



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

DISEÑO DE CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO CON
HELIÓSTATO MÓVIL Y FOCO FIJO, DE POTENCIA DE 2 A 3 kW
TÉRMICOS.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FELIPE DAVID LOBIANO CAMPILLAY

PROFESOR GUÍA:
JOSÉ CARDEMIL IGLESIAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE INGENIERIA CIVIL MECANICA
POR: FELIPE LOBIANO CAMPILLAY
FECHA: 21/07/2020
PROFESOR GUIA: JOSÉ CARDEMIL IGLESIAS

DISEÑO DE CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO CON HELIÓSTATO MÓVIL Y FOCO FIJO, DE POTENCIA DE 2 A 3 kW TÉRMICOS

El siguiente trabajo de título consiste en el diseño de un concentrador solar de 2 reflexiones, que será evaluado para el sector de Guangalí, ubicado en la comuna de Los Vilos, provincia del Choapa, IV región de Coquimbo, Chile. Elección que responde a la compatibilidad de este sistema de concentración con los requerimientos de procesos térmicos de alta temperatura en la producción de cerámica gres típica de la zona, que actualmente se lleva a cabo mediante hornos de inducción.

Este estudio busca dimensionar y diseñar un sistema concentrador de tamaño mediano, constituido por 3 elementos: un heliostato móvil con seguimiento en 2 ejes, un concentrador pseudo parabólico fijo y una superficie focal plana. Esto se realizará mediante iteraciones que permitan evaluar la disposición óptima de estos elementos con la finalidad de minimizar el área de reflexión y obtener así un flujo suficiente de energía incidente para procesos que requieran 2-3 kW de potencia.

Para la modelación se usó la herramienta “Explorador Solar”, desarrollado por el Departamento de Geofísica de la FCFM de la Universidad de Chile que permitió la elección del valor de la radiación directa normal, valor necesario para realizar las iteraciones mediante el programa “Tonatiuh” de trazado de rayos 3D. Por una parte, se crearon los elementos, se definieron sus propiedades superficiales y de forma. Por otra parte, se calcularon las disposiciones espaciales a través de la programación de ecuaciones que permitieron definir las posiciones e inclinaciones de los elementos en función de los 3 parámetros elegidos para las iteraciones: el área del concentrador, el área del heliostato y la distancia focal; para cada uno de ellos se evaluaron 5 valores y se exportaron estas iteraciones para un posterior análisis mediante los programas “Phyton” y “Excel”.

En “Phyton” se realizó un análisis de las iteraciones para obtener las configuraciones dentro del rango entre 2 y 4 kW, luego se seleccionaron las que tuvieran menor área reflectiva y entre ellas, mediante el cálculo del 95% del flujo incidente en la superficie focal, se evaluó la configuración con mayor concentración. Por último, la configuración óptima fue evaluada para obtener la Energía diaria concentrada del sistema.

“Nature runs on light
Nature uses only the energy it needs
Nature fits form to function
Nature recycles everything
Nature rewards cooperation
Nature banks on diversity
Nature demands local expertise
Nature curbs excesses from within
Nature taps the power of limits”

Janine M. Benyus, *Biomimcry: Innovation Inspired by Nature* (2002)

Agradecimientos

A mi Lela y a mi Nonna. A mi madre Elizabeth y a mi padre Sergio, porque sin su apoyo, amor incondicional, compromiso y valores, no habría podido concluir esta etapa de mi viaje con un título profesional. Recuerdo mis primeros años en la universidad y agradezco que cada día nuestra comunicación mejore y fluya, aprender a mostrarles mi corazón ha sido de los aprendizajes más importantes que tuve en Santiago.

A mi hermana Alejandra que fue la primera en recibirme y confiar a ciegas en mí, desde prestarme su auto, siendo un provinciano, hasta incluso permitirme cuidar a Elena cuando aún no cumplía ni el año. A Sergio por acompañarnos desde que tengo memoria, siempre enseñándome a vivir y decidir con más calma. A Camila que con su energía, carisma y sinceridad me mostró lo importante que es ser un buen amigo para tus amigos y sobre todo un buen hermano para mis hermanes. A Javier quien, con una conversación amena y certera sumada a un tecito me brindó siempre mucha tranquilidad.

A René, lo más bonito que me dio la U fuiste tú hermano y si miro para atrás, tengo pura alegría en mi corazón gracias a ti. A Sven, Guarola, Guti por estar desde el comienzo.

A mis tíos, tías, primos y primas quienes al llegar a Santiago se transformaron en un segundo hogar que siempre tuvo un momento para acoger mis dudas, motivarme, aclarar las ideas y por sobre todo inspirar con sus vivencias y pensamientos.

A Paula con amor, porque somos la equipa increíble y me acompañaste en todo este proceso, apoyo emocional fundamental para la realización de esta memoria. A su familia.

A mis futuros colegas Nico, Gonzalo, Macka, Pedro quienes resolvieron mis dudas y me ayudaron dentro de las posibilidades a complementar conocimientos para que este trabajo de título pudiera ver la Luz.

A la Rama de Handball de Beauchef, por ser una familia que quería jugar entre amigos y ganarle a quien se parara adelante. A Victor por formarme pal deporte y para la vida.

A les motivades de “Guan Love” con quienes teníamos una idea de pensar la vida, la ingeniería y las relaciones personales desde el amor. Giorgi, Vale, Chalo, Mala, Paz, Mauri, Alexis, Sol, Beatime, Ale, Angie, Alexis, Maiki, Joti, Juaco, Christian, Orlando, Tomy.

A lxs Mekanicsxs que tienen un pedacito de mi corazón para donde vayan, Martin, Grace, Paski, Macka, Maka coni, Coni, Franco, Carlitos, Guille, Carpa, Tomy. Al Dimec conformado por personas muy preparadas e interesantes y en particular a Euge, Mari Carmen, Claudia, Sole y Silvia que hacen posible que el departamento se sienta como un hogar.

Y sobre todo, gracias a los profesores que me acompañaron en este proceso: Roberto Román, “Don Solar”, gracias a tu calidez y forma de enseñar inspiraste este proyecto y mi camino. A José Cardemil gracias por aceptar este desafío, entregarme su tiempo, disposición y conocimientos claves para completar este trabajo y cimentar mi camino profesional.

Tabla de contenido

Agradecimientos	iv
Índie de Figuras	vi
Índice de Tablas.....	viii
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Básicos Generales.....	1
1.2. Motivación	3
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos	5
1.4. Alcances.....	5
2. Antecedentes	6
2.1 Energía Solar.....	6
2.2 Geometría Tierra-Sol.....	10
2.3 Concentración solar	13
2.3.1 Concentradores de placa plana	14
2.3.2 Concentrador de torre central	15
2.3.3 Concentrador Scheffler.....	16
2.3.4 Concentradores de 2 reflexiones: Paraboloide de revolución fijo, con heliostato auxiliar 18	
2.4. Geometría de la parábola	20
2.5. Cocción (firing) de cerámica Gres	22
3. Metodología	24
3.1 Configuración del Sistema.....	32
3.2 Identificar parámetros de la iteración	41
3.3 Análisis de las configuraciones del sistema.....	44
4. Resultados y discusión	46
4.1. Selección de la configuración óptima.....	53
5. Conclusiones	56
Bibliografía.....	58

Índice de Figuras

Figura 2.1 Estructura del sol. [4]	7
Figura 2.2. Mapa mundial DNI. [2].....	7
Figura 2.3 Interacción Tierra –Sol [13].....	8
Figura 2.4. Diagrama representativo del sol con respecto a las horas de luz, comportamiento de la temperatura media y la radiación solar	9
Figura 2.5. Trayectorias de los equinoccios y solsticios. Jaontiveros Kukulcán pyramid sun path. Recuperada de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kukulcan_trayectoria_solar.jpg	11
Figura 2.6 Ángulos con respecto al sol. Recuperado: https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-solar-fotovoltaica-1/trayectoria-del-sol-137869	12
Figura 2.7. Tipos de reflexiones.[4]	13
Figura 2.8 Diferentes tipos de concentradores solares [2].....	14
Figura 2.9 Concentrador de placa plana. [2]	14
Figura 2.10 Planta de torre central Ivanpah Recuperada de: https://energia12.com/2015/09/03/la-planta-termsolar-mas-grande-del-mundo-ivanpah/ . ..	15
Figura 2.11 Porción del paraboloide de revolución que caracteriza a un concentrador tipo Scheffler.[2].....	16
Figura 2.12 Reflector Scheffler construido en Zanzibar, Tanzania. Recuperada de:	17
Figura 2.13 Horno solar de Mont-Louis.....	18
Figura 2.14 Concentrador de facetas hexagonales	19
Figura 2.15 Parábola de eje vertical	20
Figura 2.16 Ángulos con respecto a la tangente y la normal del punto de tangencia.....	21
Figura 2.17Parabola de eje horizontal	21
Figura 2.18 A la izquierda un horno eléctrico de cámara y a la derecha un horno de Gas ..	23
Figura 3.1 Promedio de la radiación directa normal para cada hora y mes.....	25
Figura 3.2 Herramientas de Tonatiuh.....	26
Figura 3.3 Características del Group Node	26
Figura 3.4 Herramienta Run Flux Análisis.....	27
Figura 3.5 Vista gráficos herramienta Run Flux Analisis	28
Figura 3.6 Parámetros de las superficies reflectantes	29
Figura 3.7 Script Editor	30
Figura 3.8 Distribución tipo Pillbox	31
Figura 3.9 Definir la forma solar (Sun Shape)	32
Figura 3.10 Definir elementos del sistema de concentración.....	34
Figura 3.11 Heliostato y Foco creados	35
Figura 3.12 Características superficiales del Foco y el Heliostato respectivamente.....	35

Figura 3.13 Imágenes de ambos elementos modelados de distintas vistas, en la imagen de la derecha se incluye el ángulo del heliostato para reflejar al concentrador y aumenta la arista del Heliostato a 2[m]	36
Figura 3.14 Faceta y características superficiales	36
Figura 3.15 a) Facetas de distintas curvaturas, b) Parámetros geométricos de la faceta seleccionada.....	37
Figura 3.16 Creación de una columna de facetas	38
Figura 3.17 Creación del concentrado mediante adición de columnas de facetas	38
Figura 3.18 Posición de las columnas de facetas en el eje Z.....	39
Figura 3.19 Antes y después de definir la posición z_i a cada faceta	40
Figura 3.20 Diagrama de flujo de los pasos lógicos.....	43
Figura 3.21 Columnas del documento exportado de Tonatiuh.....	44
Figura 3.22 Parámetros a y b de la elipse	44
Figura 4.1 Posición de las columnas de facetas con respecto al plano XZ	46
Figura 4.2 Posición de las facetas con respecto al plano YZ, para $D_f= 2[m]$	47
Figura 4.3 Posición de las facetas con respecto al plano YZ, para $D_f= 4[m]$	48
Figura 4.4 Posición de las facetas, a la izquierda con respecto a $D_f=6[m]$ y a la derecha $D_f=8[m]$	49
Figura 4.5 Posición de las facetas con respecto al plano YZ, para $D_f=10 [m]$	50
Figura 4.6 Disposición en Tonatiuh de la configuración óptima	54
Figura 4.7 Rayos direccionados al foco por el sistema concentrador	54
Figura 4.8 Heat Map y graficos de flujo con respecto a los ejes X e Y	55
Figura 5.1 Imagen Grid 200x200 y 10.000 rayos.....	61
Figura 5.2 Imagen con Grid de 50x50 y 1.000 rayos	62
Figura 5.3 Imagen con Grid de 50x50 y 100.000 rayos	63
Figura 5.4 Cambio del área focal de concentración en función de la concavidad de las facetas del concentrador	65
Figura 5.5 Imagen Grid 50x50 y 500.000 rayos.....	66

