación u optimización de sistemas de energía limpia y sustentable, entre las que está influyendo con mayor fuerza la energía solar. Esto podría contribuir eventualmente a la transición a energías renovables y un mayor desarrollo de la industria a tanto nivel nacional como internacional. De esta manera, realizar este trabajo de título da al estudiante una mejor comprensión de los sistemas de CSP, los cuales representan el futuro de la generación de energía.

Por otro lado, realizando este análisis se puede verificar qué configuraciones del concentrador permitirían reducir los esfuerzos térmicos a los que es sometido en el proceso de recibir radiación solar, logrando aumentar la vida útil de este sistema.

1.3. Objetivos

Objetivo General

Caracterizar la distribución de incidencia de rayos solares en el tubo contenedor de flujo para diferentes configuraciones geométricas de un concentrador Fresnel.

Objetivos Específicos

- Establecer los parámetros que caracterizan la distribución del flujo de energía.
- Definir las características y dimensiones del sistema de concentración.
- Considerar diferentes posiciones de espejos que representen diferentes horas del día y estaciones del año.
- Describir el flujo de calor usando variables estadísticas.

1.4. Alcances

- El trabajo consta principalmente de simulaciones 3D de trazado de rayos y no la realización un experimento físico.
- El foco de investigación del trabajo es la óptica del concentrador y no la transferencia de calor.

Capítulo 2

Antecedentes Específicos

2.1. Colectores Fresnel

El lente de Fresnel fue inventado por Augustin Jean Fresnel (1788-1827), sin embargo el primer prototipo no fue desarrollado hasta el 1964 por Giovanni Francia y la primera planta instalada el año 2006.

Los colectores fresnel consisten en una configuración de varios espejos planos que se acomodan a la posición del sol, reflejando la luz solar en un tubo receptor ubicado encima de éstos.

En la Figura 2.1 se puede observar su estructura:



Figura 2.1: Colector Fresnel [11]

Estos espejos reflectores normalmente están alineados horizontalmente y siguen el sol de manera que el receptor pueda mantener su posición estática. Similares a los campos de heliostatos en las torres solares, los reflectores lineales Fresnel tienen un área de apertura por unidad mucho más grande que el reflector ideal (parabólico). Las limitaciones mecánicas en cuanto al tamaño del reflector ideal (resultantes de la carga eólica y del peso) son similares tanto al heliostato como al colector parabólico. En comparación, el espejo parabólico es superior en la eficiencia óptica dada su geometría, sin embargo, el heliostato tiene la ventaja de tener un tamaño de apertura independiente del tamaño de los reflectores individuales, es decir, que aunque sean pequeños los espejos, pueden en conjunto cubrir una gran superficie.

Es importante destacar que si bien el sistema de concentración Fresnel es un diseño simple, económico y funcional, la radiación reflejada no se redirige de forma homogénea, lo que implica que el flujo de calor a lo largo del tubo receptor no es uniforme, variando en función del ángulo del tubo, como se observa en la Figura 2.2. Para acercarse a esto, es importante caracterizar la geometría del sistema, para relacionar la óptica con el flujo de calor y así poder controlar el sistema para maximizar su rendimiento.

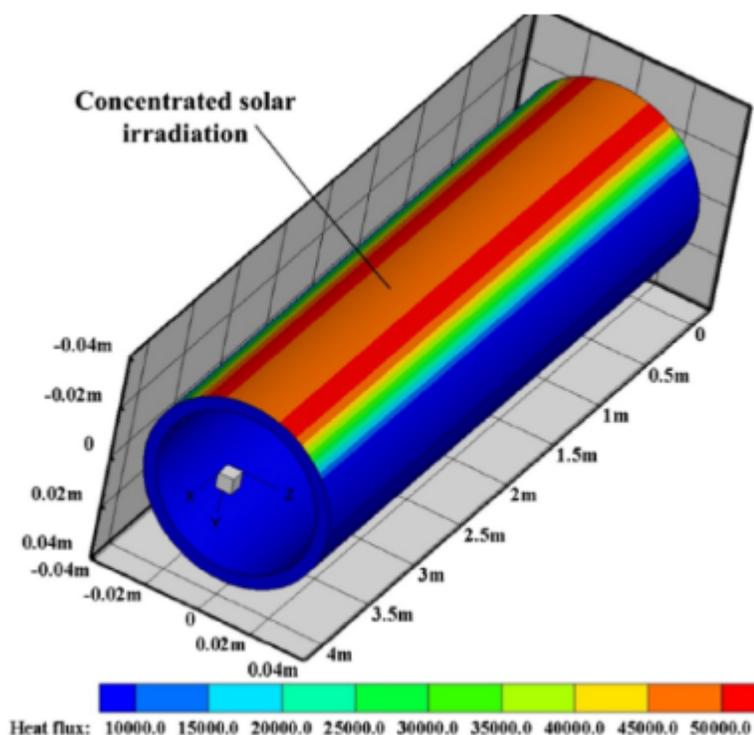


Figura 2.2: Gradiente de Flujo en el tubo absorbedor en un sistema de cilindro parabólico [8]

Este tipo de colector está diseñado principalmente para aplicaciones de bajas temperaturas (menores a 400°C). Entre de los usos más recurrentes se están la climatización de edificios, integración con procesos térmicos, tratamiento de agua, etc. [6].

2.2. Conceptos Importantes

Para comprender el diseño de un colector fresnel, es necesario primero estudiar la geometría del sistema como tal, que permitirá caracterizar la óptica de la configuración y, de esta manera, tener criterios de diseño adecuados para el colector. Dicho esto, es importante definir los siguientes conceptos:

- Área de Captación (A_{ap}): es el área total formada por los espejos que recibirá DNI (Direct Normal Irradiation: irradiación normal directa).
- Flujo de energía incidente (\dot{E}_{inc}): es el flujo de energía de los rayos incidentes en los espejos, se define con la ecuación:

$$\dot{E}_{inc} = I_a \cdot A_{ap} [W] \quad (2.1)$$

Donde I_a es la irradiación incidente media en $[W/m^2]$ [8]

- Largo de Módulo (L): largo total del campo de espejos
- Ancho de Módulo (W): ancho total del campo de espejos
- Número de espejos (N_m): cantidad de espejos necesarios para conformar el módulo
- Ancho de espejo (w_m): es el ancho de la unidad de espejo que va a reflejar los rayos solares.
- Altura de receptor (H): Altura a la que estará el tubo receptor de radiación respecto del módulo.
- Geometría de Receptor: es la forma que tendrá el receptor o reflector secundario para concentrar los rayos reflejados por el módulo, puede tener varias geometrías, desde parabólica, tubular, trapezoidal, entre otros.
- Absorbedor: Es el elemento final que recibirá toda la radiación reflejada por el receptor y aumentar su temperatura, de manera que transmita ese calor al fluido en su interior, que puede ser agua o sales fundidas, dependiendo de la temperatura de trabajo.
- Eficiencia óptica: indicador del rendimiento del sistema, relacionando la cantidad de fotones incidentes en el tubo absorbedor respecto del total provenientes de la radiación solar, tomando en cuenta las pérdidas asociadas.

Por otra parte, se tiene el modelo óptico del concentrador, que caracteriza los ángulos involucrados en el sistema. El que se suele utilizar para el concentrador fresnel es el modelo geométrico de bordes. Este modelo está basado en el trabajo de Gregg Stuart Walker, quien diseñó un colector fresnel de bajo costo para su construcción en Sudáfrica [7]. Aquí se tiene como ventaja que se realiza la simulación por separado del arreglo de espejos y del receptor, logrando de esta manera analizar estos componentes de forma independiente en cómo influyen en ellos los parámetros del colector.

Dentro de los principales supuestos del modelo se encuentra asumir la radiación solar paralela, es decir, no se considera el cono solar de $0,52^\circ$. Se asume la reflexión de espejos

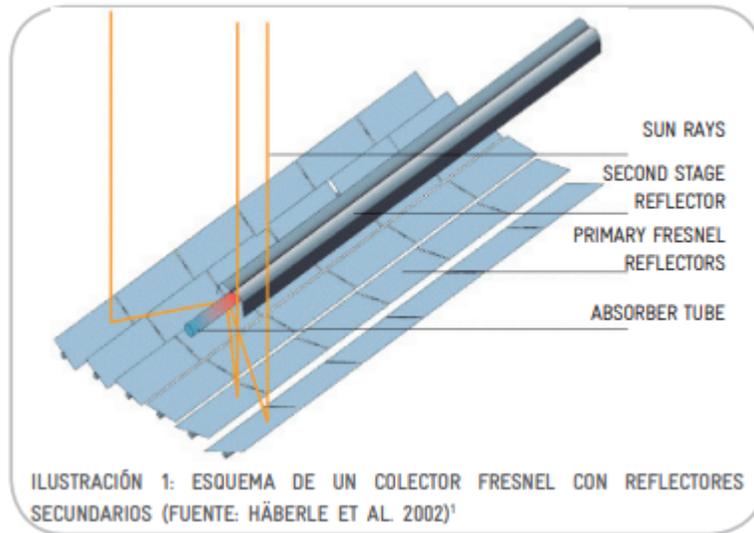


Figura 2.3: Esquema de colector Fresnel [1]

completamente especular, que significa que no hay reflexión difusa de la radiación, de manera de despreciar los errores asociados a los componentes del colector.

Con respecto a la posición del sol, se asume que el colector se alinea de forma longitudinal con la dirección N-S. Mediante el ángulo azimutal y el zenit solar, se proyecta la posición del sol en un plano E-O, formando un ángulo de incidencia transversal θ_T , tal como se ve en la Figura 2.4. También se proyecta el sol en el plano N-S, con lo que se genera un ángulo de incidencia longitudinal θ_L [6].

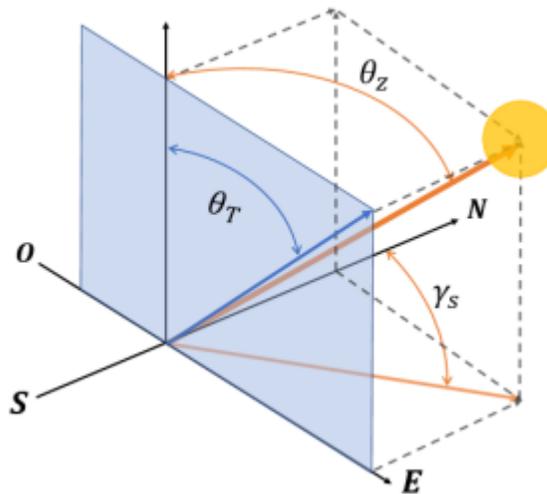


Figura 2.4: Sistema de Coordenadas para ángulos solares [6]

En la Figura 2.4 el ángulo θ_z corresponde al ángulo solar cenital, que corresponde al ángulo entre la vertical y el vector en la dirección del sol, γ_s es el ángulo azimutal, definido como el ángulo entre el eje norte y la proyección del sol en el plano horizontal. Finalmente, el ángulo

de incidencia transversal, θ_T se determina con la siguiente ecuación:

$$\theta_T = \arctan\left(\frac{\sin\theta_z \sin\gamma_s}{\cos\theta_z}\right) \quad (2.2)$$

De forma similar, el ángulo de incidencia longitudinal, θ_L , se determina de la siguiente forma:

$$\theta_L = \arctan\left(\frac{\sin\theta_z \cos\gamma_s}{\cos\theta_z}\right) \quad (2.3)$$

2.3. Geometría del concentrador e incidencia de rayos reflejados

Ya teniendo definido el sistema de coordenadas solares y los ángulos importantes, se plantea el modelo de seguimiento del sol del concentrador y la incidencia de rayos reflejados al interior del receptor. En este estudio se puede determinar la eficiencia óptica y los modificadores de ángulo de incidencia transversales y longitudinales del colector. Primero recordamos los conceptos ya mencionados anteriormente:

- Número de Espejos (N)
- Ancho de Espejo (w_m)
- Ancho de Módulo (W)
- Altura del Receptor (H)

Como se ve en la Figura 2.5 a partir de los parámetros anteriores se genera un arreglo de espejos equidistantes. Cada espejo posee una posición x_i , medida desde el centro del módulo. Luego se determina el ángulo de reflexión θ_i de cada espejo, el cual se define desde la horizontal en sentido antihorario. Este corresponde al ángulo que debe seguir un rayo solar reflejado desde el espejo para ser captado en el punto medio del receptor. En la Figura 2.5 se muestra el ángulo de reflexión para un espejo cualquiera, que es determinado por las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_i = \arctan(H/x_i) \quad (2.4)$$

$$\theta_i = \begin{cases} \pi - \alpha & \text{si } \alpha < \pi \\ -\alpha & \text{si } \alpha < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Donde x_i corresponde a la distancia desde el centro del colector hasta la mitad del espejo i . El ángulo θ_i se define desde la horizontal en sentido antihorario.

Teniendo definido el ángulo de reflexión, se determina el ángulo de inclinación de un espejo, γ_i , en función del ángulo de inclinación transversal del sol, θ_T :

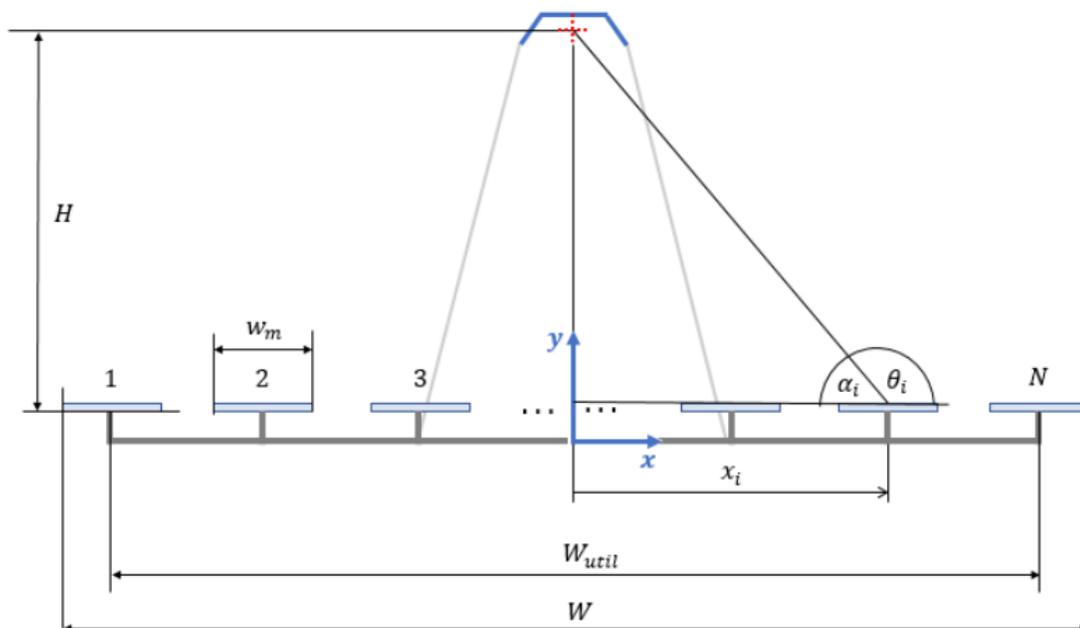


Figura 2.5: Geometría de colector Fresnel [6]

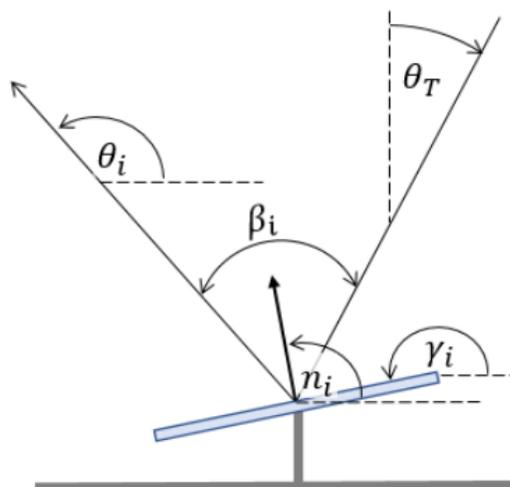


Figura 2.6: Ángulo de inclinación y auxiliares para un espejo [6]

Para determinar γ_i , se define un grupo de ángulos auxiliares, que son β_i (ángulo incidente transversal y ángulo de reflexión) y n_i (ángulo del vector normal del espejo). Podemos definir los ángulos de la siguiente manera:

$$\beta_i = \theta_i - \pi/2 + \theta_T \quad (2.6)$$

$$n_i = \theta_i - \beta_i/2 \quad (2.7)$$

De esta forma, el ángulo de inclinación de cada espejo, γ_i queda determinado como:

$$\gamma_i = n_i - \pi/2 \tag{2.8}$$

Si bien el ángulo n_i también puede servir para definir un espejo (ya que, el vector normal es único para cada uno), se busca definir γ_i , que es el ángulo de inclinación respecto de la horizontal.

2.4. Diseño de Concentrador

Para diseñar el concentrador y seleccionar sus dimensiones, primero se hizo una revisión bibliográfica para comparar especificaciones de equipos de mercado y tener una referencia a la hora de determinar las métricas del sistema de manera que resulten realistas.

Tabla 2.1: Comparativa de Concentradores Fresnel Comerciales. [6]

Característica	Industrial Solar	Solatom	Soltigua	Walker
Área de Captación (m ²)	22	26,4	148,5	9,6
Largo de Módulo (m)	4,06	6	25,02	3
Ancho de Módulo (m)	7,5	6	8,05	4
Número de espejos	11	10	10	16
Ancho de espejo (m)	0,5	0,44	0,59	0,2
Altura de receptor (m)	4,5	3,5	4	2
Geometría de reflector	Trapezoidal	Trapezoidal	Trapezoidal	Poligonal
Absorbedor	Tubo evacuado	Tubo evacuado	Tubo evacuado	Tubería convencional
Eficiencia óptica	0,635	0,62	0,621	0,45

De la tabla 2.1 se puede observar que las dimensiones en general pueden ser variables, pero una similitud en número de espejos, ancho de espejos, altura de receptor y geometría de receptor, llegando a valores no muy diferentes en eficiencia óptica. Lo que más llega a cambiar es el largo de módulo y por ende, el área total de captación.

Se observa además que hay una característica en común entre los colectores que es la geometría utilizada del receptor secundario, que corresponde a trapezoidal, pues es el diseño más simple y fácil de manufacturar. Sin embargo el utilizado por Walker es el de tipo peak extendido o poligonal (se verá en más detalle en Diseño de receptor).

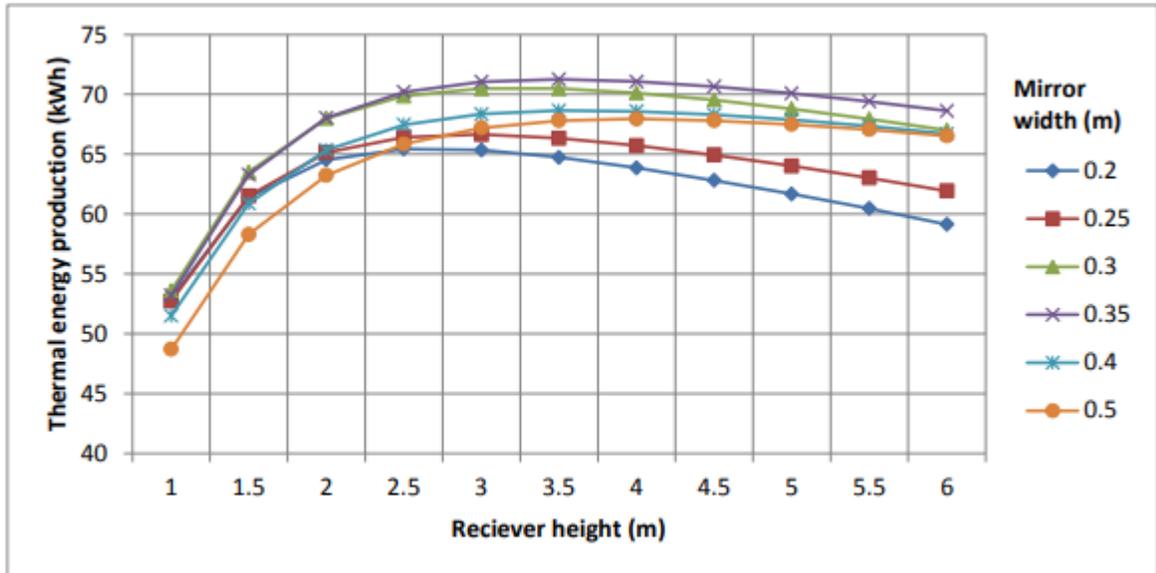


Figure 22 Thermal energy trend for receiver height

Figura 2.7: Curvas de producción energética en función de la altura del receptor y ancho de espejo. [7]

Algo importante a definir en la geometría del sistema es la altura del receptor, pues esta determina en gran medida el movimiento que harán los espejos para reflejar la luz a este componente que recibirá toda la radiación solar posible.

En la figura 2.7 se muestran diferentes curvas de producción de energía térmica (kWh) según la altura del receptor en diferentes anchos de espejo, en el que se observa que la altura que determina una mayor eficiencia en el sistema es de 4 m y un ancho de espejo de 0.35 m, altura que fue escogida para la configuración. Se utilizó un ancho de 0.5 m por simplicidad utilizando como referencia los concentradores de mercado vistos anteriormente.

2.5. Localización

El concentrador Fresnel maximizará su producción de energía estando en un lugar en el que haya buena radiación, por lo que se localizó la investigación en el norte de Chile, en la región de Antofagasta, que contiene el Desierto de Atacama, conocido por ser la zona con mayor DNI (irradiación normal directa) en el planeta.

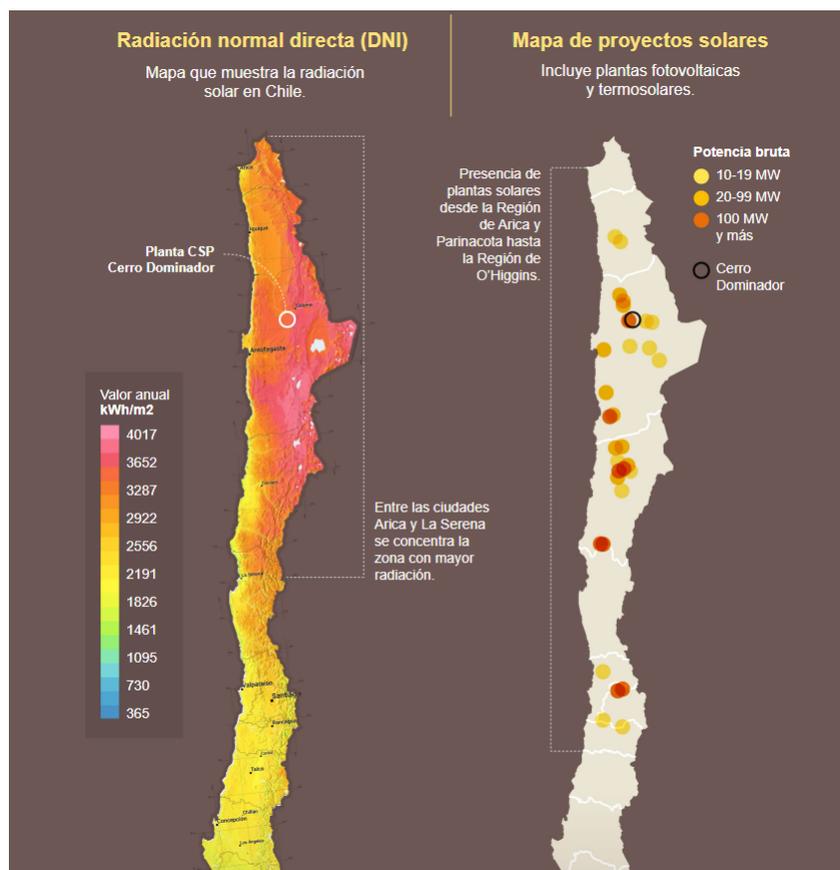


Figura 2.8: Radiación normal directa anual [kWh/m²] en Antofagasta [14]

En la Figura 2.8 se pueden observar los niveles de radiación de la región mencionada, en particular en la zona más roja que tiene niveles de radiación anual de hasta 4000 kWh/m^2 . Esta zona corresponde además a la ubicación de la primera planta CSP instalada en Latinoamérica hasta el momento, que es la de Cerro Dominador, una planta de torre central. Cabe destacar además que en este complejo se están construyendo futuros proyectos mucho más grandes que los instalados en el presente, demostrando el potencial de generación de energía que tiene esta zona del mundo.

2.6. Niveles de Radiación

Como se mencionó anteriormente, en la localización del trabajo de título se encuentran altos niveles de radiación, los cuales para ser cuantificados fueron analizados por el Ministerio de Energía junto a la Corporación Internacional Alemana [13] en diferentes estaciones de medición de niveles de energía eólica y solar. Como se ve en la figura 2.9, los niveles de radiación normal directa máxima tienden a mantenerse dentro de un rango a lo largo del tiempo, correspondiendo a un valor aproximado de entre 700 y 1200 W/m^2 , dependiendo de la estación del año. En los meses de diciembre, enero y febrero, se obtienen los valores más altos, mientras que en invierno aparecen los mínimos.

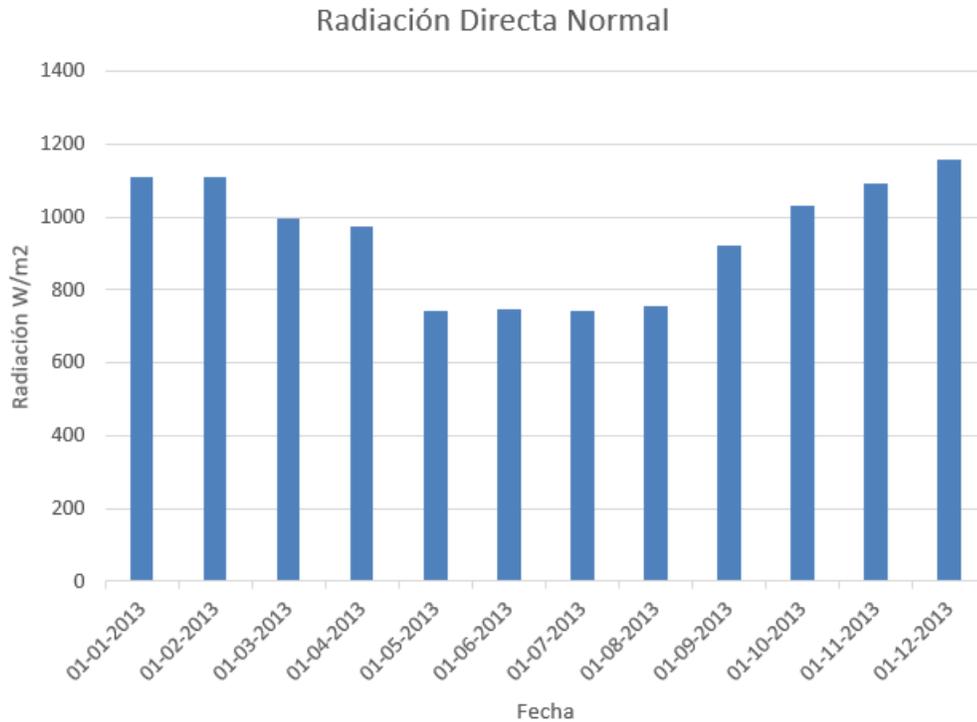


Figura 2.9: Radiación normal directa máxima al comienzo de cada mes del año 2013 [13]

2.7. Posición del Sol

Con la librería de python *pvl*, se puede utilizar la herramienta *solarposition* que permite graficar la posición del sol en un lugar determinado del mundo según sus coordenadas y en una fecha determinada. De esta forma, podemos observar el recorrido del sol en diferentes días del año en la región de Antofagasta. Notamos que, como es habitual en nuestro país, en los meses de verano (Diciembre y Enero) es donde el sol se posiciona con mayor elevación, llegando incluso a los 90° (completamente sobre el suelo).

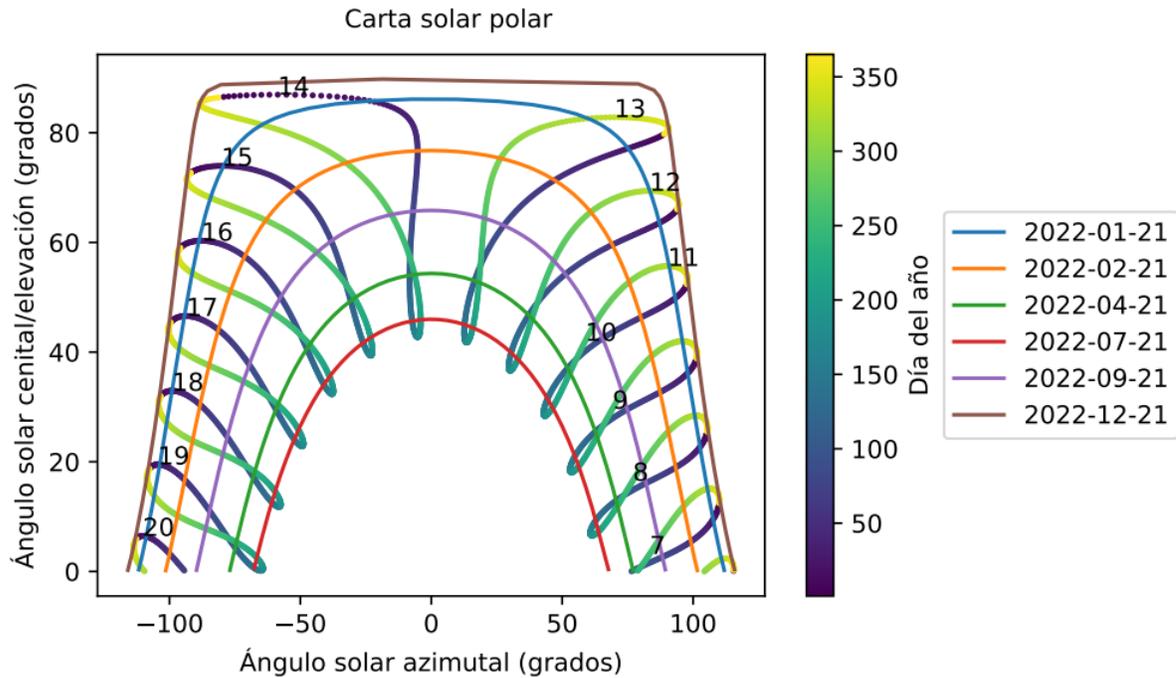


Figura 2.10: Gráfica de posiciones del sol año 2022

En la Figura 2.10 se observa la carta solar en forma polar, es decir, las curvas de posiciones del sol en diferentes días del año en coordenadas polares. En el eje de las abscisas se encuentra el ángulo azimutal respecto del eje norte y en las ordenadas el ángulo de elevación respecto del suelo. Para el análisis interesa sólo hasta las 13:00 hrs., puesto que el comportamiento del sol es simétrico luego de esa hora, donde ocurre la máxima elevación.

Cada curva representa un día del año, escogiéndose distintos meses para observar el comportamiento del sol a través de las estaciones del año. En invierno se aprecia que el sol obtiene sus alturas más bajas, mientras que en verano se posiciona completamente sobre el concentrador.

Las curvas están enlazadas por anillos en forma de 8 que son los llamados *analemas*, que representan las posiciones del sol al mirarlo desde un mismo punto. Cada uno de estos anatemas está dado por una hora del día. De esta forma, el punto de cruce de los anatemas enumerados con las curvas indica la posición del sol a esa hora.

2.8. Diseño del reflector secundario

Graphic	Description
	Trapezoidal
	CPC
	M type
	Peak type

Figura 2.11: Geometrías del Receptor [7]

Como se puede ver en la Figura 2.11, el receptor puede diseñarse de diferentes maneras, entre las que están principalmente el trapezoidal, el CPC (Compound Parabolic Concentrator, el cual está compuesto por 2 parábolas fusionadas), tipo M y tipo Peak. [7]

Walker realiza un estudio computacional de cada uno de los tipos de reflector para verificar su rendimiento en función de diferentes variables que permiten compararlos y determinar cuál de ellos es el más efectivo o conveniente para diseñar y eventualmente, construir. Para esto entonces, fija un mismo concentrador pero probando diferentes reflectores secundarios y su efecto

Se puede ver en la Tabla 2.2 la comparativa entre los diferentes diseños del reflector secundario:

Tabla 2.2: Comparativa de Diseños de Receptor. [7]

Geometría	Diámetro de Tubo [mm]	Rendimiento de Flujo (%)	Rendimiento Óptico (%)	Tasa de Concentración Promedio
CPC	88,9	87,99	97,56	8,76
Trapezoidal	88,9	81,76	88,66	7,15
Tipo M	88,9	82,35	90,08	7,20
Tipo Peak	88,9	73,87	82,09	6,46
Tipo Peak Extendido	88,9	84,39	92,40	7,38

Se observa en la Tabla 2.2 hecha por Walker con los resultados obtenidos de sus simulaciones de trazado de rayos, el CPC alcanza casi la reflexión perfecta al tener una eficiencia geométrica de 97,56 %, por lo que se determina que es el mejor diseño para el colector fresnel. El estudio se hizo con configuraciones de 1 hasta 3 tubos absorbentes, pero se ha limitado

esta comparativa a un sólo tubo para simplificarlo.

Si bien el receptor CPC muestra el mejor rendimiento, es también el más difícil de manufacturar dada la precisión que se necesita para obtener su forma. De esta manera, se determina que el receptor más eficiente y no difícil de implementar es el tipo peak extendido, que es una versión del tipo peak con mayor cantidad de aristas, como una aproximación de la parábola a base de varios lados rectos.

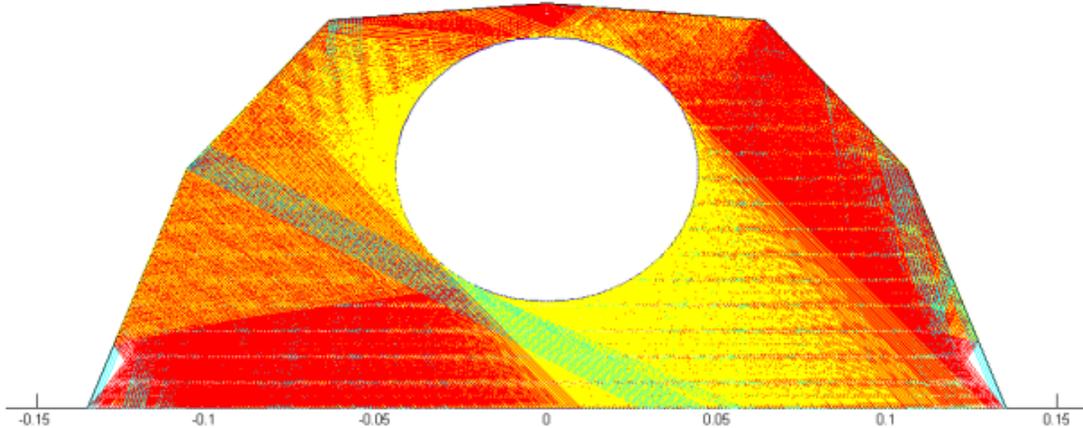


Figura 2.12: Ejemplo de simulación sobre receptor Peak extendido [7]

En la Figura 2.12 se puede observar el análisis hecho por Walker del trazado de rayos en un receptor tipo peak extendido, en el que los rayos rojos son los de incidencia, los amarillos los que van dirigidos hacia el absorbedor y los azules los que rebotan hacia fuera del tubo. Como se puede ver, este modelo presenta una eficiencia aceptable sin mayores pérdidas dado su diseño geométrico, por lo que se considera la mejor opción entre los vistos anteriormente.

2.9. Caracterización de Flujo de Calor

Dados los parámetros generales y criterios de diseño para el sistema, el siguiente paso es caracterizar el flujo energético a través del tubo absorbedor mediante variables estadísticas utilizadas en la memoria de Benjamín Canales para el estudio de un concentrador de cilindro parabólico [8]:

- Uniformidad (N.U.):

$$U. = 1 - \frac{MaxF_i - MinF_i}{2 \cdot (MaxF_i - MinF_i)} \quad (2.9)$$

Que mide la diferencia entre el flujo máximo y mínimo de energía a lo largo del tubo absorbedor.

- Desviación Estándar (D.E.):

$$D.E. = \sqrt{\frac{\Sigma(F_i - \bar{F})^2}{n - 1}} \quad (2.10)$$

Que mide la dispersión del flujo F sobre el absorbedor. F_i corresponde al flujo energético puntual en un rango de ángulos, \bar{F} es el flujo promedio y n es la cantidad de flujos puntuales (fotones incidentes) medidos a lo largo del tubo.

- Porcentaje de superficie con flujo (S.F.):

$$S.F. = \frac{\textit{Superficie con flujo} > \textit{Flujo basal}}{\textit{Superficie total}} \quad (2.11)$$

Donde el flujo basal es el flujo base en el tubo absorbedor, donde no hay radiación concentrada.

- Eficiencia Óptica (E.O.):

$$E.O. = \frac{\# \textit{Rayos llegando al absorbedor}}{\# \textit{Total de rayos}} \quad (2.12)$$

- Potencia estimada en el receptor (P):

$$P = \# \textit{fotones en receptor} \cdot \textit{Potencia por fotón} \quad (2.13)$$

- Desviación Estándar Normalizada (D.E.N.):

$$D.E.N. = \frac{D.E.}{P \cdot A_{ab}} \quad (2.14)$$

Donde A_{ab} es el área del tubo absorbedor

Capítulo 3

Metodología

La metodología aplicada para desarrollar el trabajo de título consistió en los siguientes puntos:

3.1. Creación de configuración de espejos

Utilizando el software Tonatiuh se realizaron los modelos CAD de los espejos y del tubo absorbedor, mientras que se usó Autodesk Inventor para crear el reflector secundario para su posterior estudio en base a simulaciones de trazado de rayos.

A continuación se pueden ver los planos de los elementos diseñados con sus medidas correspondientes:

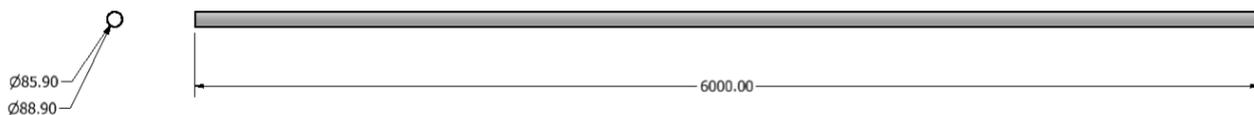


Figura 3.1: Tubo receptor (medidas en mm)

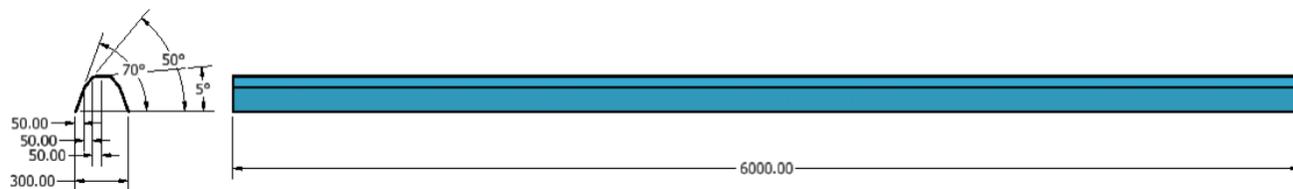


Figura 3.2: Reflector secundario (medidas en mm)

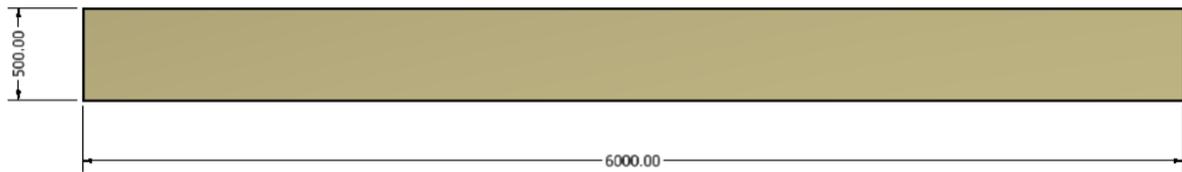


Figura 3.3: Espejo (medidas en mm)

Se observa en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 que los elementos corresponden a un largo de 6 m, sin embargo, cada uno tiene una geometría específica para su función.

El tubo receptor simula un tubo convencional de 88,9 mm de diámetro exterior como el modelo de Walker. El reflector secundario tiene un ancho de 300 mm y con aristas con una proyección en la horizontal equivalentes de 50 mm, cada una con un grado de inclinación de 70°, 50° y 5° como en el modelo mencionado, emulando un reflector eficiente en términos de óptica. Por último, se define el ancho de 500 mm del espejo y de largo 6 m como un elemento continuo en vez de discretizarlo en varios espejos por simplicidad de simulación.

Una vez hecho el dibujo CAD, se calcularon en Excel las diferentes configuraciones del concentrador, en que se estudiaron el comportamiento de variables como el ancho de módulo (dado por la separación entre espejos), altura de tubo receptor y los ángulos de elevación y azimutal del sol.

TONATIUH [mm]			
Ancho espejo	500	500	500
Ancho reflector secundario	300	300	300
Separación entre espejos	111.111	222.222	333.333
Ancho módulo	6000	7000	8000
Ubicación espejos según módulo			
1	0	0	0
2	611.1	722.2	833.3
3	1222.2	1444.4	1666.7
4	1833.3	2166.7	2500.0
5	2444.4	2888.9	3333.3
6	3055.6	3611.1	4166.7
7	3666.7	4333.3	5000.0
8	4277.8	5055.6	5833.3
9	4888.9	5777.8	6666.7
10	5500.0	6500.0	7500.0
Tubo receptor	2750	3250	3750
Reflector Secundario	3050	3550	4050
Altura tubo receptor	4000	4000	4000
	4020	4020	4020
	4040	4040	4040
	3980	3980	3980
	3960	3960	3960

Figura 3.4: Posiciones de elementos del concentrador

Ángulos = 90°	Azimut = 60°	Azimut = 45°	Azimut = 30°	Azimut = 0°
Elevación = 60°	POSICIÓN DEL SOL SEGÚN COMBINACIONES DE ÁNGULOS			
Elevación = 45°				
Elevación = 30°				
Elevación = 15°				
Elevación = 0°				

Figura 3.5: Posiciones del sol según pares de ángulos

En la Figura 3.4 se observan las configuraciones determinadas para realizar el análisis de incidencia de rayos, puesto que aunque con Tonatiuh, software que se utilizará para simular radiación solar sobre el concentrador, se pueden automatizar las rotaciones de los espejos. Se debe definir de esta manera en qué posición quedará cada uno de estos, calculando que queden equidistantes dentro de un cierto ancho de módulo. Se fija el caso base destacado en calipso, correspondiente una altura de tubo receptor de 4 m y un ancho de módulo de 6 m, dada por la separación entre espejos (en rojo). A partir de este, se modifican las distancias en el eje x a las que irá cada espejo dependiendo del ancho de módulo que queremos crear, la posición en el mismo eje a la que están el tubo receptor y el reflector secundario y la altura a la que estará el tubo receptor, variando de a 20 mm este parámetro. Finalmente en la Figura 3.5 se definen los ángulos de elevación y azimutal para observar el efecto de la posición del sol en el concentrador. La elevación comienza desde los 15° debido a que si fueran 0° no llegaría ningún rayo al tubo receptor, pero en el caso del azimutal se comienza desde 0° ya que sí llegan algunos rayos desde esa posición. La tabla azul indica que el caso base corresponde al módulo de 5 metros con una altura de 4000 mm de absorbedor y ambos ángulos en 90°, a partir del cual se prueban diferentes posiciones del sol para observar su efecto.

	TONATIUH [mm]					
Ancho módulo	6000	6000	6000	6000	6000	6000
Ancho reflector secundario	300	300	300	300	300	300
Separación entre espejos	111.111	111.111	111.111	111.111	111.111	111.111
Número de espejos	4	7	10	13	16	20
Ancho de cada espejo	1417	762	500	359	271	194
	Ubicación espejos según módulo					
1	0	0	0	0	0	0
2	1528.1	873.1	611.1	470.1	382.1	305.1
3	3056.2	1746.2	1222.2	940.2	764.2	610.2
4	4584.3	2619.3	1833.3	1410.3	1146.3	915.3
5		3492.4	2444.4	1880.4	1528.4	1220.4
6		4365.6	3055.6	2350.6	1910.6	1525.6
7		5238.7	3666.7	2820.7	2292.7	1830.7
8			4277.8	3290.8	2674.8	2135.8
9			4888.9	3760.9	3056.9	2440.9
10			5500.0	4231.0	3439.0	2746.0
11				4701.1	3821.1	3051.1
12				5171.2	4203.2	3356.2
13				5641.3	4585.3	3661.3
14					4967.4	3966.4
15					5349.6	4271.6
16					5731.7	4576.7
17						4881.8
18						5186.9
19						5492.0
20						5797.1

Figura 3.6: Posiciones de espejos en variación de cantidad

Tubo receptor	2750
Reflector Secundario	3050
	3960
	3980
Altura tubo receptor	4000
	4020
	4040

Figura 3.7: Posiciones de elementos en [mm]

En las Figuras 3.6 y 3.7 se establecen las configuraciones de posiciones en las que van los elementos del concentrador en el caso en que se mantiene el ancho de módulo, pero aumentando o disminuyendo la cantidad de espejos del módulo, de manera de ir discretizando el campo de espejos y estudiar su efecto en la eficiencia. La columna amarilla indica el caso base a partir del cual se realizan los análisis, correspondiente a 10 espejos, siendo la fila amarilla la indicadora de la posición del espejo 10 en cada caso en el eje x. En la segunda Figura se indica en celeste la altura del tubo receptor en el caso base, correspondiente a 4 m, a partir de la cual se sube o baja tal elemento para realizar pruebas.