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Tabla comparativa entre distintos hornos eléctricos	23
Tabla 3.1 Características geográficas de Guangalí.....	24
Tabla 3.2 Valores de los parámetros a iterar	32
Tabla 3.3 Número de facetas por cada iteración	32
Tabla 3.4 Coordenadas de los elementos del sistema.....	33
Tabla 3.5 Valores de xHel con respecto al número de facetas de la iteración	33
Tabla 3.6 parámetros de entrada del sistema y del heliostato	34
Tabla 3.7 Posición en x e y de las facetas de un concentrador de 7x7	39
Tabla 3.8 Inclinaciones de la superficie focal para todas las configuraciones	41
Tabla 3.9 Tabla resumen Valores de los Parámetros.....	41
Tabla 3.10 Ángulo de inclinación, posición xi y Zi de cada columna del concentrador en función de la distancia focal.	42
Tabla 4.1 Potencia máxima y mínima de las distintas configuraciones según el área del heliostato.....	51
Tabla 4.2 Configuraciones en el rango 1,8 - 4 kW	52
Tabla 4.3 Cálculo de la concentración de las configuraciones.....	52
Tabla 4.4 Configuraciones seleccionadas.....	53

1.Introducción

1.1. Antecedentes Básicos Generales

El contexto mundial que enfrentamos como humanidad en relación al cambio climático y calentamiento global, ha provocado una serie de implicancias a nivel político, económico y social. En ese sentido, es fundamental un esfuerzo interdisciplinario que permita el avance en materia de soluciones para enfrentar este escenario, que conduzcan a frenar y en lo posible disminuir el calentamiento global. La ingeniería, por tanto, debe estar en condiciones de resolver las problemáticas actuales y proponer soluciones adecuadas para cada contexto que demande el desarrollo de energías y especialmente aquellas que sean sustentables.

El sociólogo alemán Niklas Luhmann (1992) en su teoría sobre el riesgo, propone que toda amenaza ambiental la construye la propia sociedad, es decir que es la sociedad quien construye los riesgos socioambientales a los que se expone y es por tanto capaz de identificar las amenazas que enfrenta. Para que exista el riesgo este se debe comunicar y precisamente en este momento en el que nos encontramos como humanidad, pues identificándolo podemos comunicar nuevas formas de hacernos cargo de las amenazas a las que nos enfrentamos.

El informe especial sobre los impactos del calentamiento global a 1,5°C presentado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en octubre de 2018, expone que las condiciones medioambientales actuales, exigen soluciones rápidas y eficientes para reducir al 2030 en un 45% las emisiones netas mundiales de CO² y a un 0 neto para el año 2050. Del mismo modo, el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (ODS) aprobado por la Organización de Naciones Unidas, se compromete a una serie de medidas que permitan garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos. Para lo cual, la primera meta es aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas desde su aprobación hasta el 2030.[21]

América Latina y el Caribe en este escenario, han cumplido un rol fundamental en el desarrollo de iniciativas multilaterales que apunten a generar soluciones en materia medioambiental. Esto ha quedado de manifiesto en el desarrollo del primer Tratado sobre Asuntos Ambientales que incorpora disposiciones en materia de Derechos Humanos para esta problemática denominado “Acuerdo de Escazú”, lo que confirma la importancia y compromiso regional con el desarrollo sostenible.

La “Hoja de Ruta 2050 hacia un futuro energético sustentable e inclusivo para Chile” liderada por el Ministerio de Energía de Chile durante el 2015, expresa que el desarrollo energético para el siglo XXI está vinculado con el desarrollo productivo y la innovación, de manera que el tipo de energía, su forma de producción y uso serán determinantes para las próximas décadas.

Considera además como esencial para los nuevos desafíos, la creación de sistemas energéticos que sean compatibles con una infraestructura energética que produzca bajos impactos socioambientales, compatible con ecosistemas sanos y comunidades saludables y que destaque por ser bajo en emisiones de carbono a la vez que sea respetuoso de los Acuerdos Internacionales en el marco de un futuro climático seguro.

Conscientes del Calentamiento Global y en el camino hacia la carbono-neutralidad, entender el rol que posee el Sol como fuente energética para todos los organismos vivos, vegetales y ecosistemas, permite identificar cómo esta energía es utilizada con diversos fines por los organismos del planeta. Para así buscar procesos térmicos y soluciones que aprovechen la energía que día a día está disponible, antes de considerar siquiera la generación de electricidad o calor mediante procesos que usen combustión.

En este contexto, el desarrollo e innovación de energías renovables no convencionales (ERNCC) se vuelve clave para contribuir en la disminución del uso de combustibles fósiles en la producción energética del país. Es así, que el aprovechamiento de la radiación solar en procesos térmicos y de generación de energía, se está convirtiendo en una buena alternativa para la zona Norte y centro del país por sus condiciones climáticas particulares.

Se vuelve interesante estudiar los distintos tipos de configuraciones de sistema que aprovechen la energía solar, para abordar una demanda térmica específica, por ello la propuesta de esta memoria dice relación con un aprovechamiento de la energía solar desde la modelación de un sistema concentrador pseudo parabólico con un helióstato móvil y un foco fijo para la zona de Guangualí, ubicado en la comuna de Los Vilos, provincia del Choapa, IV región de Coquimbo, Chile. Esto, por la compatibilidad de concentración que este sistema tiene con los requerimientos de procesos térmicos de alta temperatura en la producción de cerámica gres típica de la zona, que actualmente se lleva a cabo mediante hornos de inducción.

1.2. Motivación

En el contexto actual y mirando cómo desde la revolución industrial llegamos hasta este punto de no retorno en temas ambientales, reflexionar las siguientes acciones siguiendo los principios de la sustentabilidad, como es innovar respecto de las fuentes de generación de energía actuales es fundamental.

De esta forma parece desafiante generar soluciones que utilicen la energía disponible tal como lo hacen para vivir los demás seres que nos rodean, que satisfacen sus demandas y requerimientos energéticos mediante el Sol, permitiendo la sobrevivencia común a través de la interdependencia. En ese sentido, el reino vegetal y la forma de utilizar el sol como fuente, es una motivación para incorporar ese aprovechamiento energético a los procesos productivos que utilizamos en diversas industrias.

En particular el aprovechamiento de la radiación solar en procesos térmicos y de generación de energía está siendo la mejor alternativa para la zona Norte y centro del país. Por lo que se vuelve interesante analizar la flexibilidad de ciertos sistemas de concentración que permitan abarcar la mayor cantidad de procesos térmicos según sus requerimientos de potencia y temperatura, para pensar en opciones viables en el marco de los objetivos hacia la carbono neutralidad.

La motivación fundamental de este proyecto es desarrollar tecnología solar de concentración en la IV región de Coquimbo, Chile, para contribuir con la apertura de este campo a futuras investigaciones de innovación y desarrollo tecnológico que apunten a conseguir altas temperaturas de trabajo y potencia suficientes, para distintos procesos térmicos, por ejemplo, cocción de cerámica artesanal, ladrillos refractarios o industrias locales.

También busca entregar herramientas que permitan a organizaciones territoriales o comunidades poder utilizar una fuente inagotable y gratuita en procesos que requieren una alta cantidad de energía. Promoviendo así la autonomía en los procesos y una valoración del potencial tecnológico y económico de la energía solar para la comunidad.

El sistema de helióstato plano, concentrador pseudo parabólico y foco, basado en el diseño de dos reflexiones desarrollado por Felix Trombe, que fue materializado en el horno de Mont-Louis en 1949 alcanzando 3000 °C, es clave para pensar soluciones mediante sistemas de concentración desde otro enfoque, más reducidos y a distintas escalas, sin perder autonomía y performance.

Gracias a las recomendaciones del profesor Roberto Román, sobre las múltiples posibilidades de los sistemas de concentración solar, así como también respecto de las diversas aplicaciones y configuraciones posibles. Este trabajo busca aplicar dichas características mediante las variaciones del área y geometría de el/los heliostatos o del concentrador, alcanzando así amplios rangos de potencia incidente, como también, diversas formas del sistema.

Al pensar en estas posibilidades y conociendo las particularidades climáticas que ofrece la zona norte de nuestro país, el profesor J. Cardemil propuso realizar este estudio mediante iteraciones con el objetivo de conseguir el rango de potencia necesario para una actividad productiva local, lo cual permite estudiar la generación de energía del amplio espectro de configuraciones, optimizar su disposición, superficie reflectiva para los requerimientos deseados y aportar en la autonomía energética de los territorios.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un concentrador solar pseudo parabólico con heliostato móvil y foco fijo, de potencia de 2 a 3 kW térmicos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar condiciones geométricas del arreglo: Heliostato, Concentrador y Foco.
- Simular el sistema utilizando el programa computacional Tonatiuh, iterando sobre las variables relevantes.
- Determinar la configuración óptima para alcanzar 2-3kW de potencia incidente.
- Minimizar la superficie reflectante del sistema
- Maximizar la concentración del sistema

1.4. Alcances

Mediante una potencia deseada y un lugar seleccionado, este estudio permite encontrar las configuraciones que cumplan con dichos requerimientos, a través de un sistema concentrador de dos reflexiones, con heliostato móvil y foco fijo, optimizando la concentración solar y minimizando la superficie reflectiva del arreglo mediante un análisis computacional de modelación 3D.

La simulación del sistema 3D en el software libre Tonatiuh, permite conocer la potencia concentrada en el elemento receptor en cada iteración realizada y así elegir la configuración que alcance la potencia requerida. La solución para una hora y día definidos se encuentra mediante iteraciones de orientación y distancia entre los elementos que conforman el sistema concentrador, lo que permite visualizar las opciones posibles según la superficie reflectiva que se desee instalar y las condiciones propias del lugar.

2. Antecedentes

El Sol ha sido esencial para la vida como la conocemos, desde antes del caldo primordial el planeta se ha ido desarrollando en función de esta fuente masiva de radiación. Diversas culturas y sociedades han entendido su rol en la vida de la Tierra realizando festivales, cultos e incluso nombrando divinidades en su honor.

La idea de usar energía solar para producir grandes temperaturas no es nueva. Historias del 212 D.C cuentan como Arquímedes incendió una flota Romana concentrando los rayos del sol usando cientos de espejos planos. En los siglos XVII y XVIII tanto espejos como lentes fueron usados en 1772 por Lavoisier para construir un sistema concentrador que al apuntar a un horno alcanzó temperaturas cercanas al punto de fusión del Platino (1773°C) [7]

Por ello el disponer de esta energía limpia e inagotable se torna una alternativa cada vez más sólida y el desarrollo de conocimiento para cumplir dichos propósitos se vuelve fundamental. Materializar la transición de los procesos térmicos actuales altamente contaminantes y con alta demanda energética son compromisos del ODS 12: Garantizar modalidades de consumos y producción sostenibles en América Latina y el Caribe [21].