3.2. Simulación de trazado de rayos

Luego de tener las configuraciones del concentrador definidas, se realizaron las simulaciones necesarias para estudiar el sistema y observar cómo afectan los diferentes ángulos dados por las posiciones del sol, obteniendo los datos necesarios para su posterior análisis gráfico.

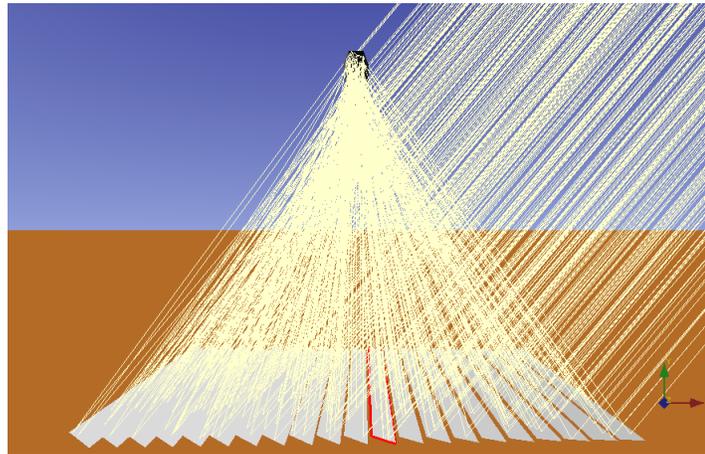


Figura 3.8: Ejemplo de simulación de trazado de rayos en Tonatiuh [9]

Tonatiuh es un simulador de trazado de rayos en un ambiente 3D basado en el modelo estadístico de Montecarlo para realizar simulaciones que representen la óptica de diferentes tipos de concentradores solares. Esto permitió apreciar el comportamiento del modelo diseñado con diferentes configuraciones y posiciones del sol, generando datos que permitan observar el flujo energético recibido en el tubo absorbedor, indicando la eficiencia óptica del sistema, uniformidad, y potencia generada.

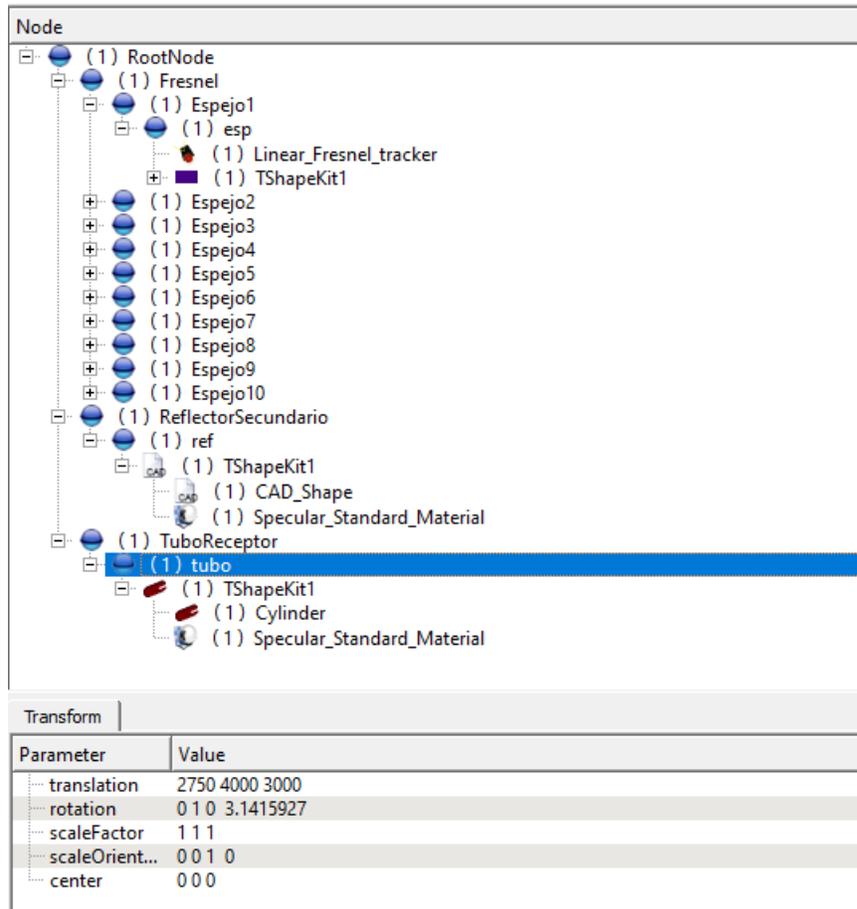


Figura 3.9: Red de nodos de concentrador

En la Figura 3.9 se aprecia la primera configuración y más importante a definir en el simulador, que es la red de nodos. El RootNode consta del nodo principal, el origen del sistema de coordenadas del que saldrán todos los demás, es decir, el punto de referencia. De éste salen 3 principales que son: Fresnel, ReflectorSecundario y TuboReceptor. El primero contiene la red de espejos y los otros los elementos aludidos en su nombre. Cada nodo tiene asociado una posición y una rotación respecto del nodo raíz, dados por los parámetros translation y rotation. El primero indica la posición relativa de cada subnodo en mm y el segundo parámetro el eje en el cual se va a rotar y el ángulo de rotación en radianes (en este caso π).

Cada nodo Espejo1...Espejo10 contendrá el nodo "esp" que es el correspondiente al elemento reflector establecido. Éste consta de dos partes principales: TShapeKit, que es donde se define la figura a fijar en el nodo, que en este caso es el espejo reflector diseñado con las medidas dadas en el plano anterior y el Lineal Fresnel tracker, que es el sistema de tracking, es decir, de seguimiento del elemento respecto a la posición del sol. De esta manera, el espejo se irá moviendo de forma solidaria con los ángulos solares a setear de forma que siempre se reflejen los rayos hacia el punto establecido, que es en este caso, el tubo receptor. Escogemos claramente el tracker de tipo Linear Fresnel correspondiente al sistema estudiado.

Parameter	Value
m_azimuth	1.5707964
m_zenith	1.5707964
typeOfAimi...	Absolute
activeAxis	Z
axisOrigin	2750 4000

Figura 3.10: Configuración de trackers

Cada espejo debe tener su tracker asociado con las coordenadas correctas, las cuales deben ser cambiadas para cada espejo cada vez que se cambie la altura del receptor para indicarle la posición hacia la que debe inclinarse. Esto se ve en la Figura 3.10, en el parámetro axisOrigin, que coincide con las coordenadas del tubo receptor en el plano x-y.

Por otro lado, a diferencia del tubo receptor y los espejos, el reflector secundario tiene insertado en el nodo de TShapeKit1 el elemento diseñado en Autodesk Inventor, por lo que dice en su nombre CAD Shape.

Parameter	Value
m_reflectivity	1
m_sigmaSlo...	2
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

(a) Material espejos y reflector secundario

Parameter	Value
m_reflectivity	0
m_sigmaSlo...	2
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

(b) Material tubo absorbedor

Figura 3.11: Configuración de materiales

Lo que tienen en común todos los elementos es que deben tener insertado un tipo de material, indicado por Specular Standar Material. Como en la Figura 3.11, tanto los espejos como el reflector secundario tienen la misma configuración, con la reflectividad en 1 (máxima) y el tubo absorbedor con reflectividad en 0 (nula, máxima absorción). Se fijaron estos valores por simplicidad y para estudiar un caso ideal.

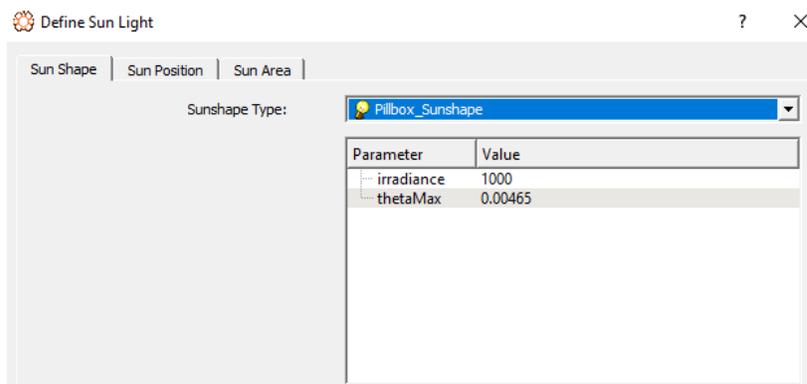


Figura 3.12: Parámetros de radiación

Para definir la radiación solar, se usa la herramienta Environment/Sun Light/Define Sun Light. En la Figura 3.12 se define la radiación solar, con un valor de irradiación de 1000 [w/m²], que coincide con el promedio de los datos de radiación observados por la data de los centros de estudio del Norte de Chile.

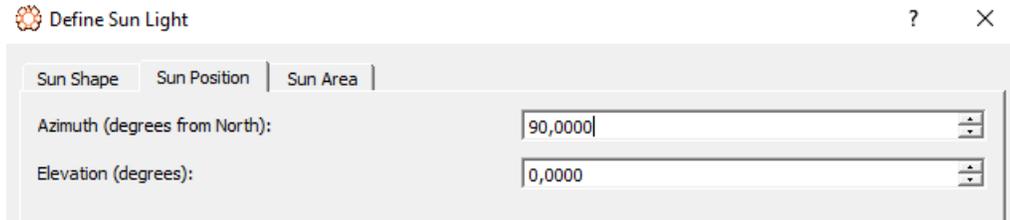


Figura 3.13: Posición del sol

En la Figura 3.13 se establecen los ángulos solares azimutal y cenital (elevación), importantes para el análisis realizado.

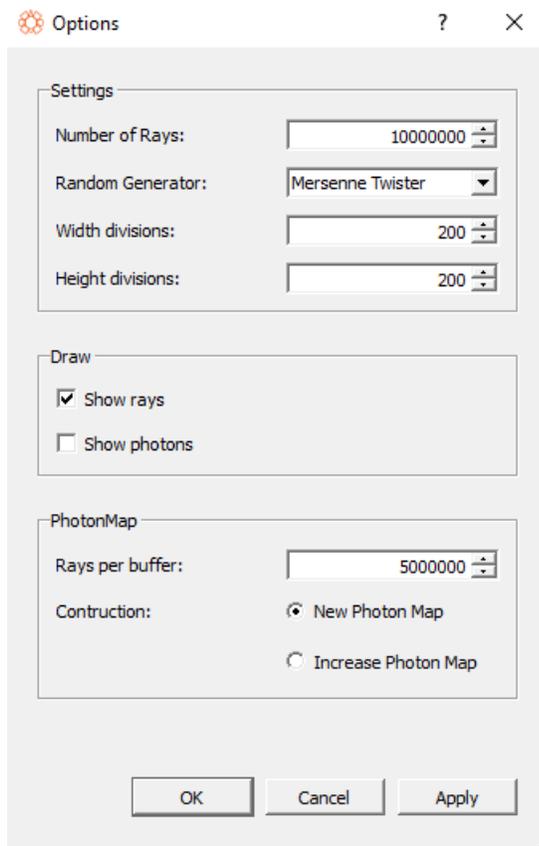


Figura 3.14: Opciones de trazado

Una vez definido lo anterior, establecemos las opciones del trazado de rayos como se ve en la Figura 3.14, fijando un número total de 10 millones de rayos, de manera que sean suficientes para realizar un estudio representativo. En el Anexo B se pueden observar los efectos de variar la cantidad de fotones generados en las simulaciones, definiendo el número de 10^7 fotones para simular debido a que en esta cantidad la curva de flujo energético ya converge a una forma más estable.

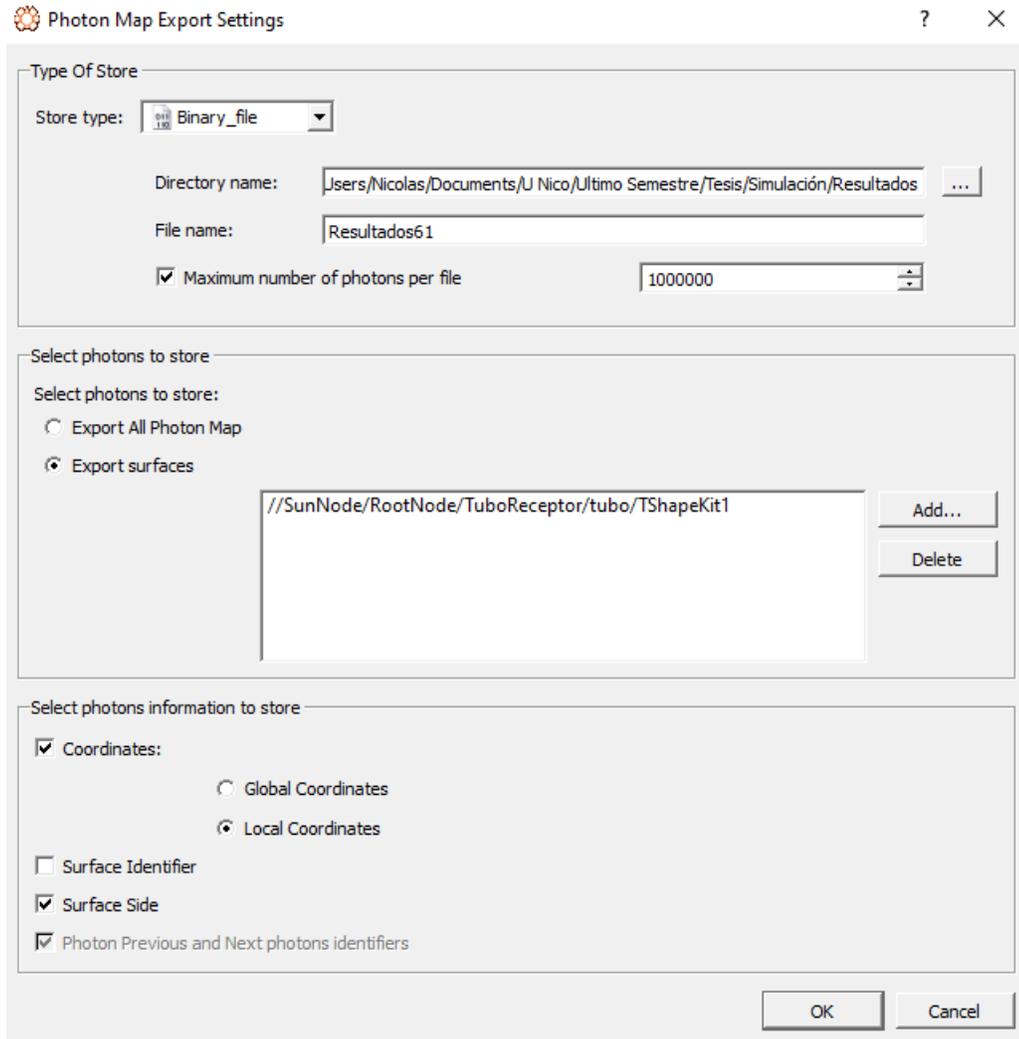


Figura 3.15: Exportación de datos

Hecho esto, podemos hacer correr la simulación (Figura 3.15), la cual tarda aproximadamente un minuto, trazando todos los rayos con las configuraciones establecidas y exportando inmediatamente los datos a archivos asociados al nombre puesto en File name en formato .dat, los cuales serán procesados para obtener las curvas características del sistema.



Figura 3.16: No exportación de datos

Para verificar que la configuración haya sido la deseada, se utiliza previamente la opción de Not export, como en la Figura 3.16. De esta forma, podemos tener una visualización previa del sistema, colocando en Ray Trace options trazar solamente hasta 300 rayos para poder observar, ya que más rayos no permiten hacerlo.

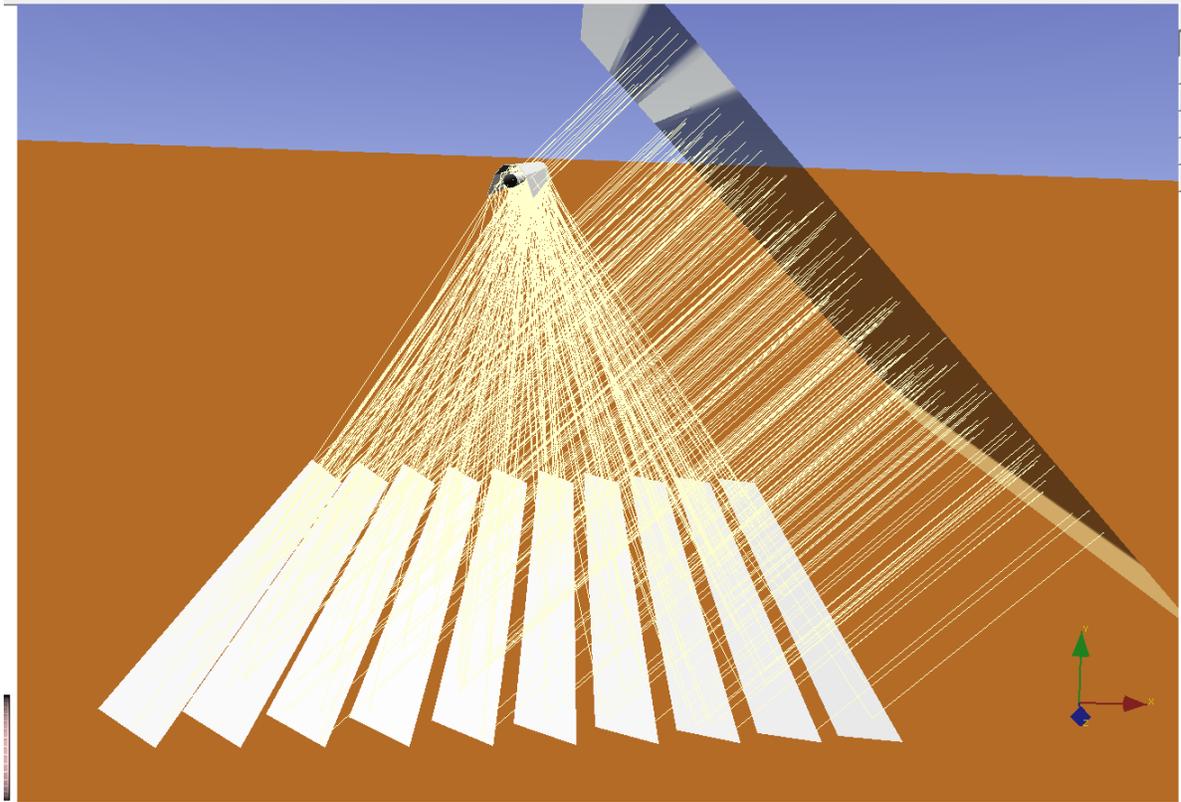


Figura 3.17: Vista previa de trazado de rayos

En el Anexo A se pueden apreciar las diferentes configuraciones de espejos del concentrador que fueron analizadas en la interfaz de Tonatiuh.

3.3. Procesamiento de datos obtenidos en simulación

Utilizando Wolfram Mathematica, luego de haber realizado todas las simulaciones, se determinaron las curvas de flujo de energía y rendimientos en base a diferentes configuraciones de ángulos, ajustando las curvas para tener la caracterización óptica del sistema y su influencia en el flujo energético en el tubo absorbedor.

Con el código cuyo detalle se encuentra en el Anexo C, se traducen los datos binarios exportados por Tonatiuh en las simulaciones generadas, transformando los datos de coordenadas cartesianas a polares para obtener los gráficos que representan el flujo energético a través del tubo absorbedor. Este código exporta los datos transformados en dos archivos, uno que contiene los ángulos del receptor con sus valores respectivos de flujo energético por unidad de área y el otro los valores finales de Uniformidad, D.E., D.E.N., Superficie con flujo, Eficiencia Óptica y Potencia generada por el sistema fresnel.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Caso Base

Para estudiar el colector y realizar simulaciones, se definió primeramente un caso base, que corresponde al primer diseño del concentrador Fresnel. Este tiene un módulo de ancho 6 m, con el tubo absorbedor ubicado a una altura de 4 m, teniendo el sol posicionado justo sobre el colector con ambos ángulos solares en 90° . A partir de la Figura 4.1 se realizan todas las variaciones:

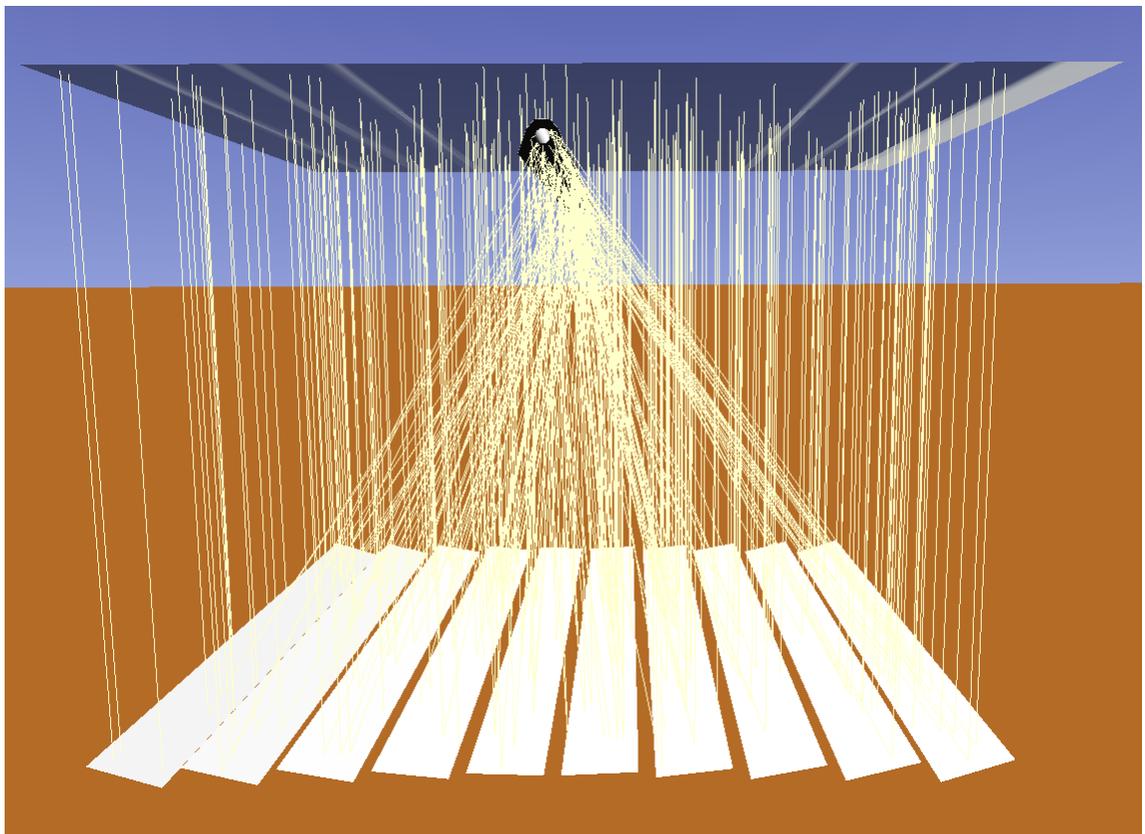


Figura 4.1: Modelamiento caso base

Definido este modelo, se proceden a hacer las simulaciones, variando la altura de receptor con $H = [3960\ 3980\ 4000\ 4020\ 4040]$ mm, de manera que se obtuvieron las siguientes curvas:

Flujo energético vs Ángulo

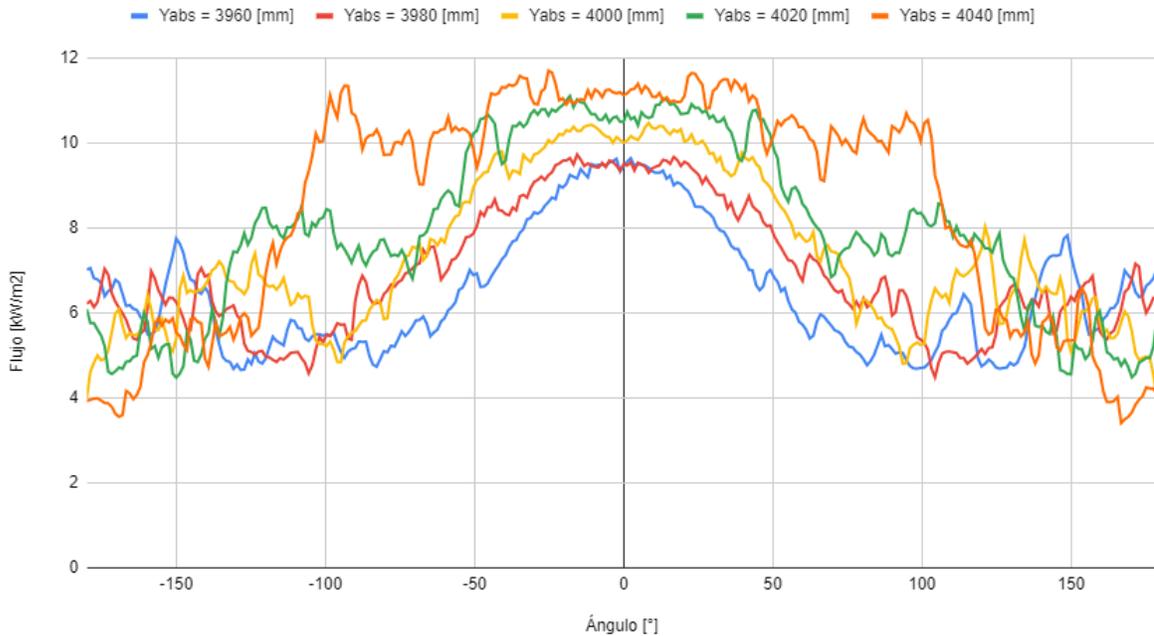


Figura 4.2: Flujo energético en el tubo receptor en el caso base

Se puede ver en la Figura 4.2 el flujo energético en diferentes ángulos del tubo receptor en la configuración base, generándose varias curvas a medida que cambia la altura del receptor, las cuales tienen un comportamiento bastante simétrico en este caso. Se observa que la mayor radiación se concentra en el ángulo 0° en este caso, es decir, en la parte inferior del tubo, y va aumentando a medida que crece H . Al ocurrir esto, simultáneamente la forma de la curva va cambiando ligeramente, generándose otros puntos de mayor flujo de energía que se acercan a los $\pm 100^\circ$. Se observa además que disminuye la uniformidad al crecer este parámetro en este caso.

Tabla 4.1: Valores estadísticos obtenidos en caso base

H[mm]	U.	D.E. [kW/m]	D.E.N.	S.F. %	E.O. %	P[kW]
3960	0.778	1.441	0.019	100 %	30.65 %	21.84
3980	0.786	1.482	0.018	100 %	32.74 %	23.33
4000	0.757	1.783	0.021	100 %	34.64 %	24.68
4020	0.744	2.033	0.022	100 %	37.41 %	26.66
4040	0.686	2.675	0.027	93 %	40.15 %	28.61

En la Tabla 4.1 se puede ver que la uniformidad decrece a medida que aumenta H , además de aumentar D.E. y por lo tanto D.E.N., manteniéndose en 100 % la superficie con flujo en todos los casos a excepción de $H=4040$ mm. Se observa además que la eficiencia óptica del colector aumenta al elevar la altura del tubo receptor, aumentando también la potencia generada.

4.2. Variación de ancho de módulo

Fijando la posición del sol definida y el número de espejos, se buscó con este experimento observar el efecto del ancho del módulo del concentrador, es decir, se probaron diferentes espaciados entre espejos para ver como se comporta la geometría de incidencia de rayos en el tubo absorbedor al cambiar los puntos de reflexión en el suelo, variando simultáneamente ,al igual que en el caso base de ancho de 6m de módulo, el valor de H.

Flujo energético vs Ángulo

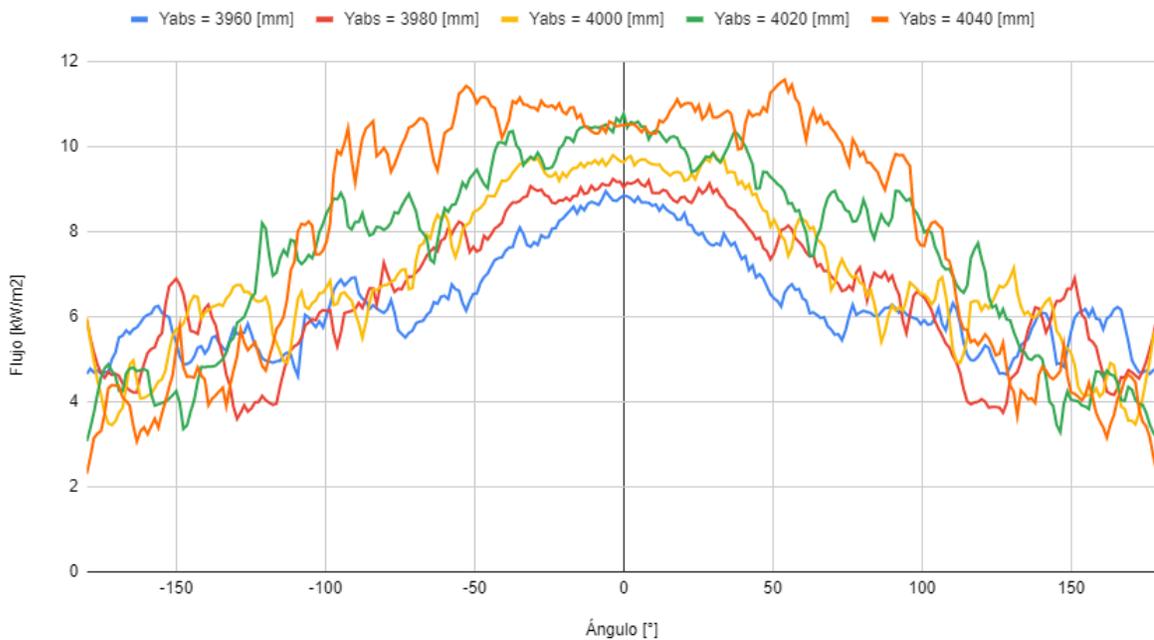


Figura 4.3: Flujo energético en colector de ancho de módulo 7m

En la Figura 7 se observan las curvas de flujo generadas y se puede observar un comportamiento bastante similar al caso original, excepto que parece mejorar un poco en el caso de la curva de H=3960 la uniformidad. Además, se observa que las curvas han decrecido un poco y ya no se aprecian crestas tan altas respecto al promedio.

Tabla 4.2: Valores estadísticos obtenidos en caso ancho de módulo 7m

H[mm]	U.	D.E. [kW/m]	D.E.N.	S.F. %	E.O. %	P[kW]
3960	0.815	1.179	0.016	100 %	29.93 %	21.33
3980	0.750	1.658	0.022	93.67 %	31.18 %	22.22
4000	0.744	1.795	0.022	96 %	33 %	23.52
4020	0.702	2.232	0.026	92.33 %	35.35 %	25.18
4040	0.630	2.947	0.033	89.33 %	37.46 %	26.69

En la Tabla 4.2 se tienen los valores obtenidos al procesar los datos exportados de la simulación, los cuales indican que en el caso de $H=3960$ hay una mejora en la uniformidad, disminución de D.E. y D.E.N., se mantiene en 100 % la S.F. pero bajan ligeramente la E.O. y la potencia generada. En el resto de las curvas, a medida que aumenta H , ocurre la misma tendencia que en el caso de ancho de módulo 6m, pero S.F. toma valores distintos de 100 %, siendo 96 % el más alto en el caso de $H=4000$. Cabe destacar que se obtienen valores más bajos de E.O. y P que en el caso anterior.

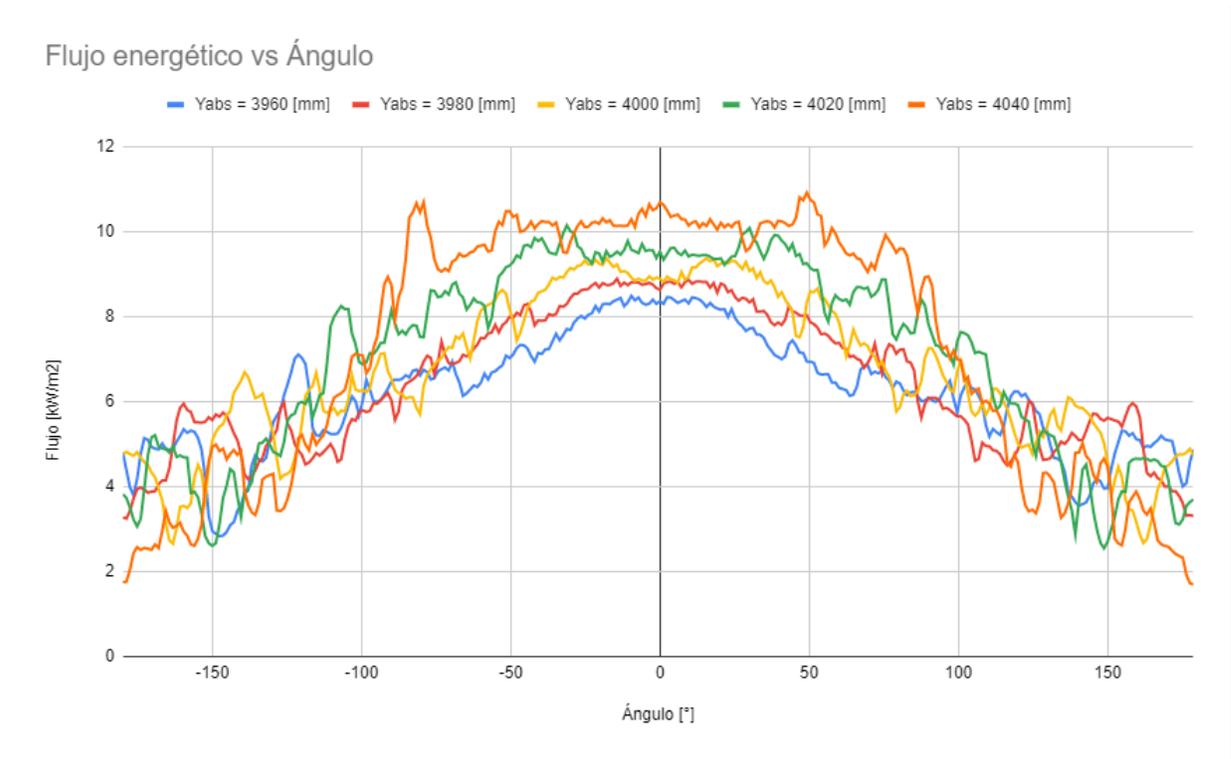


Figura 4.4: Flujo energético en colector de ancho de módulo 8m

En la Figura 4.4 se aprecian las curvas generadas en el módulo de ancho 8m, en la que se ve nuevamente se mantiene la tendencia anterior, disminuyendo aún más los valores de flujo energético en el tubo receptor, tendiendo a un valor casi constante a medida que aumenta H entre los $\pm 100^\circ$.

Tabla 4.3: Valores estadísticos obtenidos en caso ancho de módulo 8m

H[mm]	U.	D.E. [kW/m]	D.E.N.	S.F. %	E.O. %	P[kW]
3960	0.777	1.384	0.020	92.33 %	29.17 %	20.78
3980	0.751	1.603	0.022	94.33 %	30.26 %	21.56
4000	0.731	1.797	0.024	92.67 %	31.46 %	23.52
4020	0.680	2.268	0.028	86 %	33.33 %	25.18
4040	0.585	2.992	0.037	77.67 %	33.92 %	26.69

En la Tabla 4.3 se encuentran los valores obtenidos en este caso, en los que se ve que

la uniformidad disminuye cada vez más debido a que los rayos ya no alcanzan a llegar a los ángulos más extremos del tubo (parte superior). Complementando con la Figura 4.4, la eficiencia óptica cae más al igual que la S.F. junto con la potencia generada por el colector.

4.3. Variación de ángulo azimutal

En este tipo de experimento se utiliza el caso base, fijando el módulo de 6m y $H=4000$, con la diferencia de que a diferentes ángulos de elevación se les hizo simulaciones con diferentes ángulos azimutales para estudiar el efecto de la posición del sol en el concentrador, emulando lo que serían diferentes horas del día y estaciones del año.

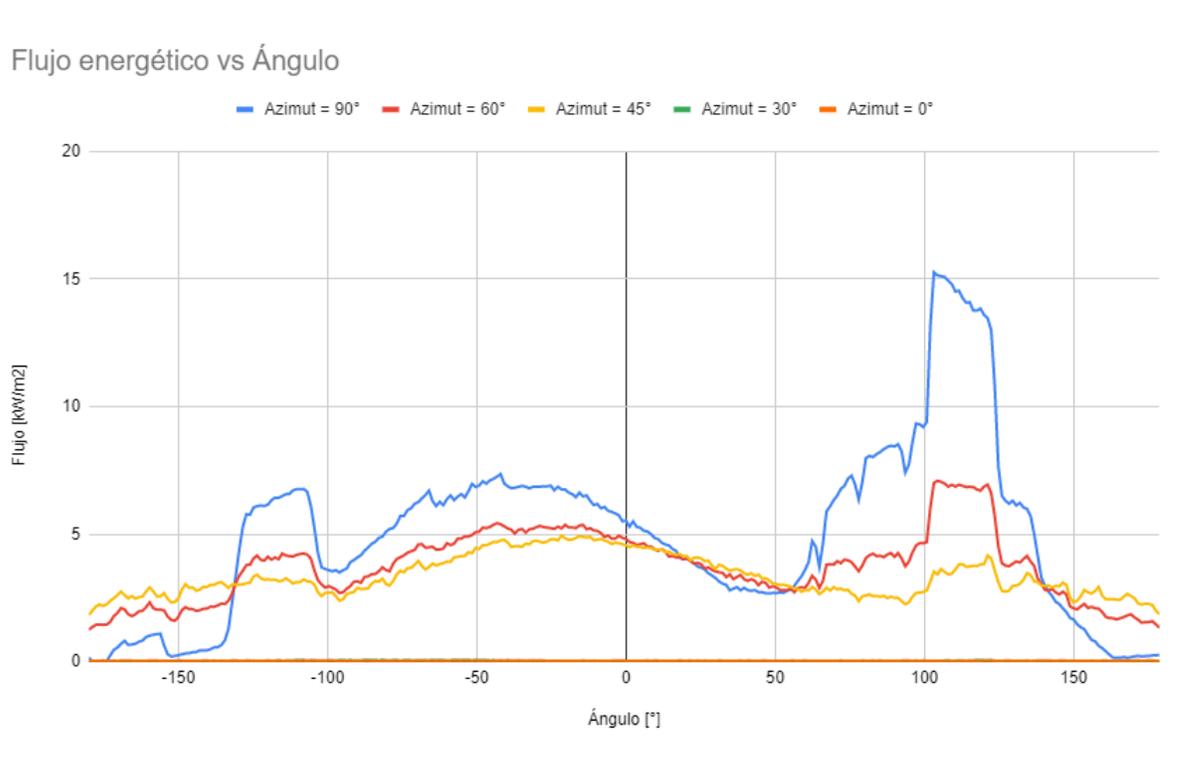


Figura 4.5: Flujo energético en tubo receptor con elevación de 0°

En la Figura 4.5 se puede observar un comportamiento muy diferente al visto antes, puesto que el sol ya no está posicionado exactamente sobre el colector, de manera que se ve en las curvas que el flujo energético se concentra a un costado del tubo receptor, que en este caso corresponde a los $+120^\circ$, perdiéndose la simetría del caso base. Se ve además que entre el azimutal 0° y 30° el flujo energético que llega al tubo es prácticamente nulo.

Tabla 4.4: Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 0°

H[mm]	U.	D.E. [kW/m]	D.E.N.	S.F. %	E.O. %	P[kW]
Azimut = 90°	0.300	3.461	0.062	59.67 %	23.25 %	16.57
Azimut = 60°	0.634	1.373	0.033	45.67 %	17.65 %	12.58
Azimut = 45°	0.764	0.791	0.021	23.67 %	15.76 %	11.23
Azimut = 30°	0.149	0.027	0.076	0 %	0.15 %	0.11
Azimut = 0°	0.884	1.673	0.010	0 %	0.24 %	0.17

En la Tabla 4.4 se tienen los elementos estadísticos asociados a este caso, en el que se puede apreciar que el azimutal = 90° tiene la mayor dispersión de datos debido a su D.E. y D.E.N., además de una uniformidad bastante baja. La S.F. no supera el 59,67 % , junto con la E.O. de un 23.25 % y P=16.57 kW, valores que van disminuyendo a medida que el azimutal va decreciendo hasta 0°, coincidiendo con la Figura 4.5 que indica que el flujo energético tiende a anularse.

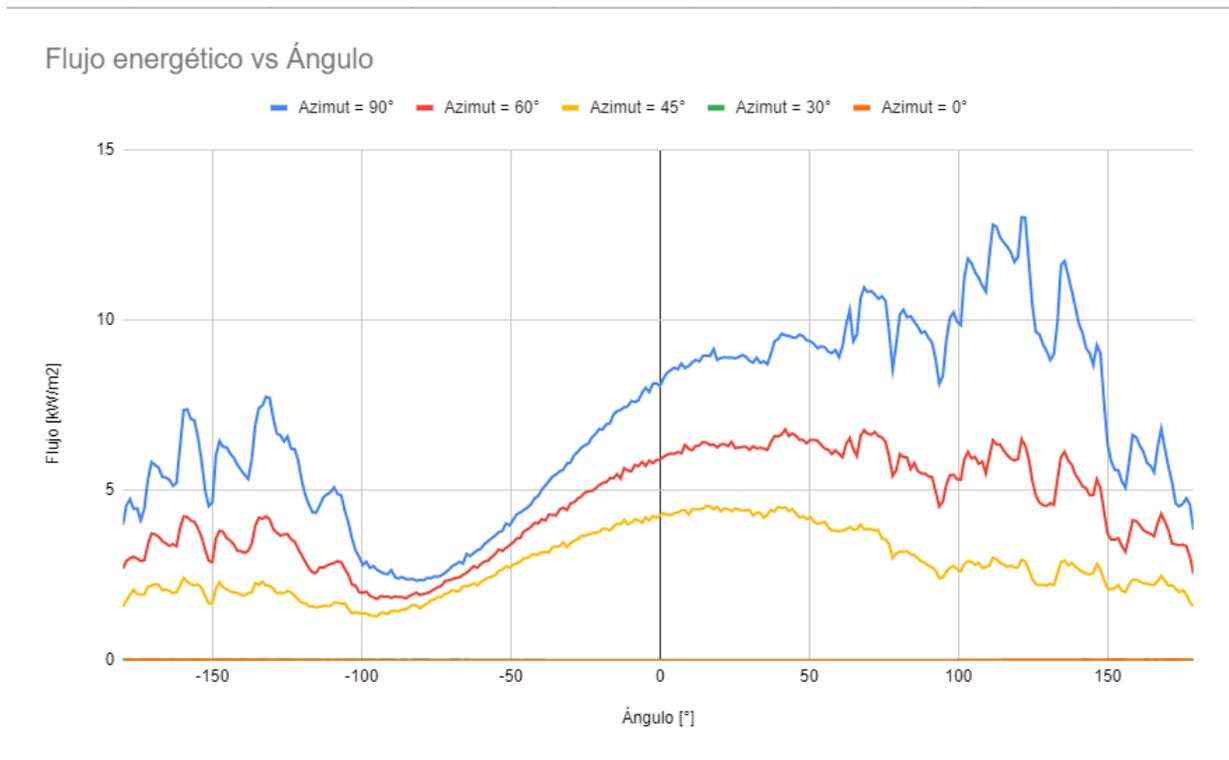


Figura 4.6: Flujo energético en tubo receptor con elevación de 15°

Se puede ver en la Figura 4.6 que al elevarse un poco el sol empieza a correrse la curva hacia el centro, ya teniendo sus peaks más cerca de los +100°, con un comportamiento un poco más uniforme, además de elevarse también la cantidad de flujo energético incidente en el receptor.

Tabla 4.5: Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 15°

H[mm]	U.	D.E. [kW/m]	D.E.N.	S.F. %	E.O. %	P[kW]
Azimut = 90°	0.611	2.741	0.035	84.67 %	33.10 %	23.59
Azimut = 60°	0.667	1.499	0.030	57.67 %	21.20 %	15.11
Azimut = 45°	0.658	0.967	0.030	19.33 %	13.30 %	9.48
Azimut = 30°	0.046	0.008	0.085	0 %	0.04 %	0.03
Azimut = 0°	-0.171	1.673	0.104	0 %	0.05 %	0.04

En la Tabla 4.5 se puede ver que la uniformidad aumenta considerablemente con el ángulo de elevación, sin embargo el valor de uniformidad tiende a tomar valores negativos en el azimutal = 0°, al igual que tienden a anularse los otros valores en este azimutal. La tendencia de los números es igual al caso anterior, con la diferencia de que los valores han aumentado.