2.1 Energía Solar

Debido a la distancia y energía, el radio del Sol (R) en los estudios y medidas astronómicas tenía distintos valores, por lo que el 2015 la Unión Astronómica Internacional definió el radio solar Nominal igual a 695.700 km [1]. Si bien la Tierra tiene una órbita elíptica entorno al Sol, en promedio se encuentra a 149.500.000 km de distancia. En su núcleo tiene temperaturas en el rango de 8.000.000 K - 40.000.000 K, desde el centro y hasta aproximadamente la mitad de su R se encuentra el 90% la energía generada y tan solo el 15% de su volumen, como muestra la figura 2.1. Más exterior al núcleo entre $0,7 \cdot R$ y R se encuentra la zona convectiva, que está a 13.000 K de temperatura y más exterior de la fotosfera que está en R y tiene la temperatura efectiva de un cuerpo negro, es decir, alrededor de 5.777 K. [4]

La radiación solar al atravesar la atmósfera en parte es reflejada, absorbida o transmitida, al llegar a un punto está conformada por dos componentes: directa (DNI), es decir aquella que llega directamente del Sol, y la difusa, que viene reflejada por distintos cuerpos, principalmente nubes, a la suma de ambas se le conoce como radiación global.

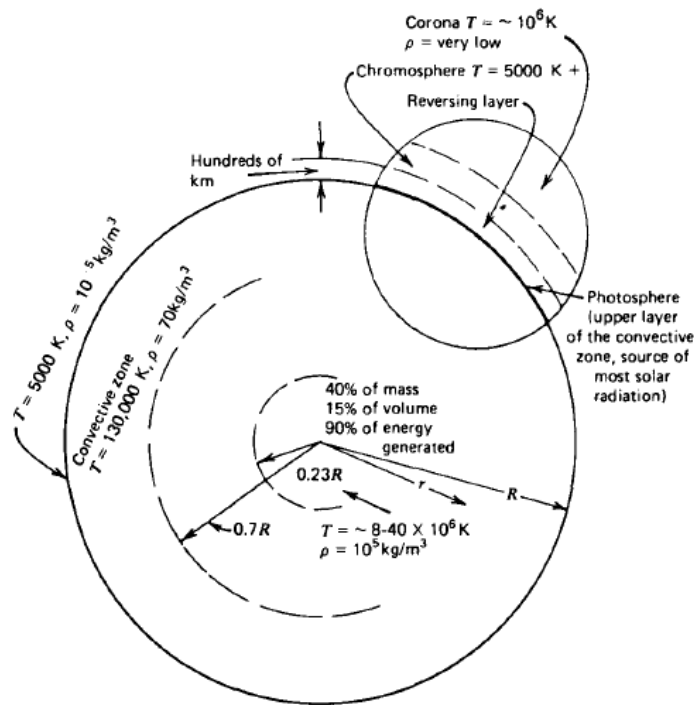


Figura 2.1 Estructura del sol. [4]

Chile posee altos niveles de radiación solar, de hecho, en el norte del país se encuentran los índices de radiación más altos del planeta, específicamente en el desierto de Atacama la radiación normal anual es de aproximadamente 3000 [kWh/m²], tal como se puede apreciar en la figura 2.2.

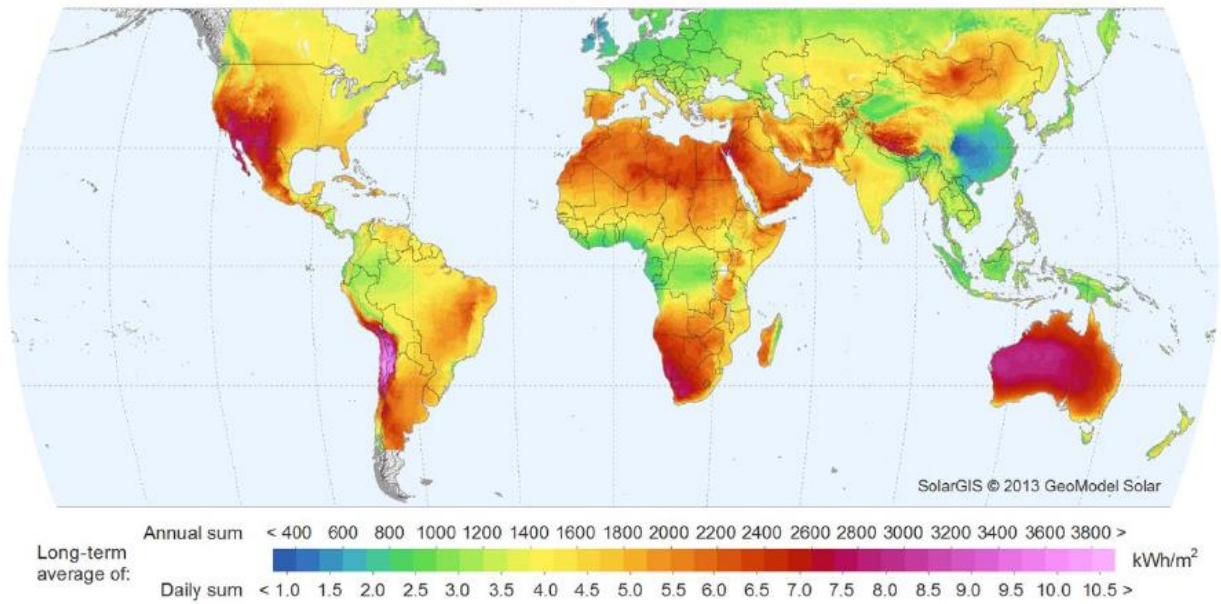


Figura 2.2. Mapa mundial DNI. [2]

Con respecto a la radiación que llega a la Tierra, cuando el medio es ópticamente homogéneo, los rayos siguen trayectorias rectilíneas perpendiculares al frente de onda. Para definir un rayo es necesario desarrollar la idea de considerar al Sol como una fuente no puntual. Si el Sol fuese lo suficientemente pequeño, o estuviese a una distancia considerable, como es el caso de las estrellas, la radiación que nos llega a cada punto de la Tierra podría considerarse como un único rayo.

La relación geométrica entre el radio del Sol y su distancia media a la Tierra hace que este sea visto como un disco cuyo diámetro se subtende bajo un ángulo de 9,3 mrad. Esto implica, que a cada punto de la Tierra llega un rango de rayos procedentes de cada uno de los puntos de dicho disco, formando un cono solar con una apertura definida por el diámetro angular antes nombrado, como se ve en la figura 2.3.

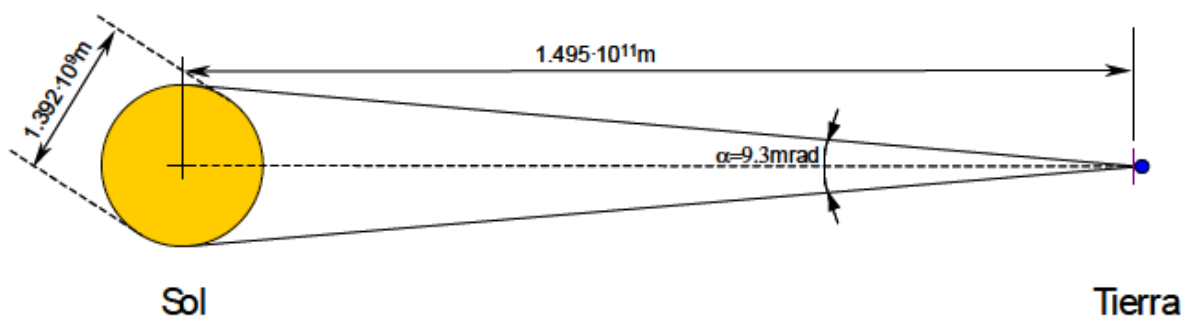


Figura 2.3 Interacción Tierra –Sol [13]

La energía termosolar o energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la radiación solar para generar calor. Mediante la reflexión y la concentración del sol se puede alcanzar un amplio espectro de temperaturas, las cuales pueden llegar hasta los 4000°C. Teniendo en cuenta que el Sol es una fuente inagotable de energía, se vuelve interesante poder facilitar procesos que requieran una alta demanda energética.

En los procesos térmicos industriales, tener una fuente constante de energía puede permitir optimizar los costos de producción. Donde las principales fuentes de energía térmica son mediante electricidad o mediante la combustión de combustibles fósiles o Gas licuado. Al utilizar el sol como fuente, se diseña en función de utilización de la energía incidente en una zona determinada, la cual tendrá variaciones en ciclos diarios, ciclos estacionales y en ciclos anuales, por lo tanto, es fundamental encontrar las alternativas compatibles a los usos convencionales.

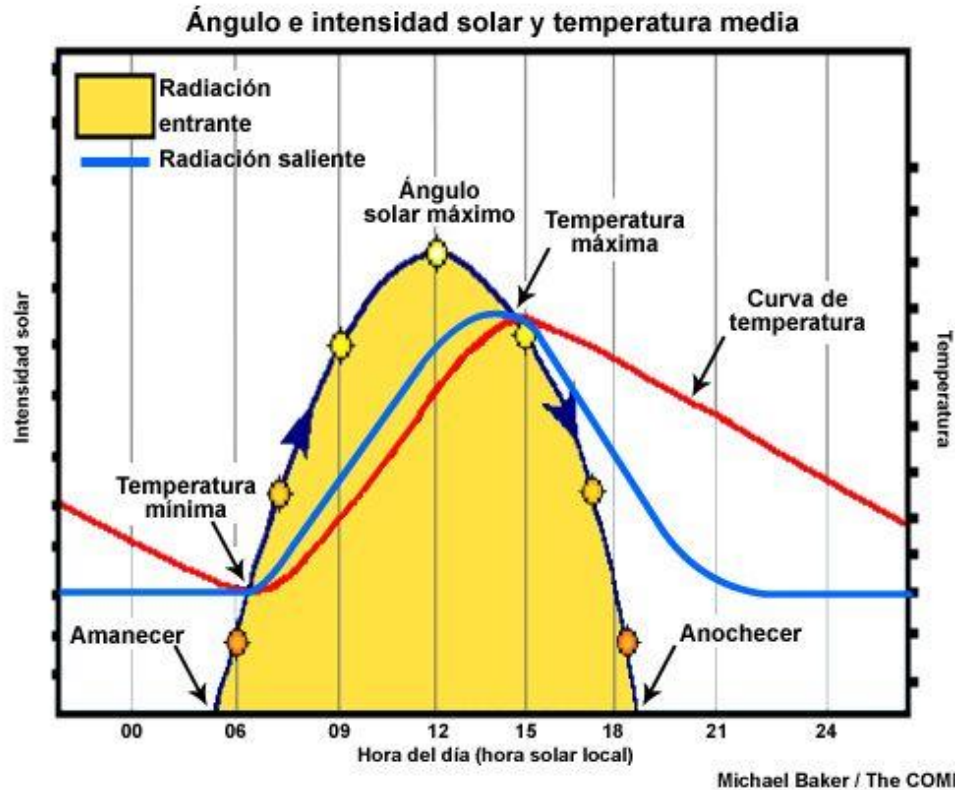


Figura 2.4. Diagrama representativo del sol con respecto a las horas de luz, comportamiento de la temperatura media y la radiación solar

Como se puede apreciar en la figura 2.4, desde el amanecer la radiación del sol aumenta paulatinamente hasta tener un máximo en su curva diaria cuando se encuentra en el zenit, y desde allí la radiación se mantiene un par de horas mientras transita por el zenit y luego disminuye, de esta manera se puede ver cómo la temperatura ambiente del lugar varía, al igual que la radiación que percibe una superficie definida.

2.2 Geometría Tierra-Sol

Como sabemos, el planeta se divide en paralelos, que definen latitudes (ϕ). El hemisferio Norte tiene latitud positiva entre 0° y 90° , y el hemisferio Sur latitudes negativas entre 0° a -90° . El paralelo 0° se llama Ecuador.