Flujo energético vs Ángulo

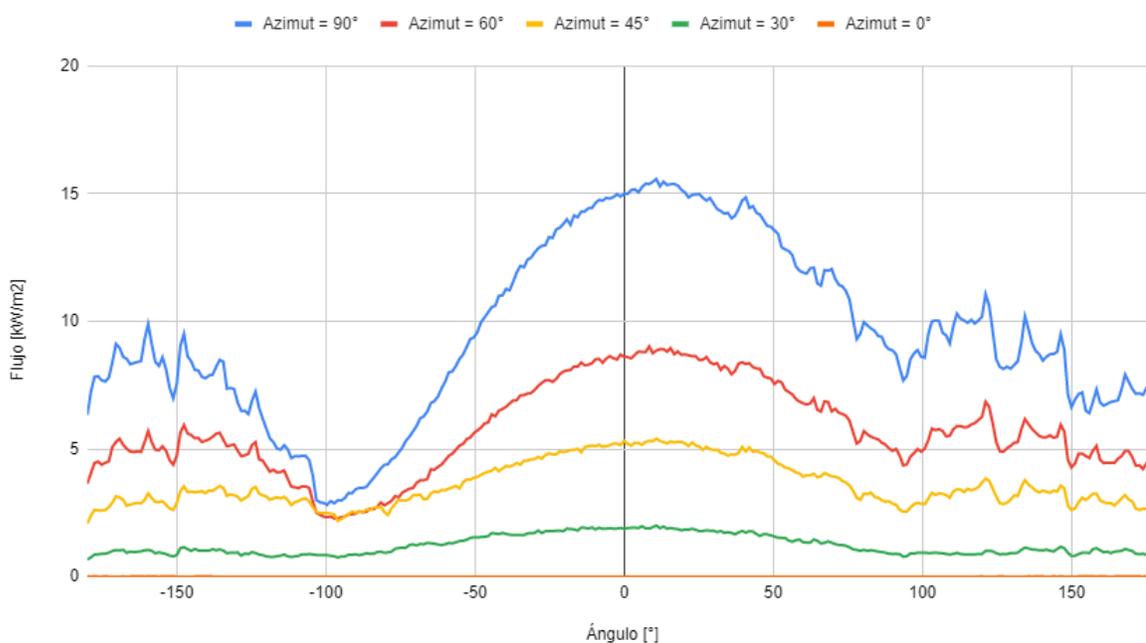


Figura 4.7: Flujo energético en tubo receptor con elevación de 30°

En la Figura 4.7 se observa que las curvas se han centrado bastante más, aún con ausencia de un comportamiento simétrico, en el que se ve un peak de flujo hacia los +30° del tubo absorbedor y un segundo peak menor en los -150°, llegando el primer peak a valores más altos de flujo energético que los casos anteriores. Por otro lado, la curva de azimutal = 30° deja de ser nula, aunque sigue con valores muy bajos.

Tabla 4.6: Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 30°

H[mm]	U.	D.E. [kW/m]	D.E.N.	S.F. %	E.O. %	P[kW]
Azimut = 90°	0.636	3.464	0.032	94 %	44.79 %	31.92
Azimut = 60°	0.689	1.788	0.028	85.67 %	27.00 %	19.24
Azimut = 45°	0.753	0.896	0.022	30.33 %	17.06 %	12.16
Azimut = 30°	0.687	0.387	0.028	0 %	5.82 %	4.14
Azimut = 0°	-0.198	0.006	0.107	0 %	0.02 %	0.02

En la Tabla 4.6 se observa que se han elevado los valores de uniformidad en todos los ángulos, aunque con una gran dispersión en el azimutal de 90°, cuyos valores porcentuales aumentaron considerablemente junto con la potencia generada. Estos valores mencionados van disminuyendo hasta anularse a medida que se acercan a los 30° del azimutal, aunque este caso empieza a tomar valores diferentes de 0.

Flujo energético vs Ángulo

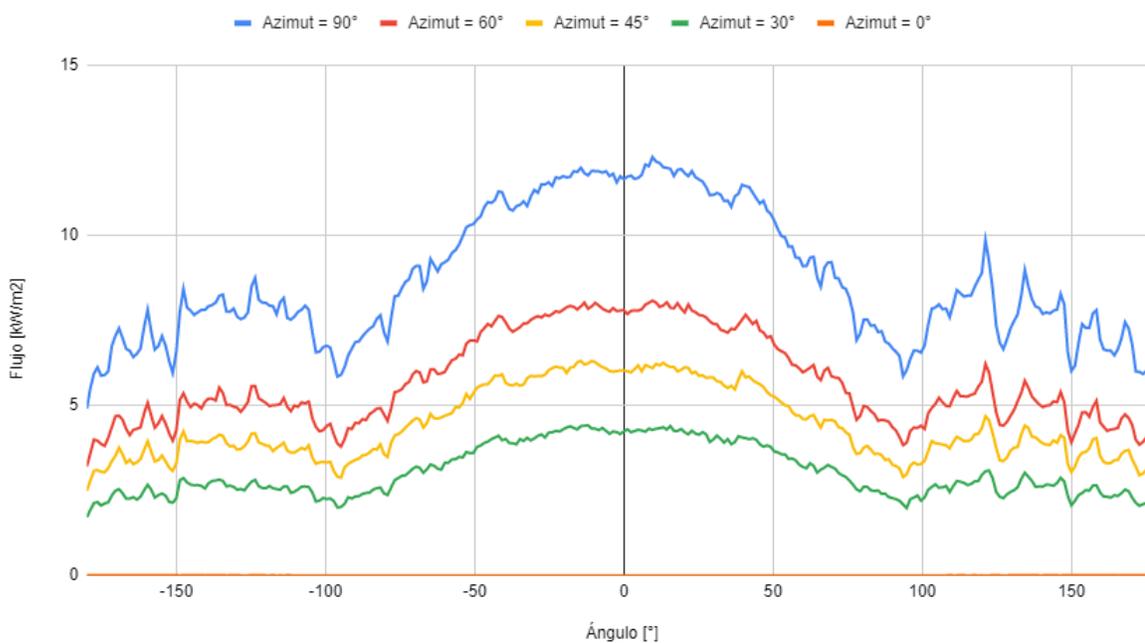


Figura 4.8: Flujo energético en tubo receptor con elevación de 45°

En la Figura 4.8 ya se logra observar un comportamiento muy simétrico similar al caso base, en el que todas las curvas, exceptuando la de azimutal 0°, tienen valores considerables, aunque ya no tan altos como en el caso de elevación de 30°. Se observa también mayor uniformidad.

Tabla 4.7: Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 45°

H[mm]	U.	D.E. [kW/m]	D.E.N.	S.F. %	E.O. %	P[kW]
Azimut = 90°	0.774	1.970	0.020	100 %	40.95 %	29.18
Azimut = 60°	0.765	1.343	0.021	94 %	26.90 %	19.17
Azimut = 45°	0.760	1.057	0.021	51 %	20.74 %	14.78
Azimut = 30°	0.750	0.761	0.022	21.33 %	14.32 %	10.21
Azimut = 0°	-0.175	0.006	0.105	0 %	0.02 %	0.02

En la Tabla 4.7 se comprueban los valores de uniformidad observados en el gráfico, que corrobora que tienen comportamientos muy similares entre curvas. Sin embargo, S.F., E.O. y P tienden a ir disminuyendo a medida que decrece el azimutal debido a que cada vez llegan menos rayos al tubo absorbedor.

Flujo energético vs Ángulo

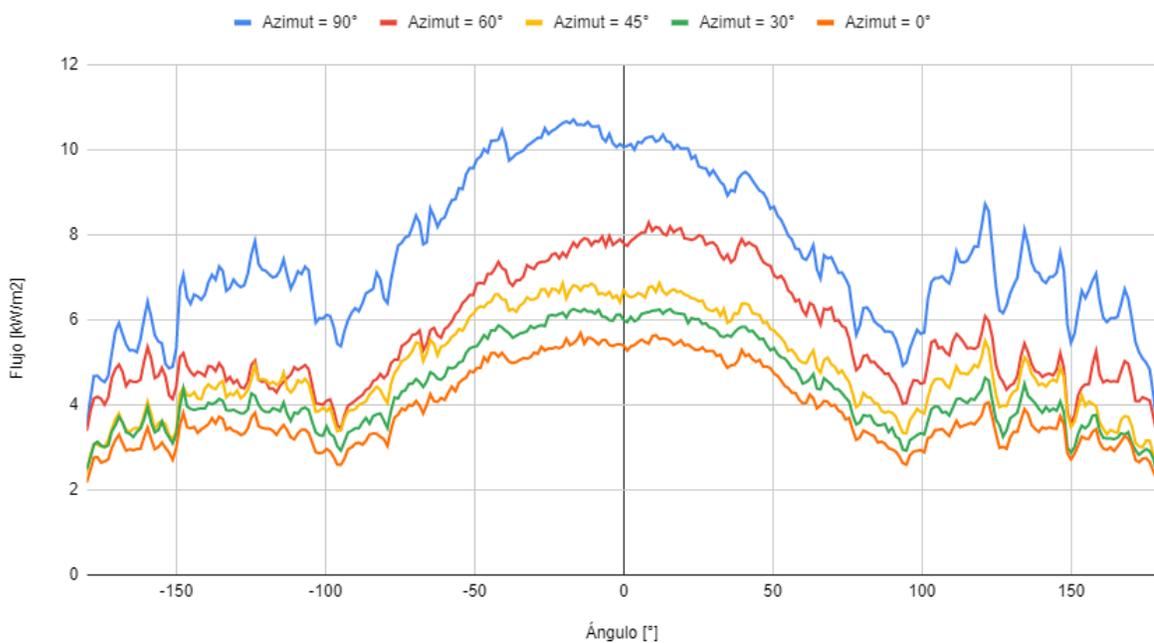


Figura 4.9: Flujo energético en tubo receptor con elevación de 60°

En la Figura 4.9 se ve un comportamiento muy parecido al anterior, con la diferencia de que las curvas han disminuido su valor de flujo y además tienden a acercarse, es decir, a tomar los mismos valores, conservando la tendencia a la simetría en el tubo absorbedor. Además, la curva de azimutal = 0° ya deja de ser nula y es muy cercana a la de 30°.

Tabla 4.8: Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 60°

H[mm]	U.	D.E. [kW/m]	D.E.N.	S.F. %	E.O. %	P[kW]
Azimut = 90°	0.768	1.764	0.021	99.33 %	35.78 %	25.50
Azimut = 60°	0.758	1.376	0.022	96 %	26.76 %	19.07
Azimut = 45°	0.763	1.164	0.021	74.33 %	23.07 %	16.44
Azimut = 30°	0.78	1.069	0.022	51.67 %	20.75 %	14.79
Azimut = 0°	0.757	0.956	0.022	38.67 %	18.47 %	13.16

En la Tabla 4.8 se aprecia que los valores de todas las curvas tienden a parecerse, sobre todo en la uniformidad, en la que en este caso la de azimutal = 0° deja de ser negativa y toma un valor parecido al resto. Lo mismo ocurre con la D.E. y D.E.N., manteniendo la tendencia del resto de los números a ser decrecientes junto con el azimutal, pero ya sin decaer drásticamente y sin anularse.

Flujo energético vs Ángulo

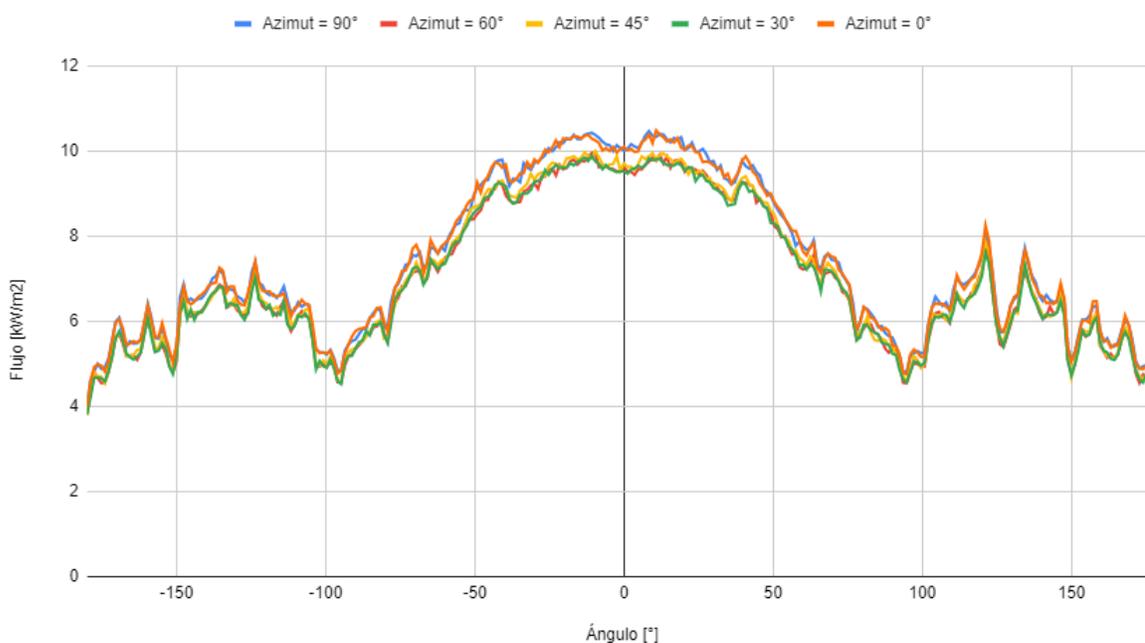


Figura 4.10: Flujo energético en tubo receptor con elevación de 90°

En la Figura 4.10 se ve que las curvas tienden a ser prácticamente iguales, debido a que el sol ya está absolutamente sobre el concentrador, no hay mucho efecto en el cambio del azimutal, disminuyendo un poco más el valor del flujo pero tendiendo a ser uniforme y estable.

Tabla 4.9: Valores estadísticos obtenidos en caso elevación 90°

H[mm]	U.	D.E. [kW/m]	D.E.N.	S.F. %	E.O. %	P[kW]
Azimut = 90°	0.757	1.783	0.021	100 %	34.64 %	24.7
Azimut = 60°	0.758	1.690	0.022	99.33 %	32.84 %	23.4
Azimut = 45°	0.757	1.711	0.022	99.33 %	33.14 %	23.6
Azimut = 30°	0.758	1.685	0.022	99.33 %	32.80 %	23.4
Azimut = 0°	0.758	1.780	0.022	100 %	34.62 %	24.7

En la Tabla 4.9, corroborando con la Figura 4.10, se ve que las curvas son casi exactamente iguales, llegando a tener prácticamente los mismos valores estadísticos y con una superficie de flujo de 100 %.

4.4. Variación de ángulo de elevación

En este único experimento se busca fijar el ángulo azimutal a 90° y las dimensiones del colector como antes, es decir, el sol estando en el plano x-y, variando exclusivamente el ángulo de elevación para estudiar su efecto. Esto para estudiar exclusivamente el comportamiento del concentrador en respuesta al movimiento del sol en el plano ya mencionado, simulando que el concentrador estuviera orientado de esta forma respecto de los diferentes ángulos del sol.

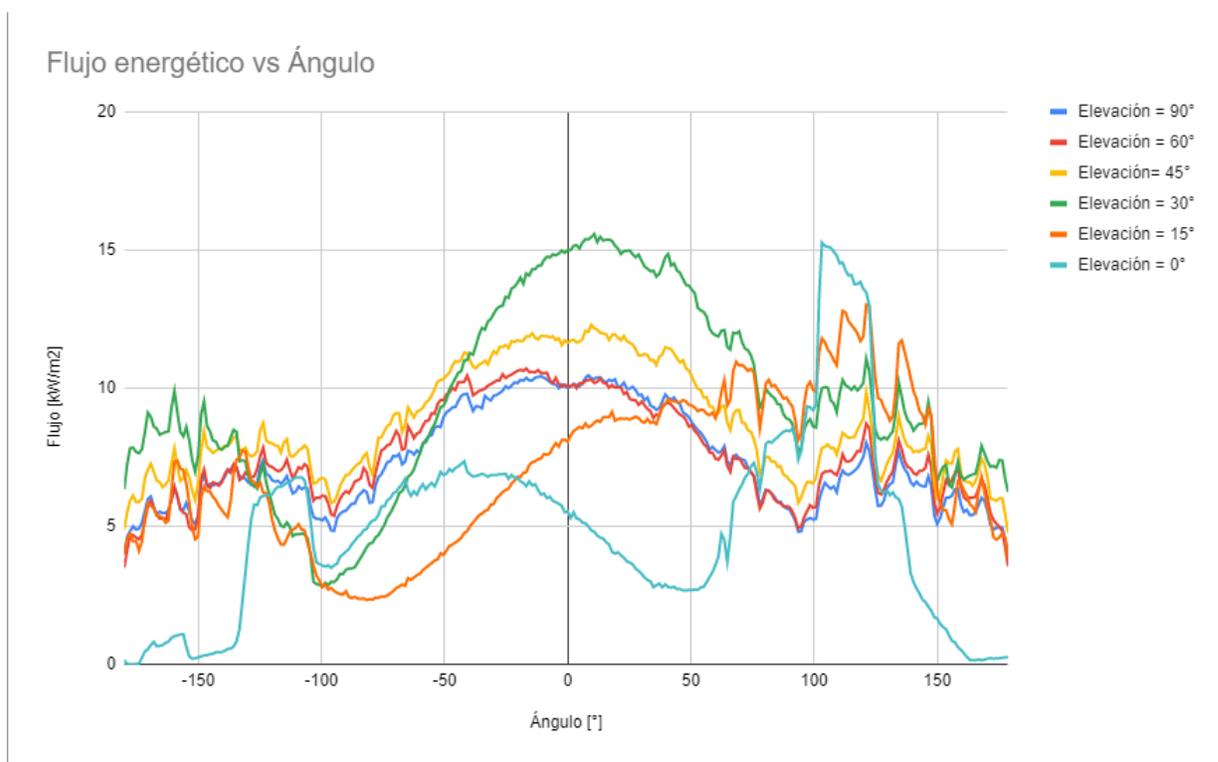


Figura 4.11: Flujo energético en tubo receptor con ángulo azimutal de 90°

En la Figura 4.11 se pueden ver todas las curvas anteriormente vistas con azimutal = 90°, con la diferencia de que están acopladas según su ángulo de elevación, simulando lo que

sería diferentes horas del día hasta el peak de radiación solar. Se puede ver que a medida que va aumentando el ángulo de elevación el peak de radiación se va corriendo desde los +150° hasta el centro (0°), llegando a su valor más alto de flujo energético en los 30° de elevación y tendiendo a estabilizarse disminuyendo un poco hacia los 90°, logrando el mayor nivel de uniformidad.

Tabla 4.10: Valores estadísticos obtenidos en caso azimutal 90°

H[mm]	U.	D.E. [kW/m]	D.E.N.	S.F. %	E.O. %	P[kW]
Elevación = 90°	0.757	1.783	0.021	100 %	34.64 %	24.68
Elevación = 60°	0.768	1.764	0.021	99.33 %	35.78 %	25.50
Elevación = 45°	0.774	1.970	0.020	100 %	40.95 %	29.18
Elevación = 30°	0.636	3.464	0.032	94 %	44.79 %	31.92
Elevación = 15°	0.611	2.741	0.035	84.67 %	33.10 %	23.59
Elevación = 0°	0.300	3.461	0.062	59.67 %	24.25 %	16.57

En la Tabla 4.10 se observa que la uniformidad tiende a crecer a medida que el sol se eleva hasta ponerse sobre el concentrador, disminuyendo su dispersión de flujo energético y aumentando su la S.F. Los valores de E.O. y P tienen sus peak en la elevación de 30° y van disminuyendo hacia los demás ángulos de forma progresiva.

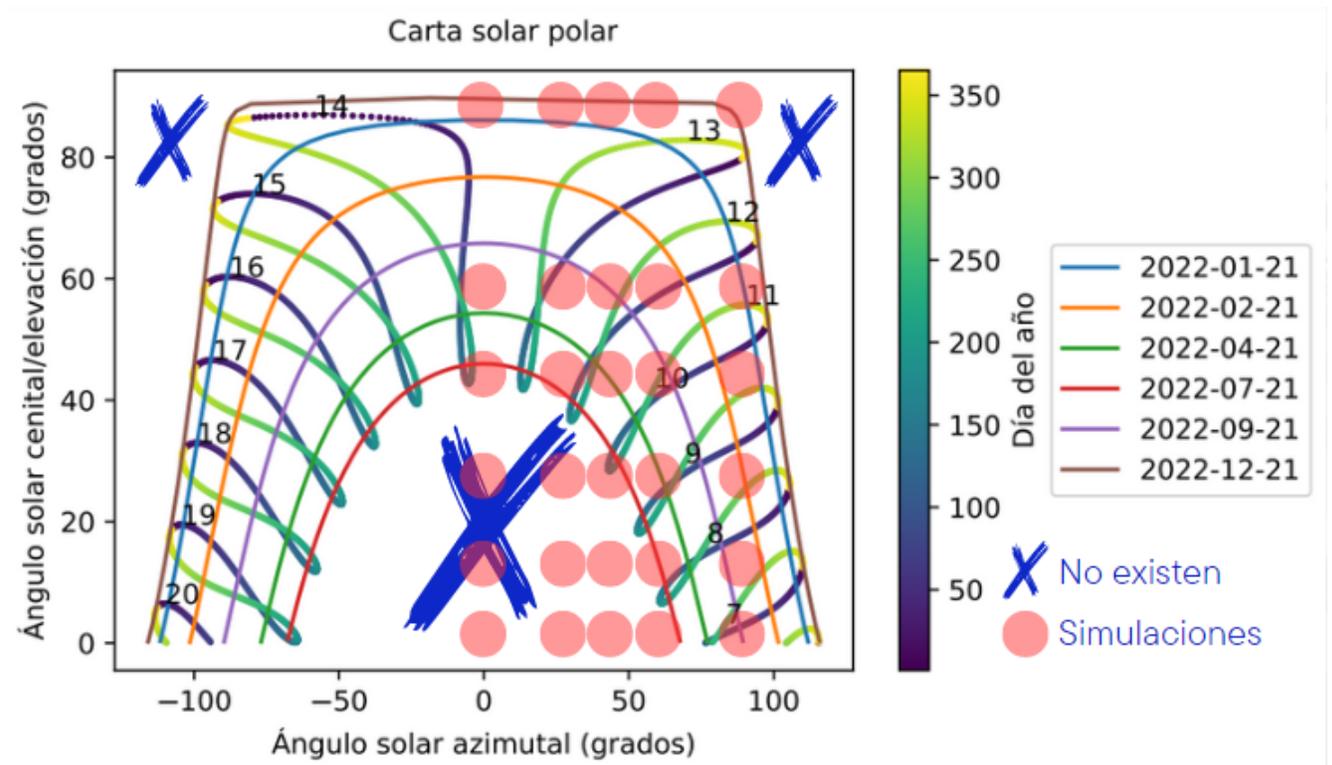


Figura 4.12: Gráfica de posiciones del sol

Se observa en la Figura 4.12 que las zonas blancas marcadas con una *equis* azul son aquellas combinaciones de ángulos que nunca ocurrirán durante el año en esta zona de la Tierra,

mientras que las curvas de colores describen por donde sí pasará el sol dependiendo de la época del año y hora del día. Por otro lado, los *círculos* rojos indican las posiciones del sol que fueron simuladas en Tonatiuh, siendo entonces la intersección de estas zonas rojas con las curvas de colores la zona de simulaciones de casos reales en la región de Atacama. De esta forma se determina que el invierno resulta la estación más desfavorable para el concentrador dado que el sol se posiciona entre el azimutal 60° y -60° aprox, lo que según los casos estudiados muestra que la potencia generada se ve reducida, además de alcanzar una altura máxima de 40° de elevación. En caso contrario, en verano el sol se mueve en azimuth cercanos a 90° y -90° , lo que ya fue visto como lo más favorable para el concentrador, alcanzando la máxima de elevación de 90° después del mediodía. De esta forma, se deben considerar todos los ángulos estudiados y, dependiendo de la época de interés, importa solamente el rango de ángulos en que se mueve el sol en tal estación del año para revisar sólo las simulaciones en esos ángulos.