Otro parámetro es la longitud que está dada por meridianos de polo Norte a Sur, el 0 es el meridiano que pasa por Greenwich, Inglaterra y de Este a Oeste siguen los meridianos aumentando de -180° a $+180^\circ$ de Este a Oeste. Para definir la posición relativa del Sol respecto de la Tierra se necesitan varias relaciones entre ambos, como también definir ciertos parámetros:

Zenit. Corresponde a la normal, línea perpendicular al plano horizontal en el punto de observación.

ϕ Latitud. Lugar con respecto al ecuador, Norte positivo; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$

δ Declinación. Permite entender la trayectoria del Sol en el transcurso del año y es la distancia angular entre el objeto en la bóveda y el ecuador celestes, se mide de 0 a $\pm 90^\circ$ y los valores positivos hacia el Norte. La declinación solar se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen} \left(\frac{360 \cdot (284 + d)}{365} \right) \quad (2.1)$$

Donde d es el día del año, siendo el 1 de enero $d=1$. En la siguiente imagen se aprecia cómo la declinación solar permite entender las trayectorias del Sol que percibe un observador en el año:

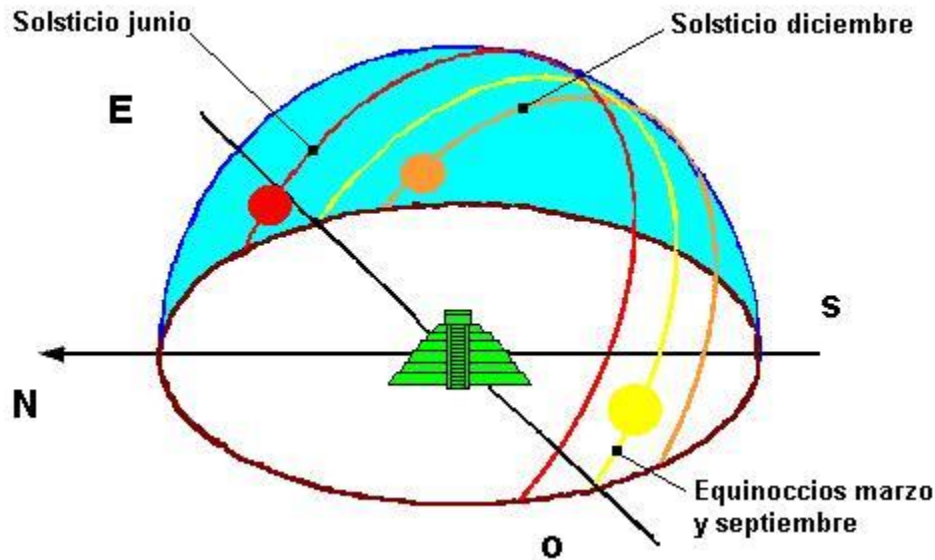


Figura 2.5. Trayectorias de los equinoccios y solsticios. Jaontiveros Kukulcán pyramid sun path.
 Recuperada de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kukulcan_trayectoria_solar.jpg

hs: Hora solar. Cuando el Sol está en su máxima elevación son las 12:00, esta es la hora referente a un día solar y se relaciona con la hora local (h_l) en la siguiente ecuación:

$$h_s = h_l + E - 40[\text{min}] \quad (2.2)$$

Donde h_l : hora local y E: factor de corrección que relaciona la diferencia entre el meridiano de quien observa con el meridiano en el que se basa la hora local, cuya ecuación es la siguiente:

$$E = 9,87 \cdot \sin(2 \cdot B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B) \quad (2.3)$$

$$B = \left(\frac{360 \cdot (d-81)}{364} \right) \quad (2.4)$$

AH: Ángulo Horario. Distancia angular entre la intersección del meridiano del lugar con el ecuador y la proyección del objeto sobre el mismo ecuador, el ángulo horario se mide entre 0 a $\pm 180^\circ$, antes del mediodía valores negativos y en la tarde positivos. Para el Sol, el ángulo horario varía a razón de 15° por hora. El ángulo horario se calcula mediante la ecuación

$$AH = -180^\circ + 15^\circ \cdot h_s \quad (2.5)$$

2.3 Concentración solar

La concentración es la utilización de uno o más elementos reflectantes para redireccionar los rayos del Sol a una zona o punto de interés. De esta forma, el flujo de rayos aumenta tanto como sea posible aumentar el área reflejada hacia dicha zona, así podemos “multiplicar el sol”. Para conseguir la concentración es necesario entender cómo se comportan los rayos incidentes, por esto se vuelve complejo entender la radiación difusa, la que se ve en la figura 2.7, ya que no es posible determinarla con precisión debido a las imperfecciones de las superficies reflectivas, es por ello que los concentradores solo usan radiación directa.

La reflexión especular es técnicamente teórica, dado que el medio permite una reflexión total y el rayo incidente no pierde energía. La reflexión semi especular es la que en la práctica ocurre en las superficies reflectivas utilizadas, donde el rayo pierde cierta energía, pero no se desvía. La reflexión difusa es completamente impredecible lo que junto a su baja energía no permiten que sea considerada en el análisis de concentración.

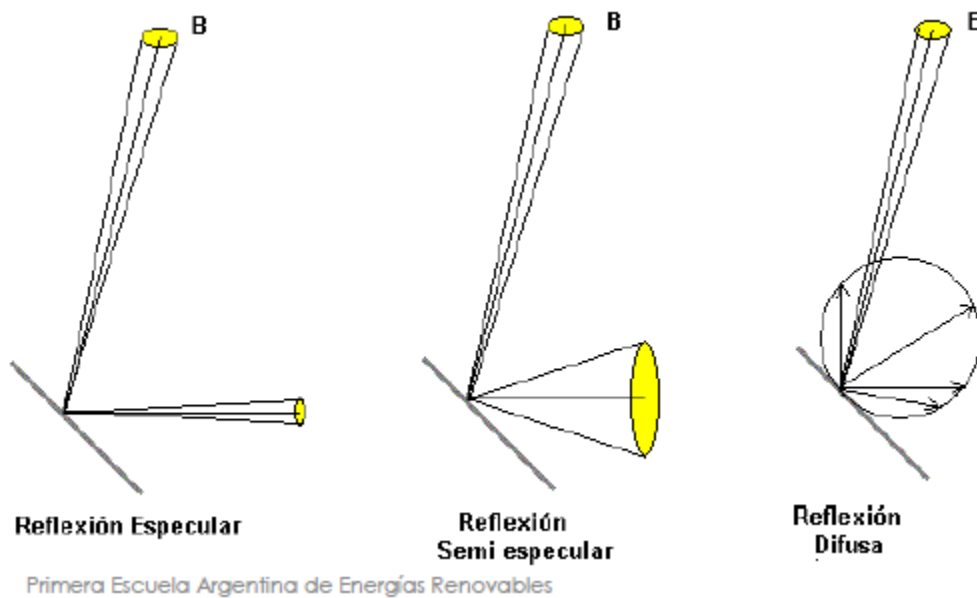


Figura 2.7. Tipos de reflexiones.[4]

Cabe destacar que la concentración solar puede ser geométrica o física, detalladas en las ecuaciones 2.9 y 2.10, la primera de ellas está relacionada con la superficie efectiva y la zona focal; la segunda corresponde al “cociente entre el flujo de energía en la zona del receptor y el flujo de energía incidente en la apertura, normal a la superficie efectiva” [4].

$$Cg = \frac{S_e}{S_r} \quad (2.9)$$

$$Cf = \frac{\phi_r}{\phi_e} \quad (2.10).$$

En la figura 2.8 se esquematizan algunos ejemplos de concentradores. Los cuales detallaremos a continuación.

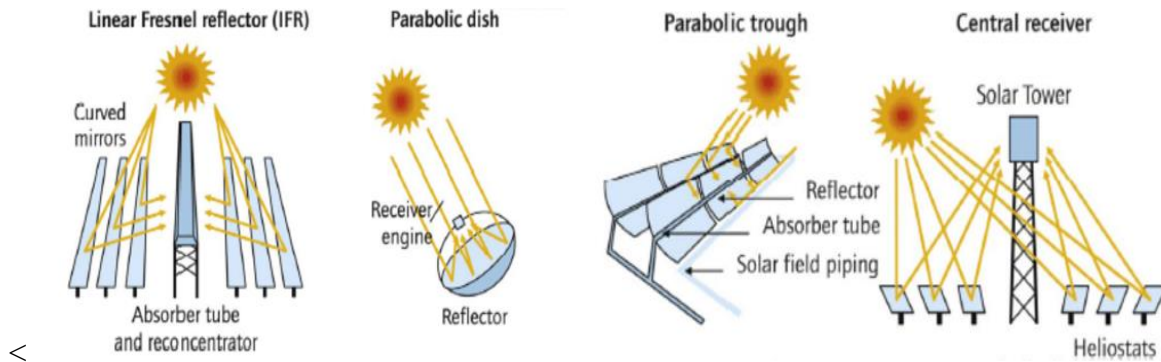


Figura 2.8 Diferentes tipos de concentradores solares [2]

2.3.1 Concentradores de placa plana

Esta tecnología consiste en redireccionar las imágenes del Sol mediante un espejo hacia un punto en común. En la figura 2.9 se puede ver un horno, que posee una apertura focal para que los rayos del Sol incidan en la olla que se encuentra en la zona focal. La apertura posee un vidrio que permite conservar la temperatura y un espejo auxiliar que permite direccionar una segunda imagen del Sol. Este concentrador es el más básico de todos los diseños y en él se duplica el flujo solar incidente.

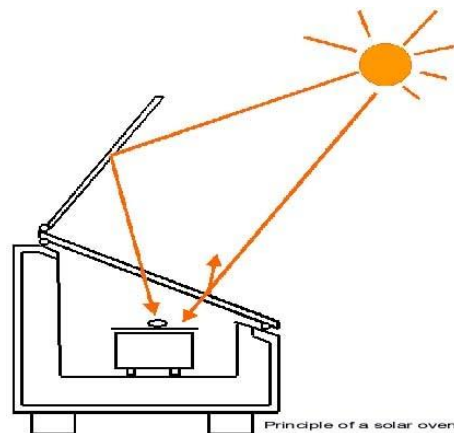


Figura 2.9 Concentrador de placa plana. [2]

2.3.2 Concentrador de torre central

Consisten en una Torre Central rodeada estratégicamente por un campo de helióstatos, que pueden ser miles y redirigen sus imágenes a un mismo punto o foco mediante dos movimientos de seguimiento solar, en altura y en azimut. Esto permite que sea posible dirigir la imagen solar al mismo punto.

El helióstato tiene una geometría de casquete esférico, lo cual permite concentrar la radiación incidente en una zona más pequeña en la torre y la altura de esta permite que los helióstatos no se obstruyan al reflejar. Por tanto, al concentrar la energía incidente en una zona mucho menor, y sumada a la superposición de imágenes de miles de helióstatos, se generan grandes flujos energéticos que permiten alcanzar altas temperaturas de trabajo.

Un ejemplo de esta configuración es la Central solar de Ivanpah instalada en el desierto de Mojave, Estados Unidos (Figura 2.10) que genera una potencia de 392 [MW].

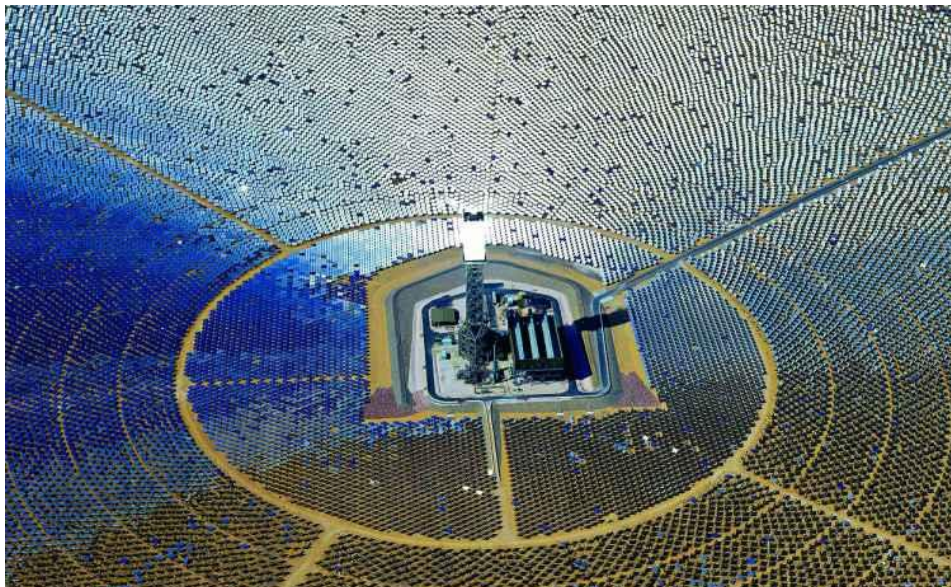


Figura 2.10 Planta de torre central Ivanpah Recuperada de: <https://energia12.com/2015/09/03/la-planta-termosolar-mas-grande-del-mundo-ivanpah/>

2.3.3 Concentrador Scheffler

Un concentrador Scheffler corresponde a una sección lateral de un paraboloides de revolución de mayores dimensiones. Este tipo de concentrador posee receptor fijo, como se ve en la figura 2.11 y tan solo un movimiento de seguimiento solar.

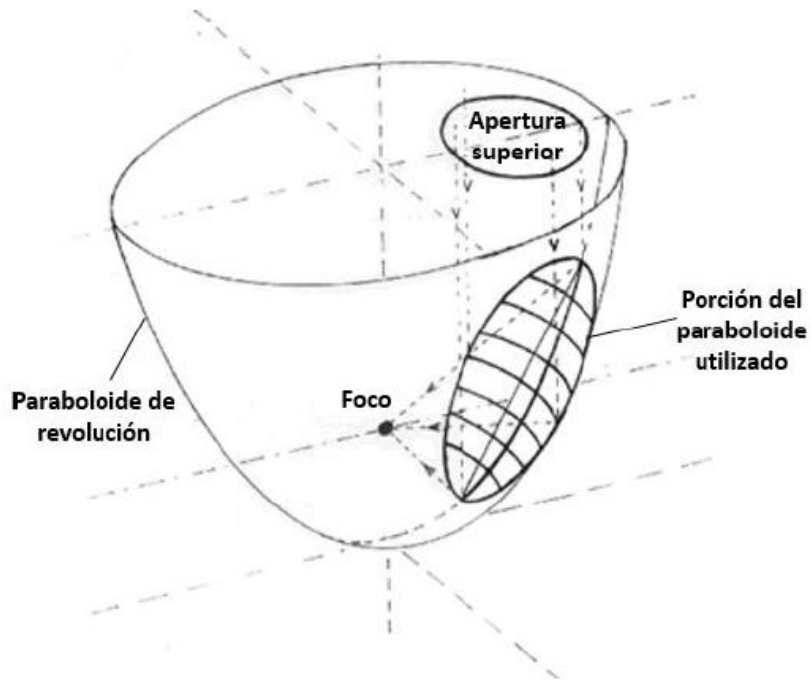


Figura 2.11 Porción del paraboloides de revolución que caracteriza a un concentrador tipo Scheffler.[2]

Esta tecnología fue estudiada por Ignacio Bauerle, egresado del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile, quien diseñó un horno conceptual Scheffler de pequeña escala para la localidad de San Pedro, II región de Atacama, Chile. Bauerle concluye que para temperaturas entre los 1.000-1.200 [°C], el concentrador representa una opción viable y atractiva, pues requiere para alcanzar las temperaturas un área bruta de reflexión del orden de los 5 [m²] y una potencia del orden de 2 [kW] [2]. Por otro lado, para alcanzar temperaturas cercanas a los 1500°C, requiere configuraciones específicas con un área de 20[m²] y mediante una superficie reflectiva continua.

Debido a las dimensiones y complejidad necesarias para su construcción, así como la dificultad en la obtención de las propiedades ópticas, el autor concluyó que no era recomendable. En la figura 2.12 podemos ver un reflector Scheffler siendo probado.



Figura 2.12 Reflector Scheffler construido en Zanzibar, Tanzania. Recuperada de: <https://www.terra.org/categorias/articulos/cocinar-con-el-sol>

2.3.4 Concentradores de 2 reflexiones: Paraboloide de revolución fijo, con heliostato auxiliar

Este tipo de concentrador (Figura 2.13) consiste en un heliostato que redirige los rayos solares a un paraboloide de revolución fijo, esto permite que los rayos incidan de manera paralela al eje focal hacia un foco fijo. El mayor aporte de esta configuración está en la simplicidad del seguimiento y redirección del sol hacia el concentrador, ya que sólo requiere ocuparse de las reflexiones con respecto al eje Zenital y ecuatorial.

La desventaja de trabajar con doble reflexión son las pérdidas asociadas a las reflexiones y al efecto coseno tanto al amanecer como en la puesta de sol.



Figura 2.13 Horno solar de Mont-Louis

En el mundo se han desarrollado hornos de 2 reflexiones con heliostato móvil y foco fijo, como los siguientes:

Horno solar de Mont Louis, Francia, inaugurado en el año 1949 [6] (Figura 2.13), que cuenta con un heliostato de 160 [m²] aproximadamente, que redirige los rayos hacia un concentrador parabólico de aproximadamente 10 [m] de apertura focal y alcanza hasta 3000°C generado 50 [kW] térmicos.

Horno solar de Odeillo, Francia, puesto en operación en 1970 y es hasta el día de hoy uno de los 2 hornos solares más grandes del mundo. Alcanza temperaturas del orden de los 4.000°C, gracias a sus 63 heliostatos móviles que reflejan los rayos a un concentrador parabólico de 48 [m] de alto por 54 [m] de ancho, alcanzando así una potencia térmica de 1 [MW] [2][9].

Plataforma solar de Almería, España, cuenta con tres hornos solares de alta temperatura: el SF-5, SF-40 y SF-60. Tienen una potencia de 5, 40 y 60 [kW] térmicos respectivamente. Por otro lado, logra concentraciones máximas de 6000, 7000 y 3000 soles respectivamente.

Los 3 hornos cuentan con un heliostato móvil, receptor fijo y un concentrador parabólico de revolución los cuales tienen superficies de reflexión de 8,77 [m²], 56,5 [m²] y 99,8 [m²] respectivamente [8].

En Indiana, Estados Unidos, alumnos de Valparaíso University construyeron un horno formado por un heliostato de 36 [m²] que refleja la radiación sobre un concentrador conformado por un conjunto de 305 facetas hexagonales que forman un reflector parabólico de 5,5 [m] de diámetro (Figura 2.14), capaz de proporcionar una energía de 5 [kW] y alcanzar temperaturas cercanas a los 1650 °C. [11]

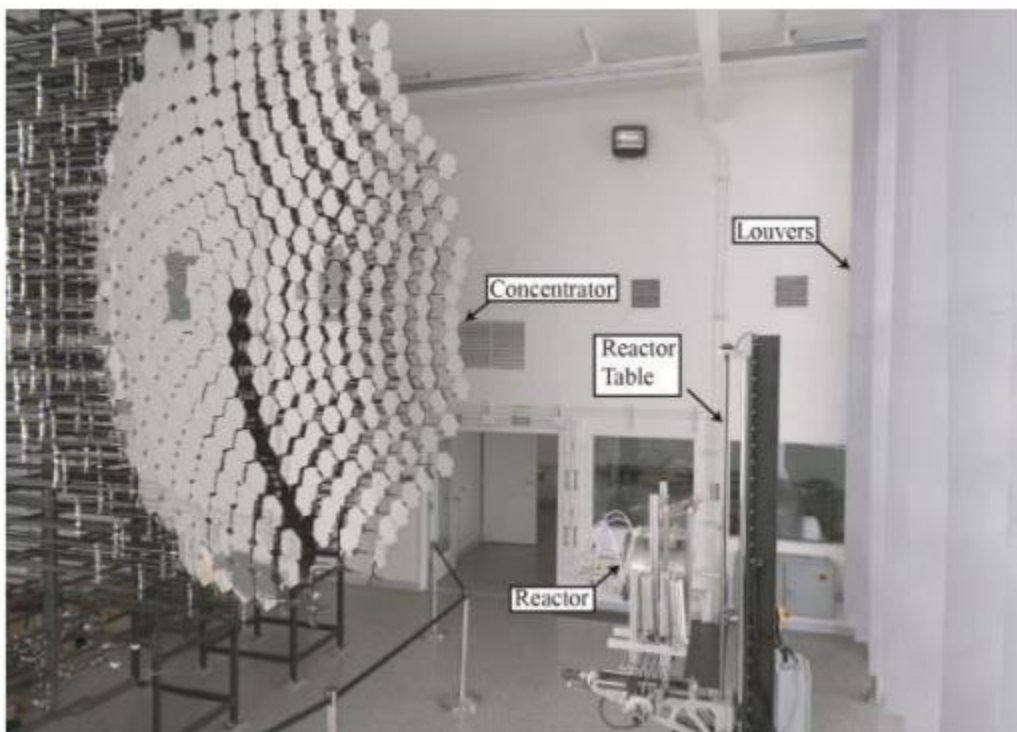


Figura 2.14 Concentrador de facetas hexagonales

Se puede ver que la tecnología de concentración de 2 reflexiones mediante heliostato móvil y foco fijo es versátil y permite trabajar en un amplio rango de temperaturas y potencias según el propósito deseado, motivando el uso de esta para encontrar soluciones.

2.4 Geometría de la parábola

Se denomina parábola al lugar geométrico de un punto que se mueve en un plano de tal manera que equidista de una recta fija, llamada directriz y de un punto fijo en el plano, que no pertenece a la parábola ni a la directriz, llamado foco.

La ecuación general de una parábola de eje vertical, de vértice (h, k) y foco $(h, k + p)$ como la que se ve en la figura 2.15 es:

$$(x - h)^2 = 4p(y - k) \quad (2.4.1)$$

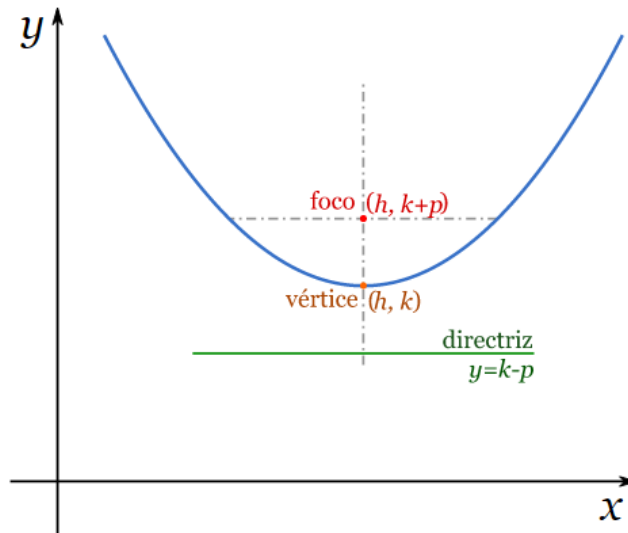


Figura 2.15 Parábola de eje vertical

Para el caso en que la parábola tiene su vértice $(0,0)$ y foco $(0, p)$, la ecuación 2.4.1 queda de la siguiente forma:

$$y = 4px^2 \quad (2.4.2)$$

Donde p es la distancia entre el vértice y el foco, llamada distancia focal. En la parábola se cumple que, la tangente bisecta el ángulo entre el foco, el punto de tangencia y su proyección a la directriz. Lo que en consecuencia permite que, líneas paralelas al eje de la parábola, también paralelas a la proyección a la directriz, sean reflejadas en dirección al foco, como se ve en la figura 2.16.