4.5. Variación de número de espejos

En este experimento se mantiene la posición del sol sobre el colector (elevación 90°) y la altura del receptor a 4 m, junto con el ancho de módulo de 6 m. Se busca comparar el efecto de discretizar el campo de espejos reflectores, desde 4 hasta 20 espejos, para observar su efecto en la eficiencia del concentrador y el flujo energético producido en cada caso.

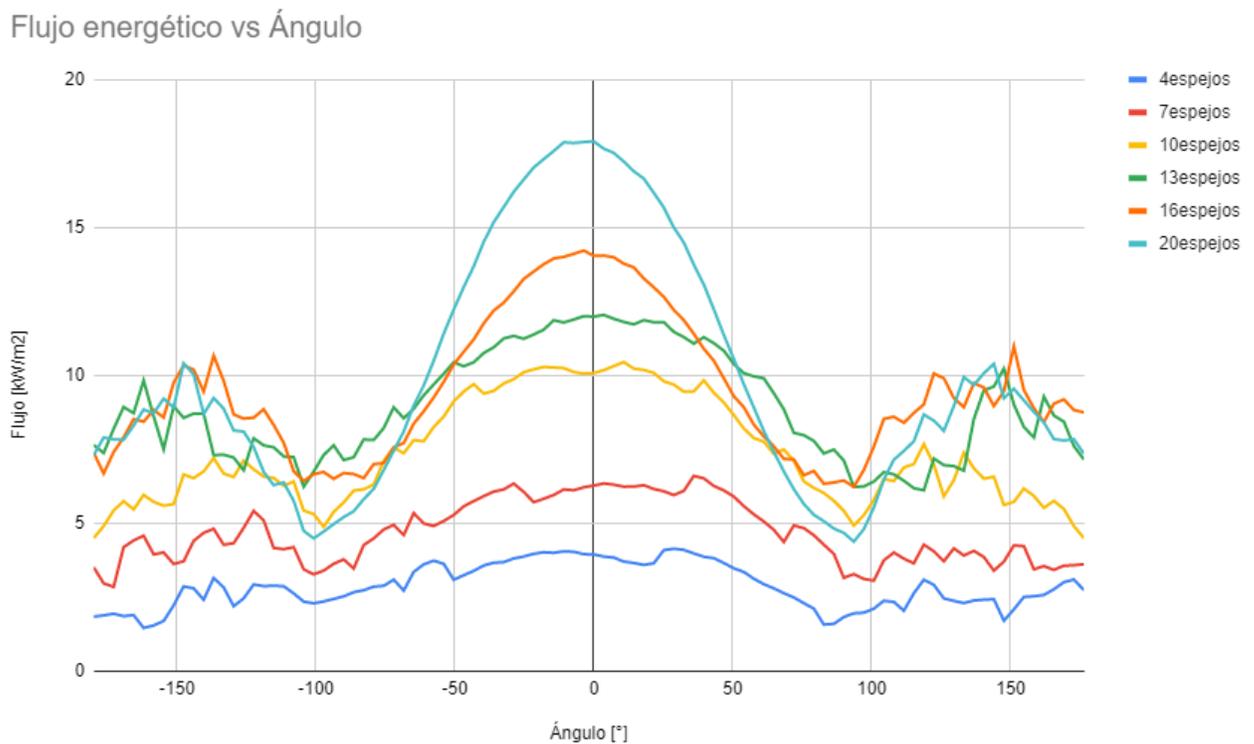


Figura 4.13: Flujo energético en tubo receptor según número de espejos

Se observa en la Figura 4.13 que hay un nivel de uniformidad que se mantiene al aumentar los espejos, pero a partir de los 13 comienza a disminuir rápidamente este parámetro, gene-

rándose una cresta cada vez más pronunciada. Por otro lado, se producen cada vez mayores niveles de flujo energético en cada uno de los ángulos del tubo receptor, es decir, la energía que recibe el concentrador se eleva continuamente.

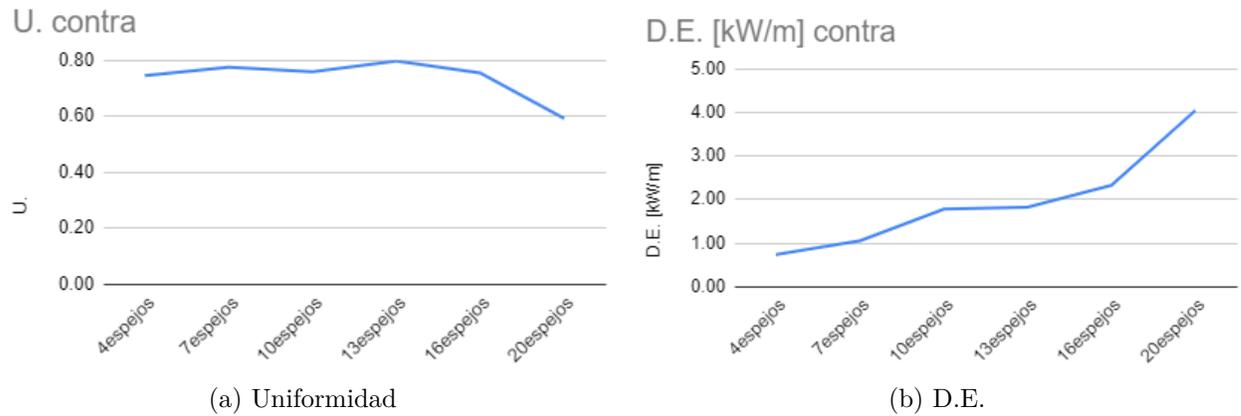


Figura 4.14: Variables estadísticas según número de espejos

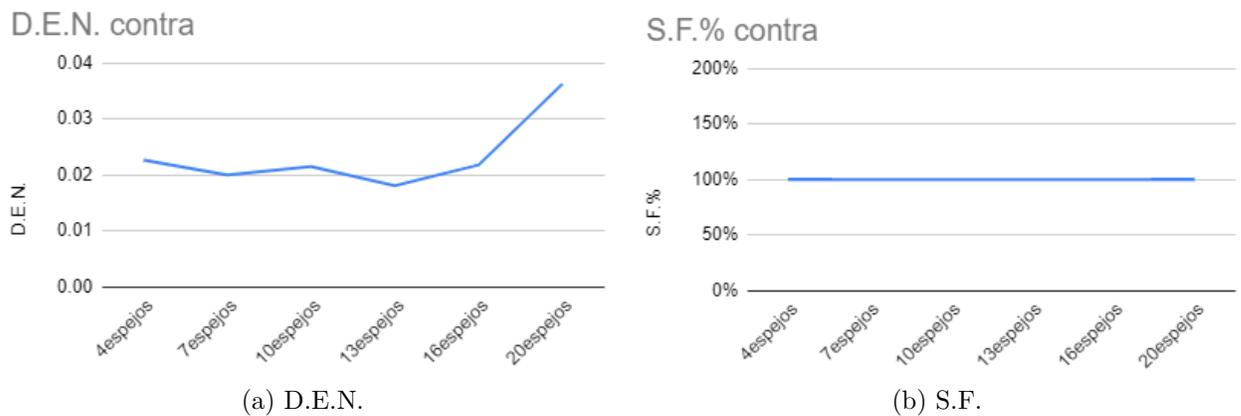


Figura 4.15: Variables estadísticas según número de espejos

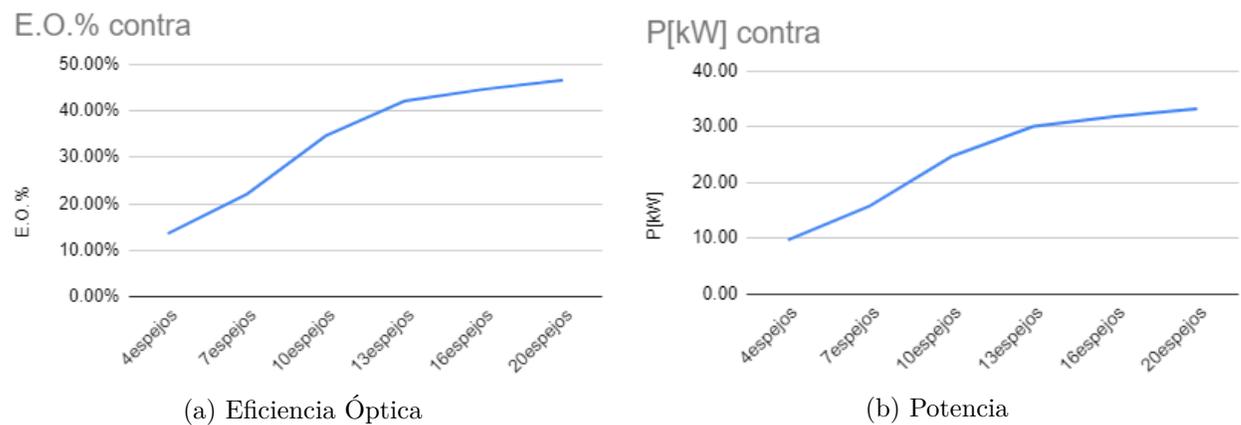


Figura 4.16: Variables estadísticas según número de espejos

Como se puede observar en los gráficos anteriores (Figuras 4.14, 4.15 y 4.16), la uniformidad a partir de los 13 espejos comienza a disminuir considerablemente. Por otro lado, la eficiencia óptica y la potencia generada aumentan casi linealmente hasta los 20 espejos, disminuyendo la pendiente después de los 13 espejos también.

Capítulo 5

Resumen de Resultados y Conclusiones

5.1. Resumen de Resultados

Se puede observar de los análisis lo siguiente:

- Una vez que el sol tiene un suficiente grado de elevación cenital, las curvas de flujo energético tienden a volverse simétricas, de manera que llegue la misma cantidad de energía a ambos lados del tubo receptor respecto a su centro.
- Las curvas no tienen una forma tan ordenada y fluida debido a que los espejos reflectores son elementos discretos y separados, por lo que los fotones van tomando diferentes ángulos de reflexión y caen en distintos puntos del receptor de forma un poco más desordenada respecto a como se comportaría en un concentrador de tipo cilindro parabólico, que posee un único elemento espejo reflector continuo, cuya geometría refleja todos los fotones al mismo punto exactamente, lo que implica una mayor eficiencia óptica.
- La cantidad de flujo energético va aumentando a medida que crece la altura a la que está posicionado el tubo receptor, probablemente porque que se acerca al reflector secundario y así se disminuyen las pérdidas debidas a fotones que no alcanzan a incidir.
- Se logra observar que la uniformidad tiene a depender no tanto de la altura del receptor, si no más bien de la posición del sol, es decir, del ángulo de elevación y el azimutal, pues estos determinan cambios mucho más drásticos en su valor.
- De todos los módulos analizados, se observa que el de 6m es el que mejor eficiencia muestra, puesto que al separar los espejos la reflexión de los rayos comienza a dispersarse más, así como también con la distancia al tubo receptor, por lo que el caso base muestra ser el que mayor potencia produce.
- Cuando el ángulo de elevación es 0° y 15° se produce una asimetría en el flujo energético en el tubo, esto debido probablemente a la sombra que se forma entre espejos, impidiendo que los rayos se reflejen en todos los espejos, orientándose hacia un sólo lado del tubo receptor.
- Cuando el azimutal es de 0° y de 30° es cuando se produce la menor cantidad de radiación incidente en el tubo receptor, puesto que el sol ya está completamente fuera del plano

x-y en el que está orientado el concentrador fresnel, por lo que los rayos se reflejan fuera del colector en gran parte. Esto implica que es la posición del sol más desfavorable para el sistema.

- En varios casos la S.F. es menor a 100 % pero aún así las curvas se mantienen continuas, esto es debido a que en el código computacional se filtran estos elementos que no llegan al receptor de manera que se generen las curvas de los fotones que sí llegan.
- El ángulo más favorable muestra ser el de elevación de 30° y azimutal de 90° , pues en este se consigue el valor más alto de potencia generada con 31.92 kW y eficiencia óptica de 44.79 %. Esto indica que durante el amanecer se produce la mayor potencia.

5.2. Conclusiones

Este trabajo se caracterizó la distribución del flujo energético incidente en el tubo absorbedor de un concentrador solar de tipo fresnel, probando diferentes configuraciones del mismo, cambiando la separación entre los espejos reflectores, la altura del tubo receptor y revisando el efecto de las posiciones del sol en esta radiación incidente.

Se puede observar que el caso más favorable y de mayor producción de potencia dentro del rango de parámetros estudiado ocurre en un ancho de módulo de 6m, con una altura de 4040mm, un ángulo de elevación de 30° y azimutal de 90°.

El caso en el que el colector funciona con su rendimiento más bajo ocurre en el módulo de 8m, con altura de 3960mm, azimutal de 0° hasta elevaciones menores a 90°.

Por otro lado, se ha determinado con el experimento de variación de número de espejos que conviene diseñar este concentrador con un número cercano a 13 espejos, puesto que aunque aumente la eficiencia y potencia al discretizar más el campo de espejos reflectores, la uniformidad va disminuyendo, lo que disminuiría la vida útil del tubo receptor al aumentar los esfuerzos térmicos de éste.

Dado lo anterior, se puede concluir que conviene diseñar el concentrador con módulos lo más estrechos posibles, pues así se puede aumentar la cantidad de rayos reflejados hacia el tubo receptor, logrando una mejor uniformidad y eficiencia óptica, además de elevar lo más posible el tubo receptor. Mientras los espejos no se toquen entre sí para poder rotar libremente, se puede estrechar cuánto se quiera.

Cabe destacar que en la potencia producida no sólo influye la radiación solar incidente, puesto que en horas en que está la mayor cantidad de rayos solares, no siempre se obtiene la mayor cantidad de fotones en el receptor. Esto ocurre debido a los ángulos de reflexión que se dan con los espejos, los cuales se dispersan dependiendo del caso. Además, el reflector secundario produce sombra y los mismos espejos también dependiendo de la posición del sol, sobre todo a bajos ángulos de elevación.

Finalmente, con la configuración dicha se logra alargar la vida útil del concentrador Fresnel, puesto que ven reducidos los esfuerzos térmicos a los que se somete el tubo absorbedor como consecuencia de recibir radiación con mayor uniformidad.

Bibliografía

- [1] La Tecnología CSP Fresnel. El Estado de la tecnología y una Visión general del mercado. [En línea]. Enlace: <https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2020/08/10160403/La-Tecnologia-Fresnel-CSP-GIZ-2014.pdf> [Consulta 18 de mayo 2022]
- [2] Renovables en el mundo y en Europa. [En línea]. Enlace: <https://www.apa.es/energias-renovables/renovables-en-el-mundo-y-en-europa/#:~:text=El%20crecimiento%20a%20nivel%20mundial,10%2C8%25%20del%20total.> [Consulta 03 de Junio 2022]
- [3] La veloz apuesta por las energías limpias chilenas. [En línea]. Enlace: <https://www.enel.cl/es/conoce-enel/la-energia-de-chile-se-transforma/la-veloz-apuesta-por-las-energias-limpias-chilenas.html>. [Consulta 03 de Junio 2022]
- [4] Chile inaugura primera planta termosolar de Latinoamérica. [En línea]. Enlace: [https://www.forbes.com.mx/chile-inaugura-primera-planta-termsolar-de-latinoamerica/#:~:text=La%20planta%2C%20ubicada%20a%2050,solar%20de%20potencia%20\(CSP\).](https://www.forbes.com.mx/chile-inaugura-primera-planta-termsolar-de-latinoamerica/#:~:text=La%20planta%2C%20ubicada%20a%2050,solar%20de%20potencia%20(CSP).) [Consulta 04 de Junio 2022]
- [5] Los cinco proyectos de Concentración Solar de Potencia en carpeta después de Cerro Dominador. [En línea]. Enlace: <https://www.revistaei.cl/2019/04/02/los-cinco-proyectos-csp-carpeta-despues-cerro-dominador/>. [Consulta 04 de Junio 2022]
- [6] CARACTERIZACIÓN ÓPTICA Y TERMODINÁMICA DE UN COLECTOR SOLAR FRESNEL CON ABSORBEDOR DE MINICANALES PARA GENERACIÓN DIRECTA DE VAPOR. [En línea]. Enlace: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/170703/Caracterizaci%C3%B3n-%C3%B3ptica-y-termodin%C3%A1mica-de-un-colector-solar-fresnel-con.pdf?sequence=1> [Consulta 06 de Junio 2022]
- [7] DEVELOPMENT OF A LOW COST LINEAR FRESNEL SOLAR CONCENTRATOR. [En línea]. [Consulta 06 de Junio 2022]
- [8] Memoria Benjamín Canales (DIMEC-FCFM): CARACTERIZACIÓN DE GEOMETRÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR UTILIZANDO MODELOS DE TRAZADO DE RAYOS. [En línea]. [Consulta 12 de Junio 2022]

- [9] How to use Linear fresnel tracker node?. [En línea]. Enlace: <https://github.com/iat-cen-er/tonatiuh/issues/93>. [Consulta 12 de Junio 2022]
- [10] Mapas de recursos solares de World. [En línea]. Enlace: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/world>. [Consulta 15 de Junio 2022]
- [11] El crecimiento de la energía solar en India liderado por la FV pone la mirada en los proyectos CSP [En línea]. Enlace: <https://www.reutersevents.com/renewables/csp-es/el-crecimiento-de-la-energia-solar-en-india-liderado-por-la-fv-pone-la-mirada-en-los>. [Consulta 15 de Junio 2022]
- [12] Cinco regiones presentan nivel extremo de radiación UV [En línea]. Enlace: <https://www.chiledesarrollosustentable.cl/noticias/noticia-pais/cinco-regiones-presentan-nivel-extremo-de-radiacion-uv/>. [Consulta 18 de Agosto 2022]
- [13] Campaña de medición del recurso Eólico y Solar [En línea]. Enlace: <http://walker.dgf.uchile.cl/Mediciones/>. [Consulta 18 de Agosto 2022]
- [14] Planta de concentración solar en Chile [En línea]. Enlace: <http://infografias.elmercurio.com/20210429-INN-plantasolar/#:~:text=La%20Regi%C3%B3n%20de%20Antofagasta%20cuenta,radiaci%C3%B3n%20solar%20de%20forma%20directa..> [Consulta 19 de Agosto 2022]
- [15] Industrial Solar - Model LF11 - Linear Fresnel Collector [En línea]. Enlace: <https://www.energy-xprt.com/products/industrial-solar-model-lf11-linear-fresnel-collector-585275>. [Consulta 19 de Agosto 2022]
- [16] Carta Solar [En línea]. Enlace: <https://scsarquitecto.cl/carta-solar/>. [Consulta 23 de Agosto 2022]
- [17] El ángulo de elevación (ángulo cenital) [En línea]. Enlace: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/el-%C3%A1ngulo-de-elevaci%C3%B3n#:~:text=El%20%C3%A1ngulo%20cenital%20es%20el,cenital%20%3D%2090%20%C2%B0%20%2D%20elevaci%C3%B3n..> [Consulta 23 de Agosto 2022]
- [18] Coordenadas geográficas de Antofagasta [En línea]. Enlace: <https://www.geodatos.net/coordenadas/chile/antofagasta>. [Consulta 24 de Agosto 2022]
- [19] LAS 5 MEJORES REGIONES PARA INSTALAR PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS EN CHILE [En línea]. Enlace: <https://solcorchile.com/paneles-solares-fotovoltaicos-en-regiones/>. [Consulta 05 de Septiembre 2022]

- [20] Tonatiuh v2.2.4 [En línea]. Enlace: <https://github.com/iat-cener/tonatiuh/releases/tag/v2.2.4>. [Consulta 04 de Noviembre 2022]
- [21] Centro Nacional de Energías Renovables - Tonatiuh [En línea]. Enlace: <https://www.cener.com/documentacion/TONATIUH.pdf>. [Consulta 15 de Noviembre 2022]
- [22] ENBRAIN project webinar on how to use Tonatiuh Software, now available [En línea]. Enlace: https://www.youtube.com/watch?v=oSH4vLE57Ho&ab_channel=UNIMED-MediterraneanUniversitiesUnion. [Consulta 15 de Noviembre 2022]
- [23] How to Import External CAD file in to Tonatiuh Ray Tracing software [En línea]. Enlace: https://www.youtube.com/watch?v=GbuW3xKw7Wg&t=14s&ab_channel=MathiS. [Consulta 15 de Noviembre 2022]
- [24] Memoria Lisa Peña (DIMEC-FCFM): EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL USO DE REFLECTORES SECUNDARIOS DE DISTINTAS GEOMETRÍAS EN COLECTORES CILÍNDRICO PARABÓLICO . [En línea]. [Consulta 07 de Diciembre 2022]

Anexos

Anexo A. Configuraciones de Espejos

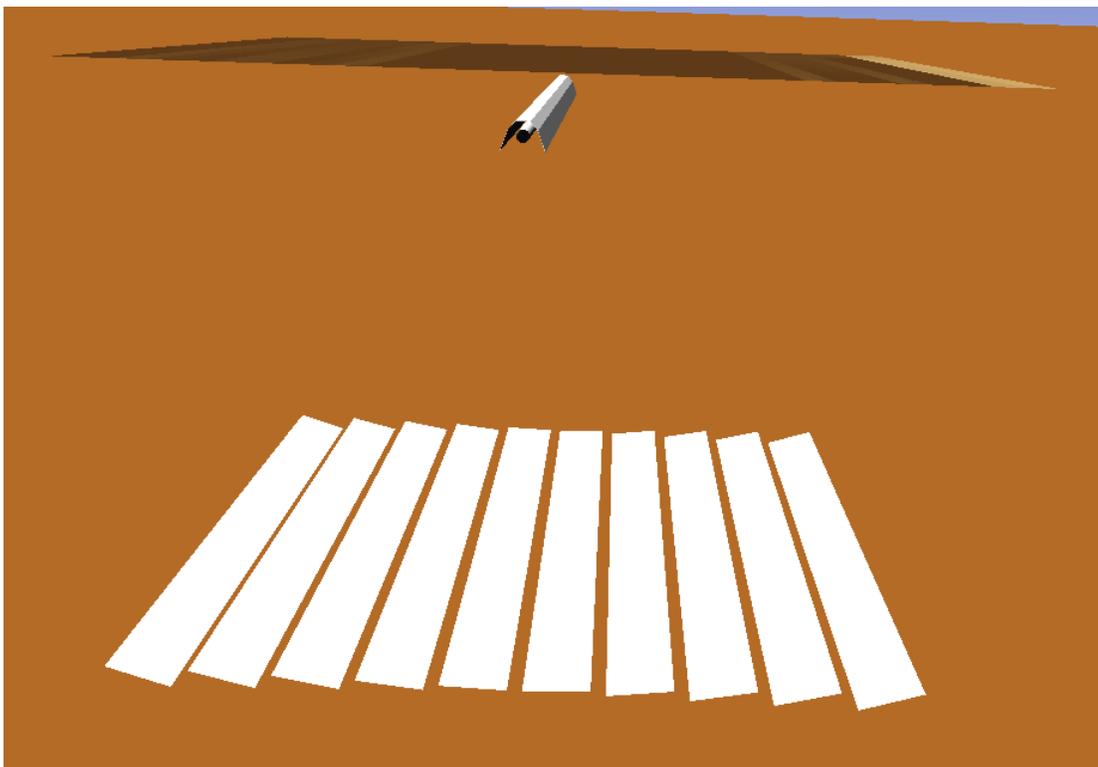


Figura A.1: Colector fresnel ancho módulo 6m

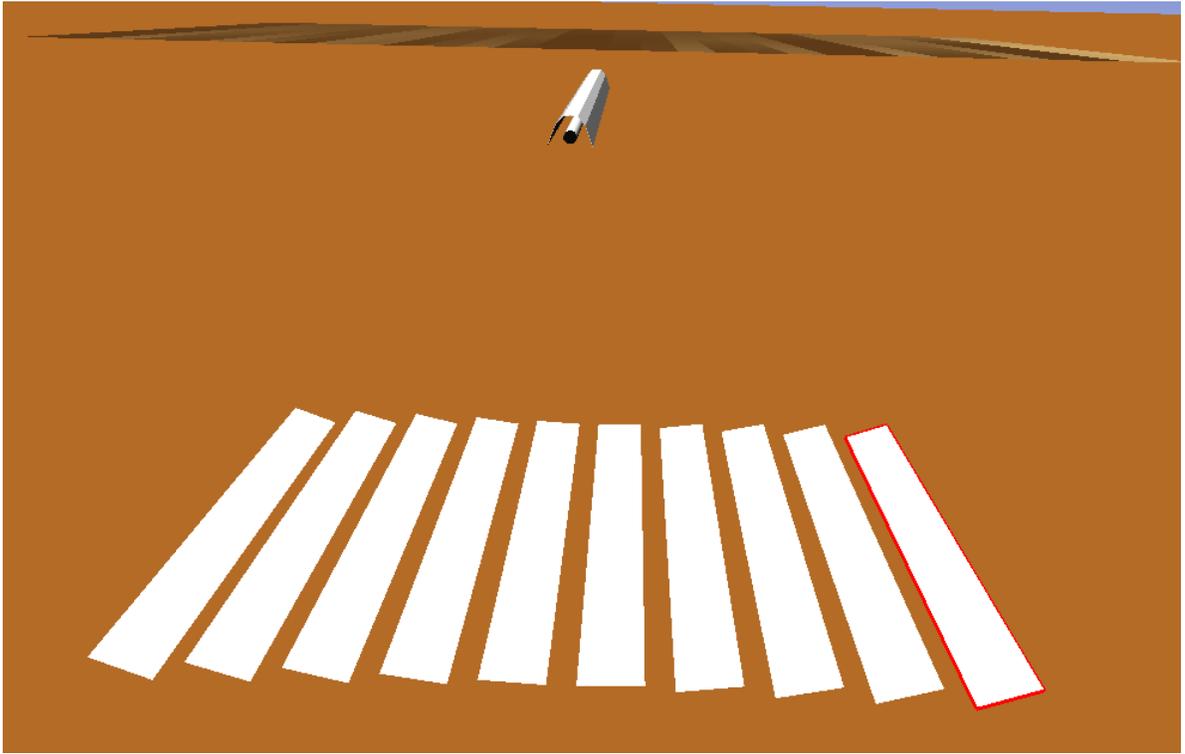


Figura A.2: Colector fresnel ancho módulo 7m

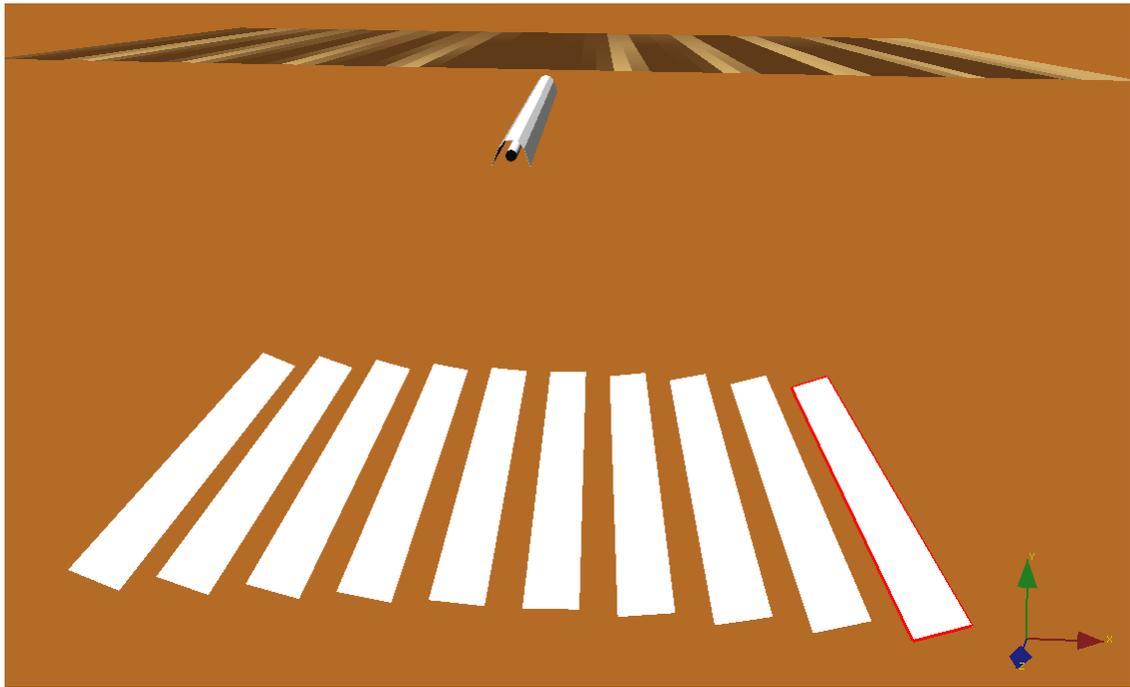


Figura A.3: Colector fresnel ancho módulo 8m

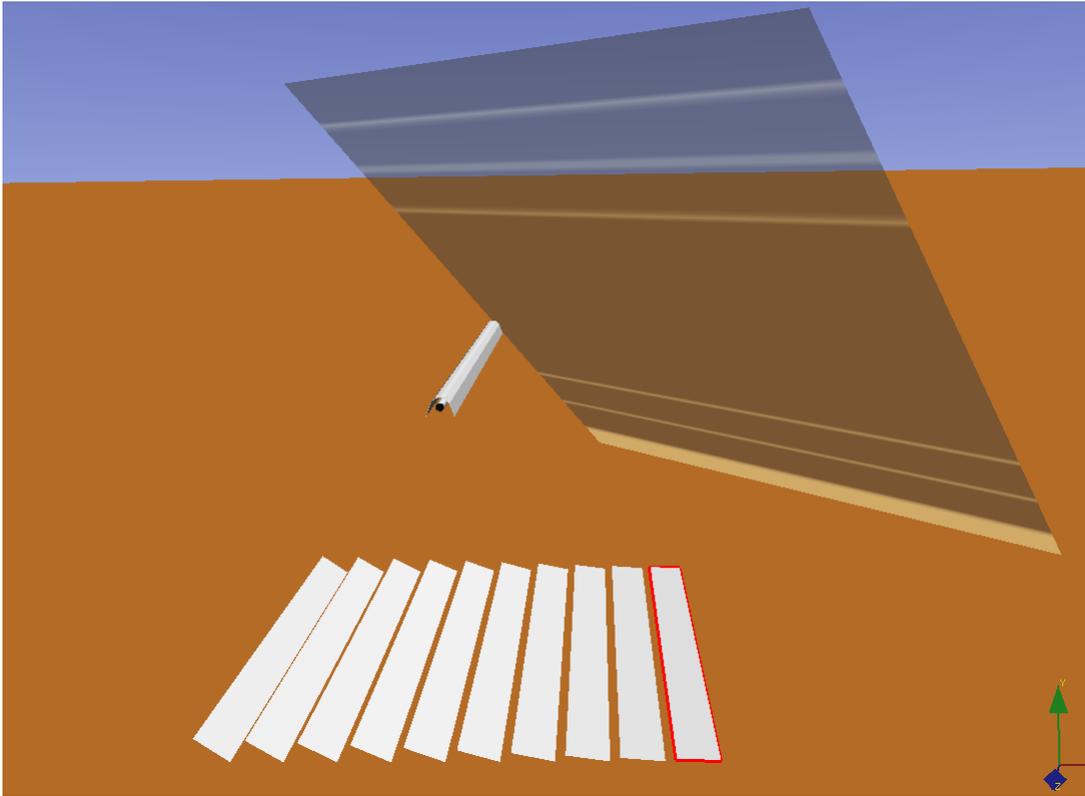


Figura A.4: Colector fresnel elevación y azimutal 45°

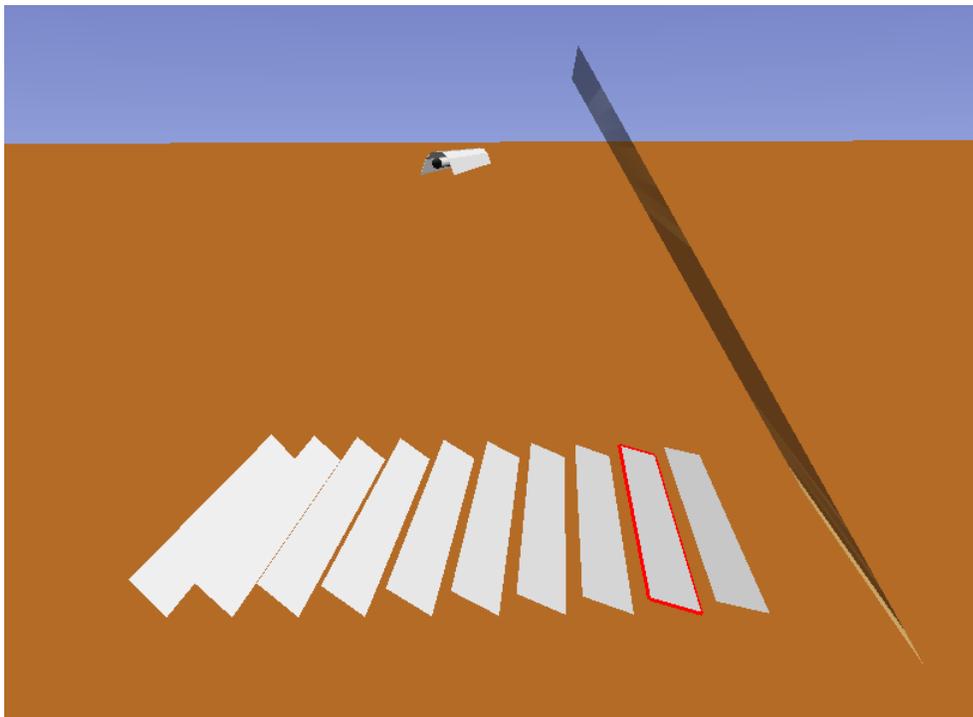


Figura A.5: Colector fresnel elevación 30° y azimutal 90°

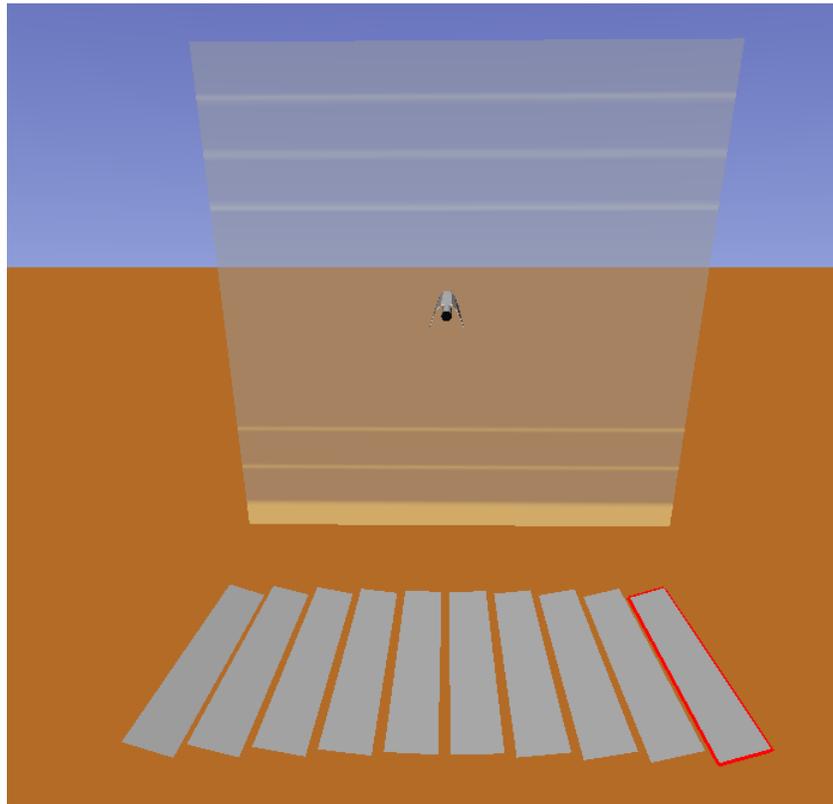


Figura A.6: Colector fresnel elevación 30° y azimutal 0°

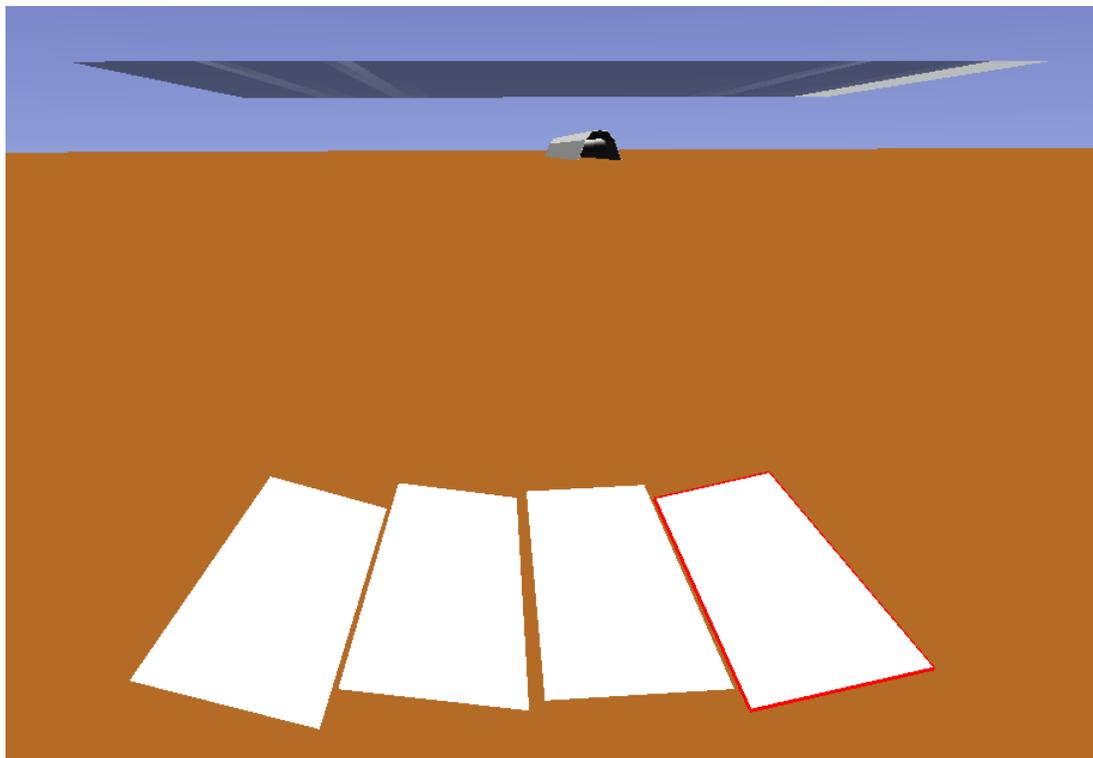


Figura A.7: Colector fresnel de 4 espejos

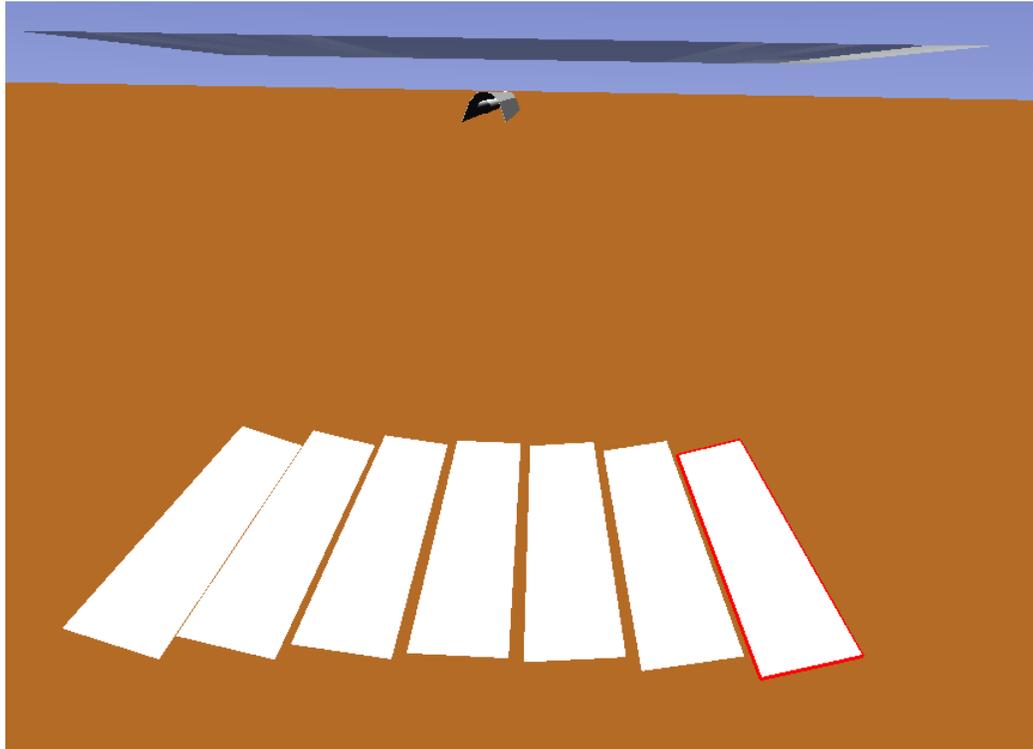


Figura A.8: Colector fresnel de 7 espejos

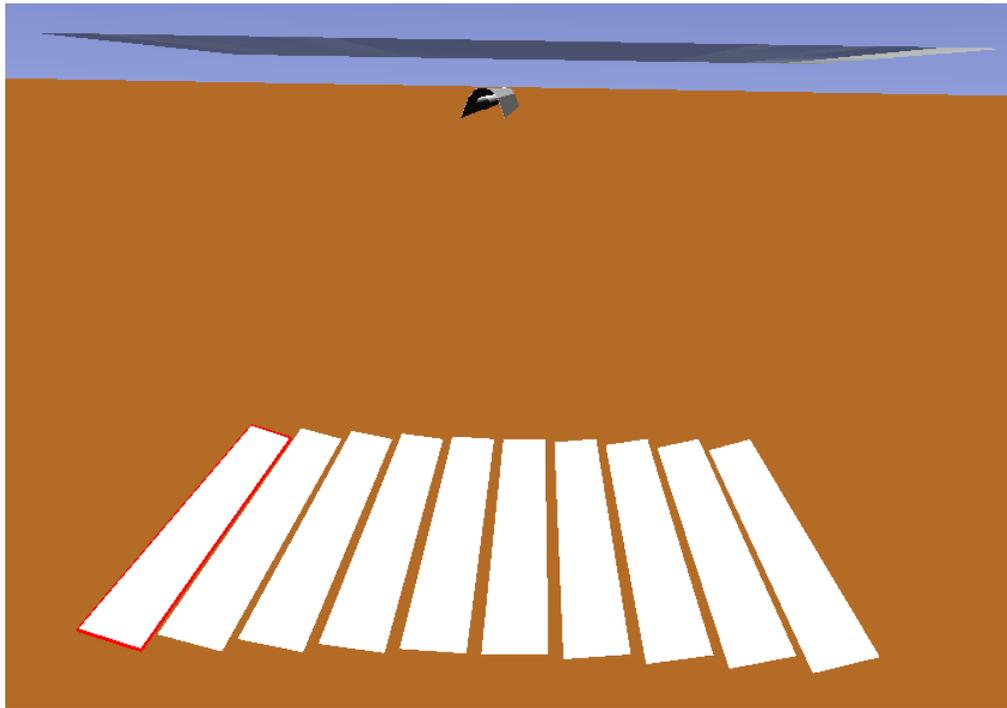


Figura A.9: Colector fresnel de 10 espejos

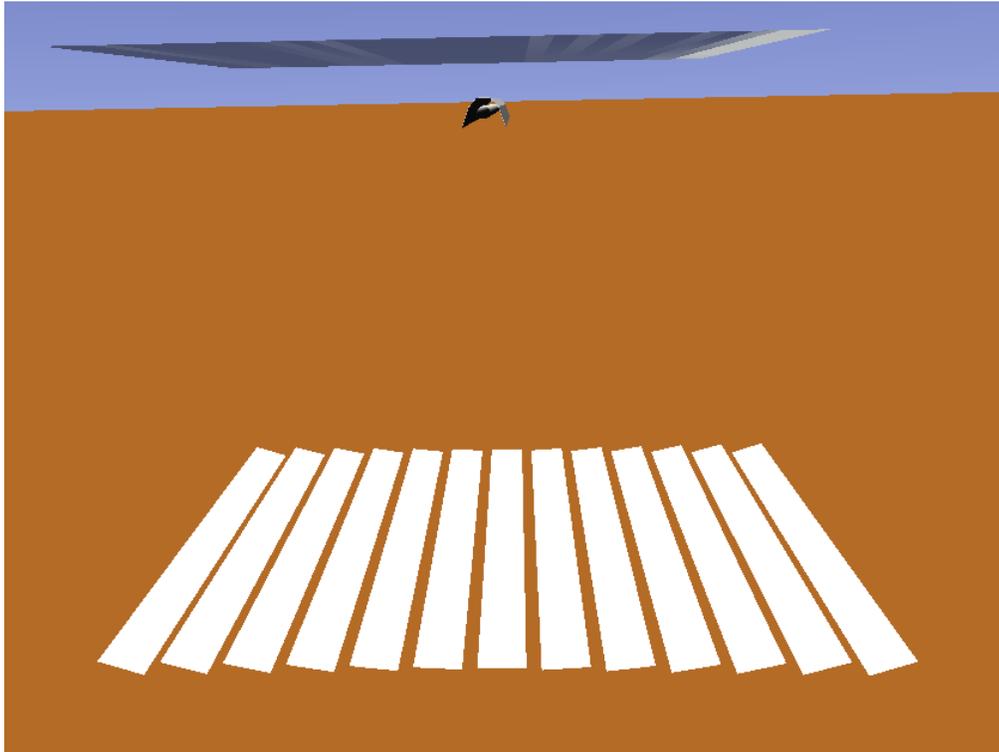


Figura A.10: Colector fresnel de 13 espejos

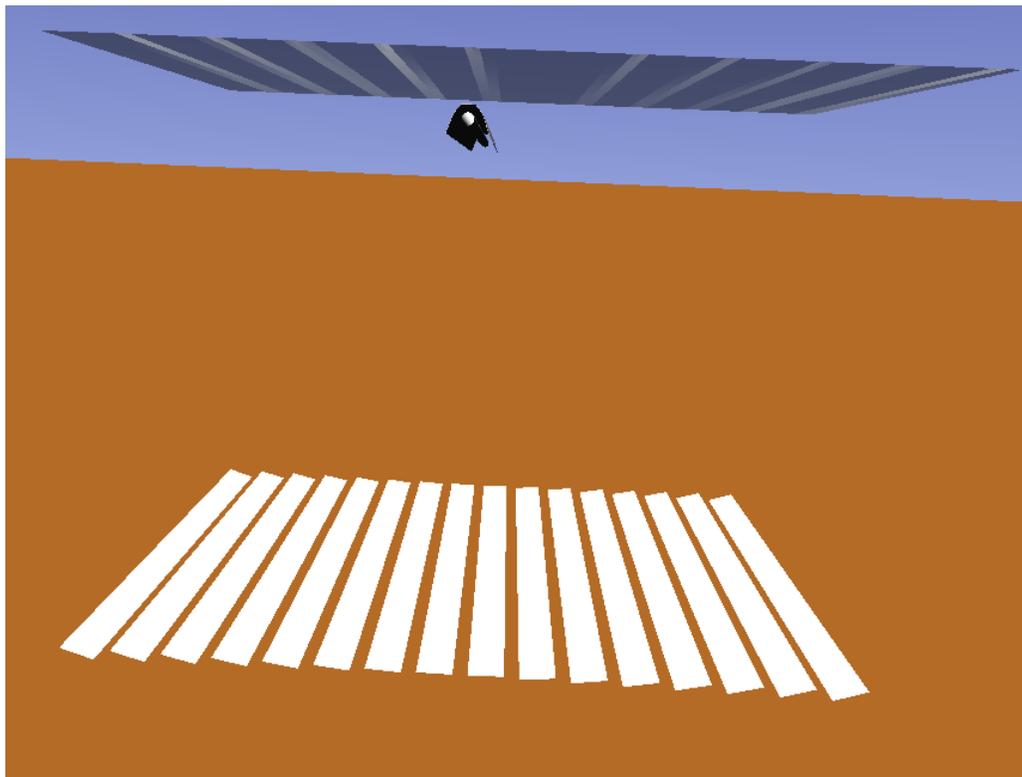


Figura A.11: Colector fresnel de 16 espejos

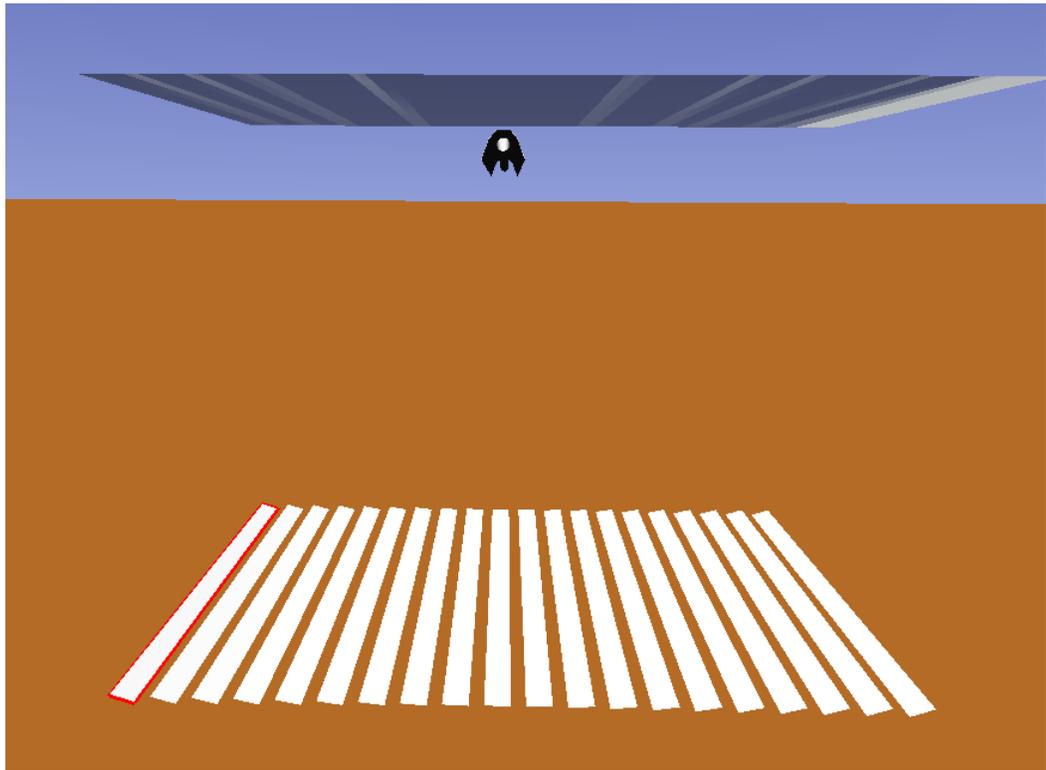


Figura A.12: Colector fresnel de 20 espejos

Anexo B. Variación de número de fotones

Flujo energético vs Ángulo

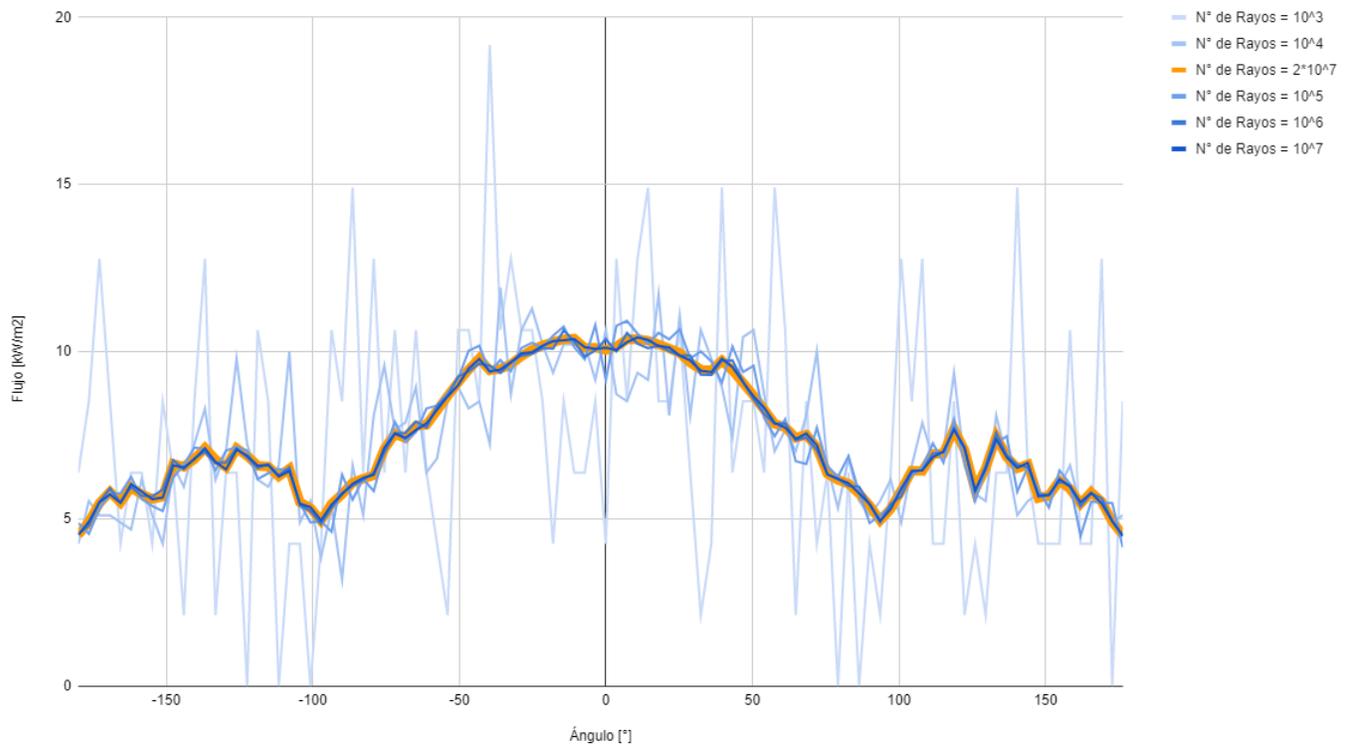


Figura B.1: Variación de Número de rayos (degradado)

Flujo energético vs Ángulo

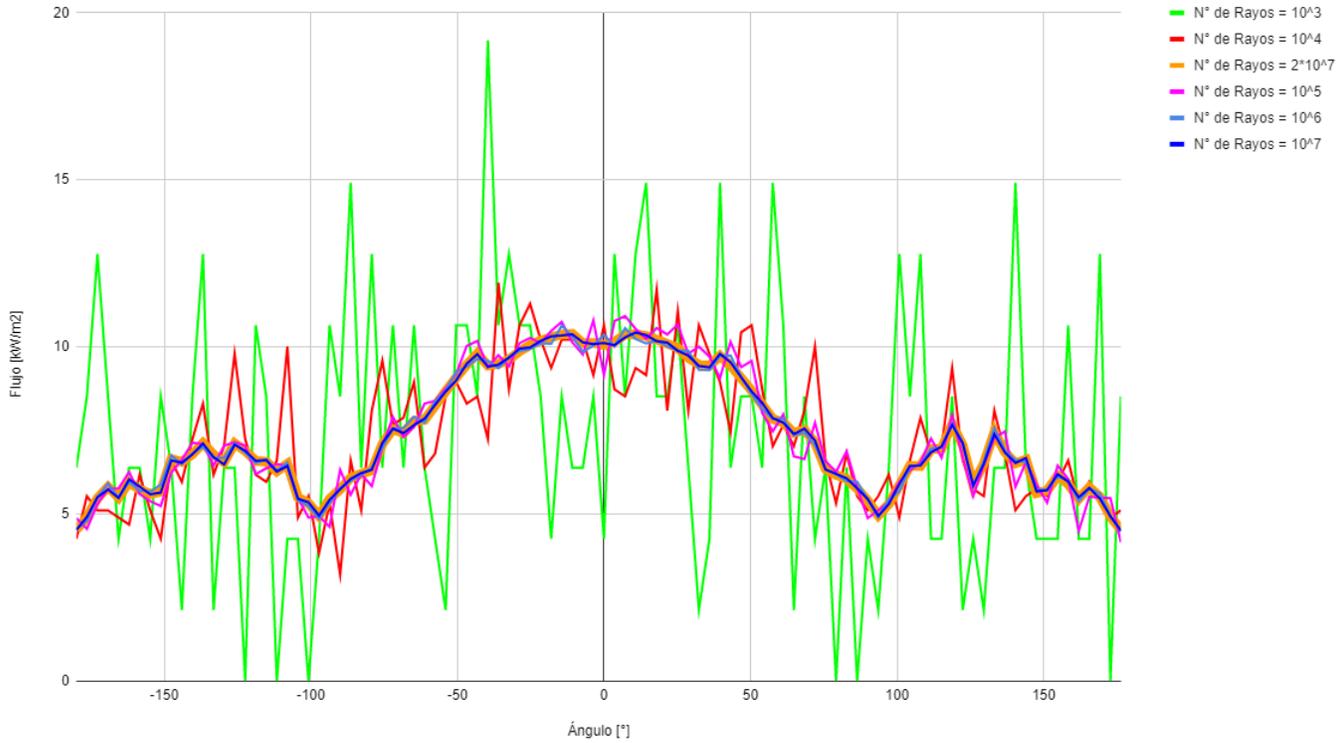


Figura B.2: Variación de Número de rayos (colores)

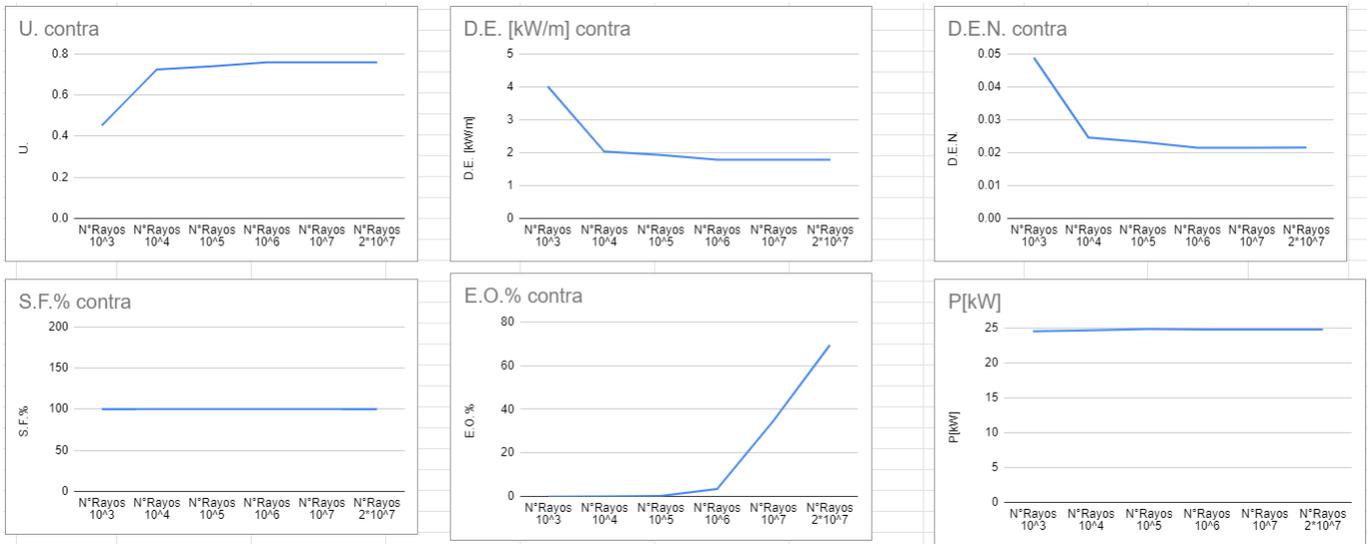


Figura B.3: Variables estadísticas en variación número de rayos

Anexo C. Códigos computacionales

```
In[404]:= SetDirectory[NotebookDirectory["C:\\Users\\Nicolas\\Documents\\U Nico\\Ultimo Semestre\\Tesis\\Simulación\\Resultados"]]  
  
SetDirectory: The specified argument, NotebookDirectory[C:\\Users\\Nicolas\\Documents\\U Nico\\Ultimo Semestre\\Tesis\\Simulación\\Resultados], should be a valid string or File.  
Out[404]:= SetDirectory[NotebookDirectory[C:\\Users\\Nicolas\\Documents\\U Nico\\Ultimo Semestre\\Tesis\\Simulación\\Resultados]]  
  
In[405]:= (*Función para comprobar el lado correcto del colector*)  
side[{photonID_,x_,y_,z_,sideID_},refSide_]:=sideID==refSide  
  
In[406]:= file=FileNames["Resultados61_*.dat"]  
  
Out[406]:= {Resultados61_1.dat, Resultados61_2.dat, Resultados61_3.dat, Resultados61_4.dat}  
  
In[407]:= numberOfFiles=Length[file]  
  
Out[407]:= 4
```

Parámetros geométricos absorbedor

```
In[408]:= rAbsorbedor=0.0889 ; (*m*)  
lAbsorbedor=6 ; (*m*)  
nElementsTHETA=300;  
nElementsYZ=1;  
dsTHETA=360/(nElementsTHETA) ; (*grados*)  
dsArco=(2 *Pi*rAbsorbedor) / (nElementsTHETA) ; (*metros*)  
dsYZ=lAbsorbedor/nElementsYZ;  
elementAreaTHETA=dsArco*dsYZ (*m2*) ;
```

Cálculo flujo energético en superficie absorbedor

```
In[416]:= totalPhotonsCounts=ConstantArray[0,{nElementsTHETA, nElementsYZ}];  
  
In[417]:= totalNumberOfPhotons=0;  
nRayos=10000000;  
(*powerPerPhoton=0.00712639,3577.54*)  
powerPerPhoton=0.00713899;
```

Figura C.1: Código Wolfram Mathematica parte 1 (screenshot)

```

powerPerPhoton=0.00713899;

In[420]:= conversionFactor=powerPerPhoton/(elementAreaTHETA*1000) ; (*kW/m2*)

In[421]:=
Conteo=ConstantArray[0,{nElementsTHETA}];

For[i=1,i:numberOfFiles,++i,fileRawData=BinaryReadList[file[[i]],"Real64",ByteOrdering->+1];(*Ciclo for, para cada arch
Print["Iteration = ",i,". Processing file: ",file[[i]];
filePhotonSet=Partition[fileRawData[[1;;Length[fileRawData]]],5];
Clear[fileRawData];