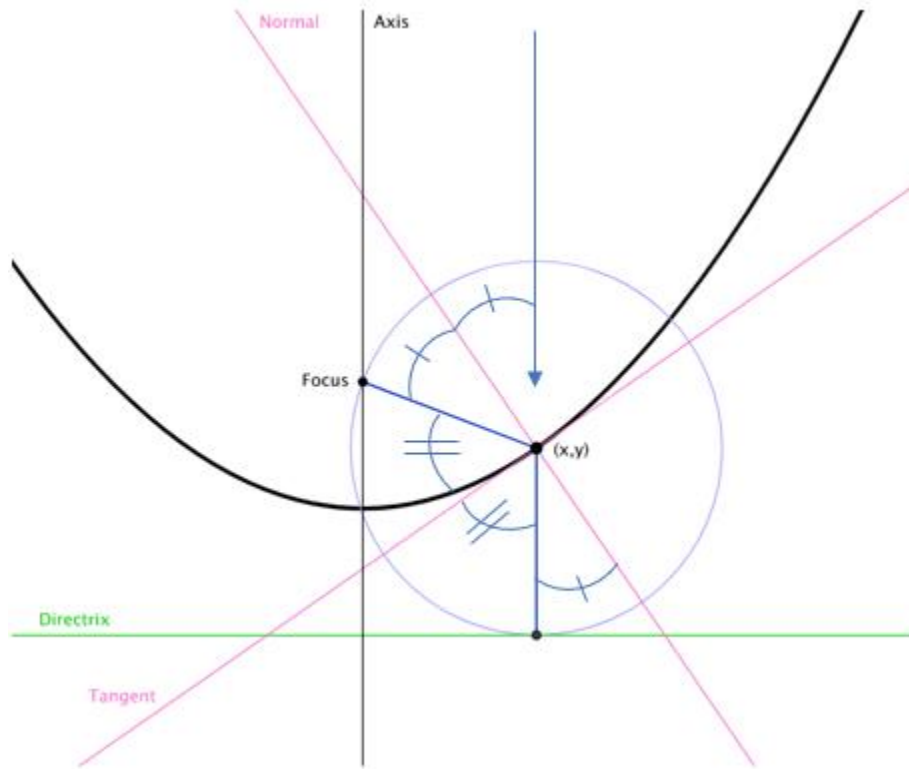


Figura 2.16 Ángulos con respecto a la tangente y la normal del punto de tangencia

Cuando el eje de la parábola es horizontal, la ecuación que se obtiene es similar a 2.4.2, intercambiando los roles de x , y , fijando el vértice en $(0,0)$ y el foco en $(p, 0)$, como se ve en la figura 2.17.

$$x^2 = 4py \quad (2.4.3)$$

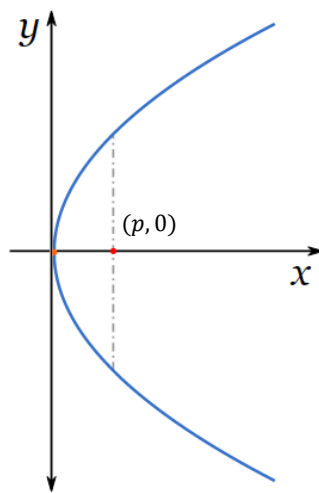


Figura 2.17 Parábola de eje horizontal

2.5 Cocción (firing) de cerámica Gres

La cocción o firing es un proceso de alta temperatura que busca unificar los elementos constituyentes, por lo general silicatos mezclados con una base de Sílices (SiO_2). Según los materiales en la pieza, la temperatura final de la cocción puede ascender hasta 1200-1300 °C para cerámica Gres y porcelana e incluso acercarse a los 1500°C con el cemento hidráulico o Portland. [16]

Cerámica en verde es el nombre que se le da a la cerámica que se encuentra en cualquier proceso previo a la cocción, ya sea recién moldeada o secándose, en esta etapa se puede agregar más material e incluso cambiar su forma mediante adición de agua. Una vez conseguida la forma final, esta debe secarse hasta que pierda toda la humedad y la pieza pueda ser movida sin desmoronarse.

Las piezas secas se distribuyen en la cámara del horno de manera que permita encontrar una buena distribución de las temperaturas al interior, el proceso inicia a temperatura ambiente y aumenta de forma paulatina hasta llegar a las 100°C, en este punto el agua se evapora.

La temperatura sigue aumentando hasta el punto en que los componentes vitreos de la pieza se derriten y mediante el llenado de los intersticios entre las partículas de la arcilla se mezclan para formar vidrios de silicato (silicate glass). Posterior a la temperatura de firing o de cocción la fuente de energía se detiene y las piezas se dejan enfriar en el horno hasta temperatura ambiente

El tiempo del proceso de cocción, cómo también la calidad de este puede depender de muchos factores, algunos técnicos como la potencia del horno o la aislación térmica de la cámara y otros ligados a la experiencia como una buena distribución de las piezas en la cámara o un buen proceso de secado. Llegar a la temperatura de firing puede demorar desde 4-5 horas [22] a 10 -12 horas si la potencia del horno es muy baja o la cámara fue cargada con muchas piezas, entre muchas otras razones.

Actualmente la energía térmica necesaria para facilitar la cocción se genera mediante resistencias eléctricas en las paredes de los hornos de cámara o mediante combustión con quemadores situados en la base de la cámara del horno, ejemplos de estos dos hornos se pueden ver en la figura [2.18].



Figura 2.18 A la izquierda un horno eléctrico de cámara y a la derecha un horno de Gas

En la tabla 2.1 se recopilan distintos hornos eléctricos de cámara, se detallan sus dimensiones y las distintas potencias. Corresponden a proveedores españoles, Emison [19] y Hornos del Valle S.A. [20].

Tabla 2.1 Tabla comparativa entre distintos hornos eléctricos

Proveedor	Modelo	Dimensiones interiores [m]			Potencia [kW]	T max [°C]
		Ancho	Fondo	Alto		
Emison	CH-36	0,3	0,4	0,3	4	1300
Emison	CH-50	0,35	0,4	0,35	5	1300
Emison	CH-64	0,4	0,4	0,4	6	1300
Hornos del Valle	Bemjamin 1S	0,21	0,23	0,23	2,5	1300
Hornos del Valle	Bemjamin 2S	0,33	0,3	0,345	3	1300
Hornos del Valle	Bemjamin 3S	0,33	0,34	0,46	4,2	1300

Para la operación de los hornos eléctricos, la potencia requerida por el proceso va aumentando conforme aumenta la temperatura en la cámara, hasta llegar a la potencia total, de otro modo, si partiera con el 100% la cerámica se estropearía inmediatamente. Este comportamiento también se puede encontrar en una fuente como el sol, el cual se ve en la figura 2.4, que aumenta su radiación incidente hasta un máximo y paulatinamente disminuye hasta la puesta de sol.

Al entender las similitudes entre el uso de la fuente eléctrica y la disponibilidad de energía solar para procesos térmicos, se torna muy interesante alcanzar con tecnología de concentración a una potencia incidente similar a las potencias de los distintos modelos de hornos eléctricos.

3. Metodología

Esta memoria desde su origen se pensó como un sistema de concentración solar de dos reflexiones, cuyos elementos son un heliostato móvil, un concentrador pseudo parabólico fijo de facetas hexagonales y un foco plano.

El lugar elegido para modelar el sistema y sus dimensiones es la localidad de Guangualí, ubicada en la comuna de Los Vilos, provincia del Choapa, IV región de Coquimbo, Chile (Tabla 3.1). Esta decisión está motivada por la compatibilidad que tiene el sistema concentrador con los procesos térmicos de altas temperaturas requeridos en la producción de cerámica gres, producto típico de la zona. Esto permite ofrecer una alternativa sustentable al horno eléctrico de inducción que se utiliza actualmente para estos procesos, el cual se detalla en la sección 2.5

Tabla 3.1 Características geográficas de Guangualí

Nombre	Guanguali	
Latitud	32,136151	°S
Longitud	71,359085	°O
Altura	105	Msnm

El estudio consistió en la realización de modelaciones del sistema concentrador en Tonatiuh a través de iteraciones, fijando los parámetros conocidos que se detallarán más adelante y variando 3 de los parámetros relevantes del sistema. La orientación del sistema se explica en la sección 2.1.2, con el heliostato direccionando hacia el Norte y la apertura del concentrador dispuesta hacia este.

Todas las iteraciones se realizarán el día 21 de diciembre del año 2019, a la misma hora, se eligen las 12 hora solar, para que el Ángulo Horario sea nulo. Mediante el explorador solar se obtuvo la tabla de radiación directa normal promedio (figura 3.1) para cada hora y mes, con ella se decide utilizar un valor de radiación de 900 [W/m^2].

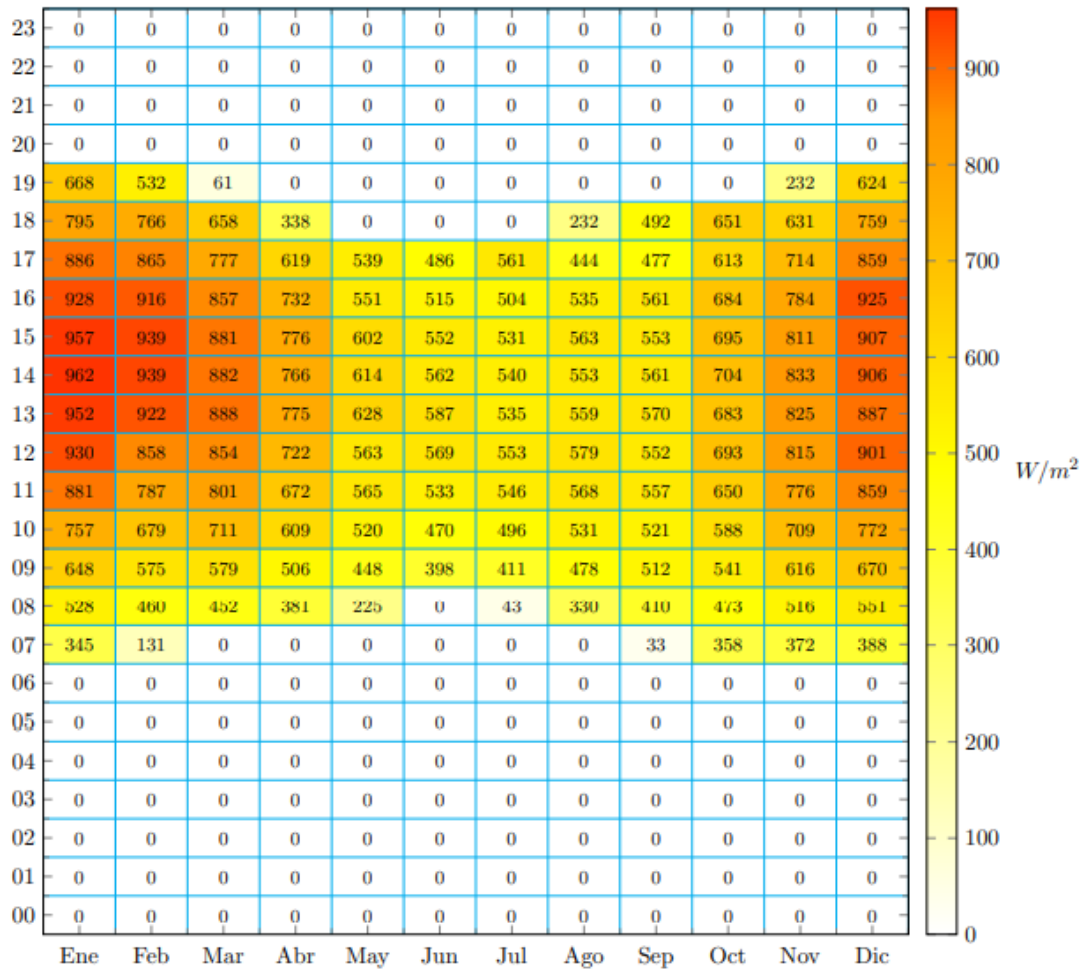


Figura 3.1 Promedio de la radiación directa normal para cada hora y mes

Se utilizó Tonatiuh, programa de trazado de rayos 3D, para la modelación del sistema de concentración, el cual permite simular los rayos de luz proveniente del sol o de fuentes de luz artificial. También permite entender cómo los rayos lumínicos se relacionan con distintas superficies, de esta forma se pueden entender las trayectorias que siguen y las variables que inciden en su comportamiento.

El programa Tonatiuh utiliza el modelo Monte Carlo de trazado de rayos para calcular la integral de cualquier función, eligiendo aleatoriamente puntos en el dominio de integración y promediando el valor de la función en estos puntos, podemos usar esta técnica para integrar la cantidad de luz que llega a la cámara dentro de un píxel para calcular el valor de este.

Por ejemplo, se selecciona aleatoriamente un punto dentro del píxel para disparar el primer rayo, y luego continúa eligiendo aleatoriamente una dirección para continuar en la superficie en la que aterriza, y así sucesivamente. Se replica esta acción una gran cantidad de veces, de modo que cada replicación individual no tenga una incidencia relevante en el total.

Tonatiuh permite modelar libremente elementos de forma 3D, y así tener una noción más certera de la disposición de todos los elementos en el espacio. Esta herramienta permite crear elementos con variadas geometrías mediante el “Surface Node”, como se ve en la figura 3.2, el cual permite definir las características de forma mediante la opción “shape”, a su vez diferentes características superficiales que tendrá el elemento, mediante la opción “Material”.

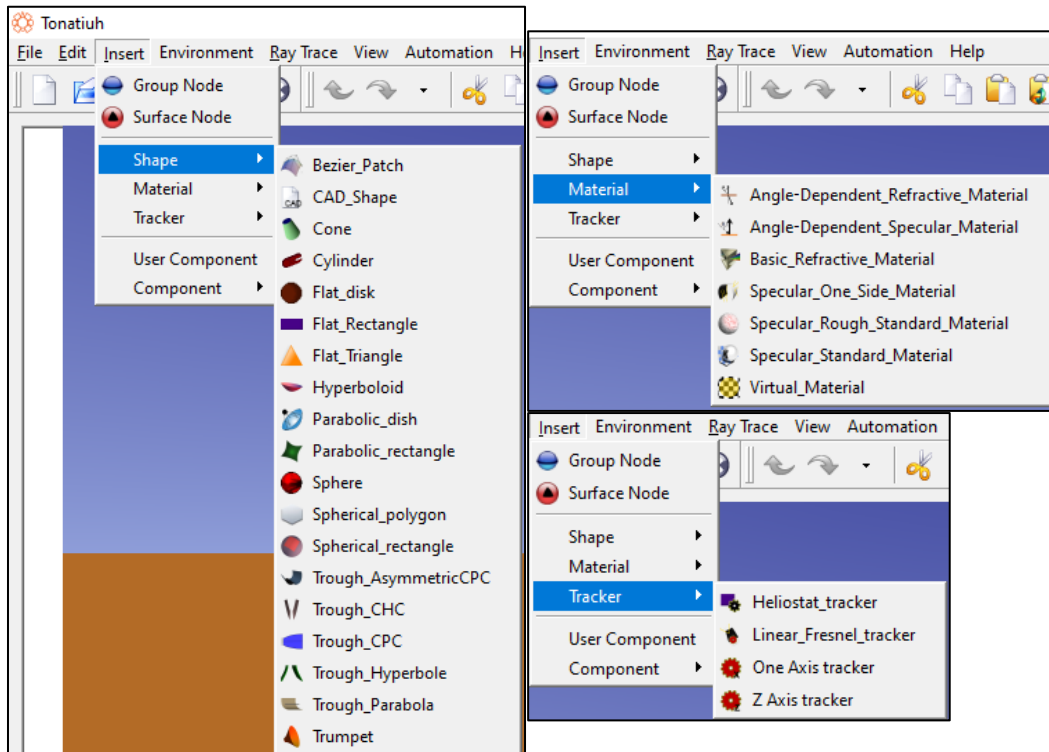


Figura 3.2 Herramientas de Tonatiuh

El “Group Node” es la unidad básica que permite definir posiciones y características espaciales que se muestran en la figura 3.3. El o los Nodos definidos bajo un “Group Node” poseerán dichas características por lo que se usan para definir la posición e inclinación de los elementos constitutivos del sistema. La herramienta “tracker”, que se ve en la figura 3.2 debe ser definida dentro de un “Group Node” y permite realizar distintos tipos de seguimiento según lo requiera el usuario, todo con el fin de poder reproducir de la mejor forma el arreglo a simular.

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

Figura 3.3 Características del Group Node

Mediante la herramienta Run Flux Análisis se puede definir una superficie de interés, la cara donde se quieren evaluar los rayos incidentes, el número de rayos para la simulación, las divisiones verticales y horizontales de la superficie a estudiar e incluso tiene la opción de etiquetar los ejes coordenados x e y para la lectura del gráfico, como se puede ver en la figura 3.4.

También cuenta con la opción para definir una carpeta y el nombre del documento con el cual exportar ambas coordenadas de la superficie elegida y el valor de la potencia para cada par coordenado. En la imagen 2.18 se puede ver una prueba de la herramienta Run Flux Análisis, con 50 divisiones por cada eje, donde se elige un numero de rayos igual a 500.000 para tener una buena definición en el grafico del Flujo incidente. La Potencia Total no varía, solo varía la precisión del análisis. Cabe destacar que si el Grid (división del Gráfico) es muy detallado o el número de rayos no es suficiente, el gráfico de flujo incidente se volverá confuso, como se puede ver en el Anexo A.