fileValidPhoton=Select[filePhotonSet,side[#,1]& /. {photonID_,x_,y_,z_,sideID_}>{x,y,z};(*Se obtiene una lista que
Clear[filePhotonSet];
fileNumberOfValidPhotons=Length[fileValidPhoton];
totalNumberOfPhotons=totalNumberOfPhotons+fileNumberOfValidPhotons; (*Conteo de fotones*)
Polares=ConstantArray[0,{Length[fileValidPhoton],2}]; (*Para cada lista que contiene las coordenadas cartesianas de
For[j=0,j< Length[fileValidPhoton],++j;
  coordx=fileValidPhoton[[j,1];
  coordy=fileValidPhoton[[j,2];
  radio= Sqrt[(coordx)^2+(coordy)^2];
  If[coordy<0,Theta= ArcSin[coordx/radio]*180/Pi ;,If[coordx<0,Theta=180-ArcSin[coordx/radio]*180/Pi ,
  Theta=-180-ArcSin[coordx/radio]*180/Pi ] ];
  Polares[[j,1]]=Theta;
  Polares[[j,2]]=radio;
];
conteoAngulos=BinCounts[Polares[[All,1]],{-180,180,dsTHETA}];
Conteo=Conteo+conteoAngulos;
Clear[fileValidPhoton];
]
Angulo=Range[-180.,180.-dsTHETA,dsTHETA];
FluxDistribution=conversionFactor* Conteo;
PolarCounts=Transpose[{Angulo,FluxDistribution}];
estimatedPowerAtAbs=powerPerPhoton * totalNumberOfPhotons/1000 ;(*kW*)

Iteration = 1. Processing file: Resultados61_1.dat
Iteration = 2. Processing file: Resultados61_2.dat
Iteration = 3. Processing file: Resultados61_3.dat
Iteration = 4. Processing file: Resultados61_4.dat

```

Figura C.2: Código Wolfram Mathematica parte 2 (screenshot)

```

(*Evaluación de uniformidad*)
(*Creación de una nueva lista, que contenga solo los valores que superan cierto umbral en el conteo. Con ello poder evaluar la el porcet
UmbralConteo= 4.;
PorcFlujo=0.;

For[i=0,i < Length[FluxDistribution],++i;
  If[FluxDistribution[[i]]≥UmbralConteo,
    PorcFlujo++;None
  ]]

FlujoValido=FluxDistribution;

PorcFlujo=PorcFlujo/Length[FluxDistribution]*100;

(*Superficie absorbedor*)
RadioAbsorbedor=rAbsorbedor(*m*);
LargoAbsorbedor=6. (*m*);
SuperficieAbsorbedor=2*Pi*RadioAbsorbedor*LargoAbsorbedor;

(*Valores estadísticos*)
Promedio=Mean[FlujoValido];
Desviacion=StandardDeviation[FlujoValido];
DesviacionNorm=Desviacion/(estimatedPowerAtAbs*SuperficieAbsorbedor);
Uni=1- Desviacion/Promedio;
EficOptica=totalNumberOfPhotons/nRayos*100.;

Print["Valor de uniformidad : ", Uni]
Print["Desviación estandar : ", Desviacion,"[kW/m]"]
Print["Desviación estandar Normalizada : ", DesviacionNorm]
Print["Porcentaje de superficie que recibe flujo: ", PorcFlujo, "%"]
Print["Porcentaje de rayos que llegan al absorbedor: ",EficOptica,"%"]
Print["Potencia estimada en el absorbedor : ", estimatedPowerAtAbs, "[kW]"]

(*Exportación datos variables calculadas*)
SetDirectory["C:\\Users\\Nicolas\\Documents\\U Nico\\Ultimo Semestre\\Tesis\\Simulación\\Resultados"];
Export["variablesestadisticas.txt",{g1_108_2_171_1667,Uni, Desviacion, DesviacionNorm, PorcFlujo, EficOptica, estimatedPowerAtAbs}];

```

Valor de uniformidad : 0.757899
Desviación estandar : 1.78661[kW/m]

Figura C.3: Código Wolfram Mathematica parte 3 (screenshot)

```

Valor de uniformidad : 0.757899
Desviación estandar : 1.78661[kW/m]
Desviación estandar Normalizada : 0.0215541
Porcentaje de superficie que recibe flujo: 100.%
Porcentaje de rayos que llegan al absorbedor: 34.6442%
Potencia estimada en el absorbedor : 24.7324[kW]

]:=

(*Exportacion de datos flujo absorbedor*)
SetDirectory["C:\\Users\\Nicolas\\Documents\\U Nico\\Ultimo Semestre\\Tesis\\Simulación\\Resultados"];
Export["flujoenergetico.txt",PolarCounts,"Table"];

```

Figura C.4: Código Wolfram Mathematica parte 4 (screenshot)