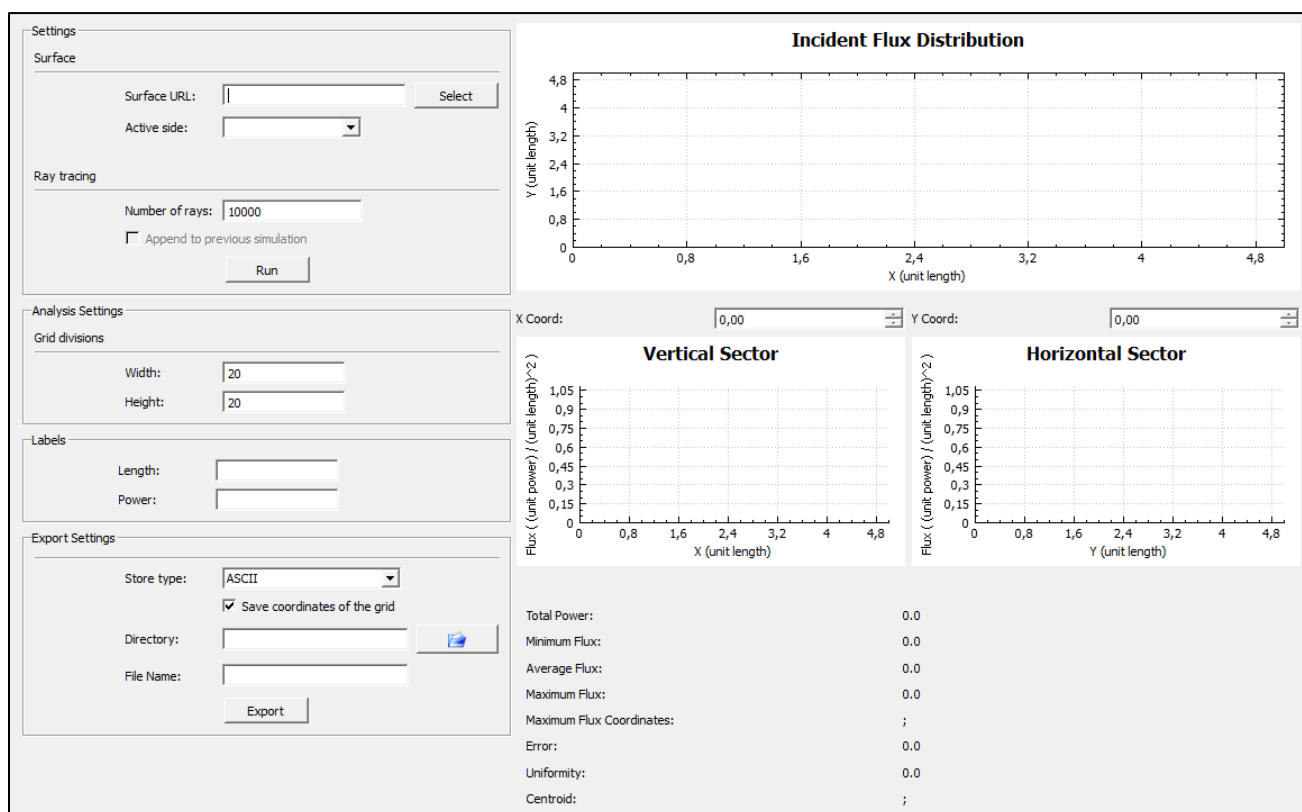


Figura 3.4 Herramienta Run Flux Análisis

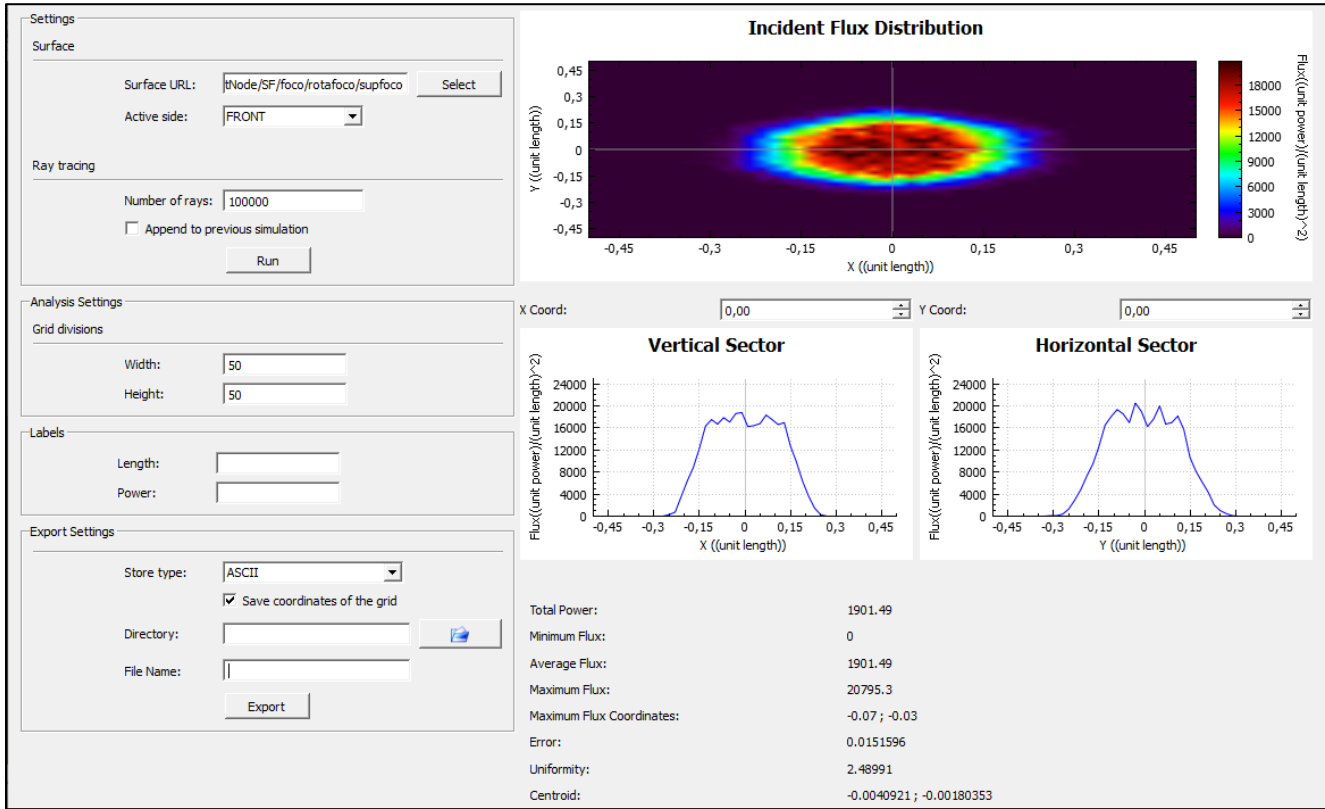


Figura 3.5 Vista gráficas herramienta Run Flux Analysis

Otros parámetros a tener en consideración son las propiedades ópticas que se definen para el sistema. El parámetro que más influye es el error óptico, el cual reúne los diferentes errores existentes, asociados a una desviación normal del sistema reflectivo y deja fuera los efectos asociados a la forma solar.

Los errores asociados a un sistema reflectivo son los errores locales de pendiente como deformaciones a causa de la estructura soportante u ondulaciones superficiales por errores en la construcción, también el efecto que supone una superficie que no sea perfectamente especular y por último los errores de seguimiento asociados a la tecnología utilizada para mantener el Heliostato en un ángulo óptimo. Tonatiuh considera mediante el parámetro σ_{slope} el error de pendiente, el efecto de la no especularidad y el error de seguimiento, dado que no lo contempla en las herramientas de los trackers que se pueden definir.

El error de seguimiento provoca una incertidumbre sobre la dirección del rayo incidente, porque aplicando la ley de Snell supone incertidumbre de error de la dirección del rayo a la salida. La no especularidad también provoca una incertidumbre en la dirección del ángulo de salida tras cada reflexión y los errores de superficie suponen las variaciones angulares de la dirección normal que se traduce como una variación del ángulo de salida.

En el programa Tonatiuh para definir superficies reflectantes se usó la opción “Specular Standard Material” el cual se define según los parámetros que se ven en la figura 3.6

Donde la reflectividad depende del coeficiente de reflexión de cada superficie. Los valores de la reflectividad varían entre los 0,9 [9][17] y los 0,95[14], por lo que se elige un valor de 0,92. En valor de Sigma Slope se define todos los errores de superficie y de seguimiento, mientras mayor sea el valor del error, más probable será que el rayo se desvíe de su trayectoria lo que se traduce en una mayor apertura del cono luminoso.

Specular_Standard_Material	
Parameter	Value
m_reflectivity	0.92000002
m_sigmaSlope	2
m_distribution	NORMAL
m_ambientColor	0.2 0.2 0.2
m_diffuseColor	0.80000001 0.80000001 0.80000001
m_specularColor	0 0 0
m_emissiveColor	0 0 0
m_shininess	0.2
m_transparency	0

Figura 3.6 Parámetros de las superficies reflectantes

Para los siguientes parámetros la figura 3.6 muestra los valores por default del programa. Ambient Color es el color que refleja el elemento según la iluminación ambiente que haya en el sistema. Diffuse Color define el color base del elemento. Specular Color es la calidad reflectiva de los puntos más destacados del elemento. Emissive Color se refiere a luz emitida por el elemento. Shininess representa el brillo de la superficie del elemento, donde el rango va del 0, valor para una superficie difusa sin brillo, hasta 1, el de una superficie altamente pulida. Transparency es la transparencia de una superficie, 0 significa totalmente opaca y 1 completamente transparente.

Una herramienta clave de Tonatiuh para el desarrollo de iteraciones y modificación de sistemas con numerosos elementos y junto a una posterior adquisición de datos es la herramienta Automatización, que permite entrar al “Script Editor“, que se ve en la figura 3.7, el cual permite programar la generación de los sistemas, las ecuaciones que rigen las posiciones e inclinaciones de cada elemento, realizar iteraciones, configuración en las características superficiales del sistema y usar la herramientas Run Flux Análisis” para exportar los valores de la superficie de interés en cada configuración.

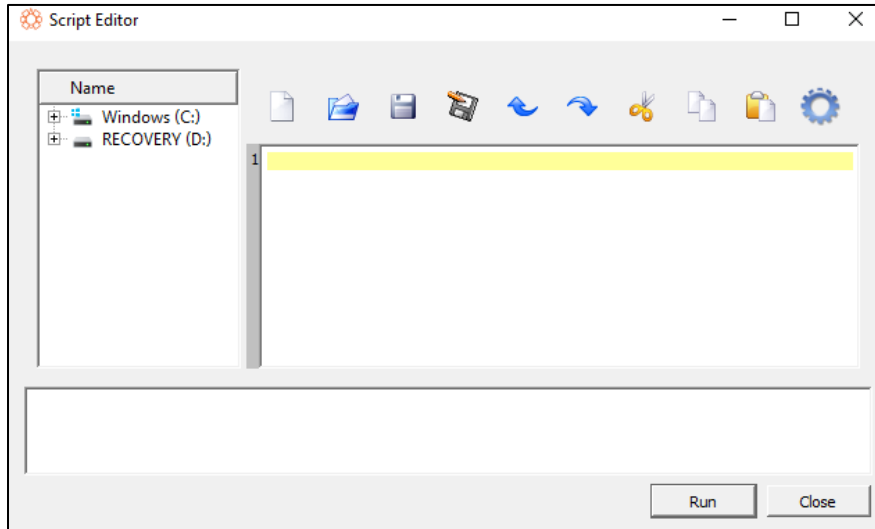


Figura 3.7 Script Editor

Para realizar un código en Tonatiuh es importante revisar el repositorio de Github donde se detallan las acciones programadas y los procedimientos para definir los elementos, superficies, conjuntos, ecuaciones e incluso las herramientas matemáticas para codificar las ecuaciones necesarias. Además el código fuente de Tonatiuh está escrito en ECMA2 [10], lenguaje que reconoce y facilita el uso de funciones, variables booleanas y strings para la programación.

El sistema óptico se resuelve mediante un análisis energético, por lo que se debe establecer la forma solar. El sol es la fuente emisora de radiación, definida en el programa como “Sun shape”, concepto que recoge las variaciones sobre la distribución radial de energía como fuente luminosa no puntual. Tonatiuh tiene dos distribuciones de radiación predefinidas, la distribución angular tipo Pillbox y la distribución basada en el modelo de Buie. Pillbox se define dado que la fuente y el observador están muy lejanos, el segundo puede percibir un disco perfecto de brillo constante en toda su superficie y este se ve como un disco de 4,65 mrad radio aproximadamente [11]. La distribución Pillbox se puede apreciar en la figura 3.8 y considera una distribución energética constante en el rango angular.

Donde Buie y Monger dedujeron que la distribución espacial de la energía del Sol, si se representa por su relación circunsolar (CSR), es independiente de la ubicación geográfica. La CSR (χ) se define como el flujo radiante contenido dentro de la región circunsolar del cielo (Φ_{CS}), dividido por el flujo radiante incidente (Φ_i), procedente tanto de la radiación directa como de la aureola solar [12].

$$\chi = \frac{\Phi_{CS}}{\Phi_i} \quad (3.1)$$

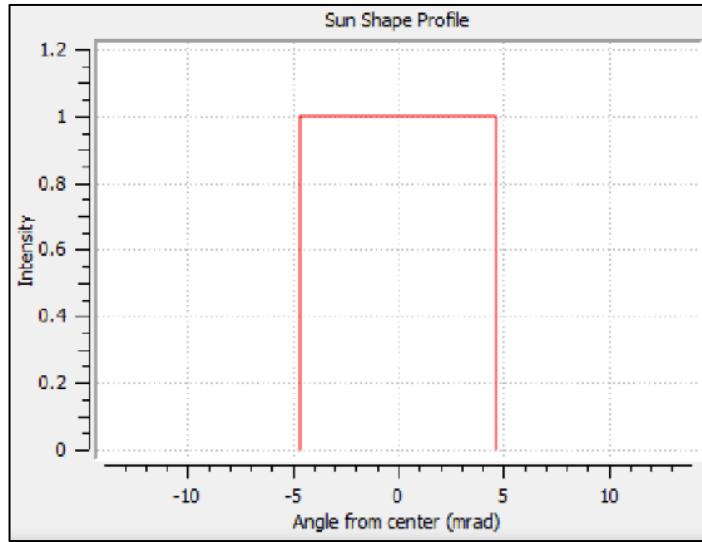


Figura 3.8 Distribución tipo Pillbox

Posteriormente Buie y Monger [18] fueron aún más lejos y definieron un algoritmo que puede ser usado para definir la forma solar denominada como uno de los autores, Buie. De forma que la distribución radial de energía solar queda determinada por las siguientes ecuaciones:

$$\Phi(\theta) = \begin{cases} \frac{\cos[0,326\theta]}{\cos[0,308\theta]}, & \text{para } 0 < \theta < 4,65 \\ e^{k\theta^\gamma}, & \text{para } 4,65 < \theta < 44 \end{cases} \quad (3.2)$$

Donde k y γ vienen dados por:

$$k = 0,9 \cdot \ln[13,5\chi] \chi^{-0,3} \quad (3.3.)$$

$$\gamma = 2,2 \cdot \ln[0,52\chi] \chi^{0,43} - 0,1 \quad (3.4.)$$

Siendo χ la relación circumsolar de la distribución solar y θ la componente radial de la desviación angular, medida en miliradianes.

Este algoritmo no varía con cambios de ubicación geográfica y evidencia que, en promedio, la relación circumsolar define la distribución espacial de la energía a través del disco solar y la aureola solar, permitiendo su uso como un modelo genérico de forma solar (sunshape) basado en la CRS. Se elige el modelo Pillbox dado que al ser homogéneo permite entender mejor el comportamiento de los rayos como el ajuste de los errores y pérdidas en los elementos reflectantes [13].

La radiación de la fuente está en $[W/m^2]$ y el θ_{max} (disco solar) está en rad, como se ve en la figura 3.9.

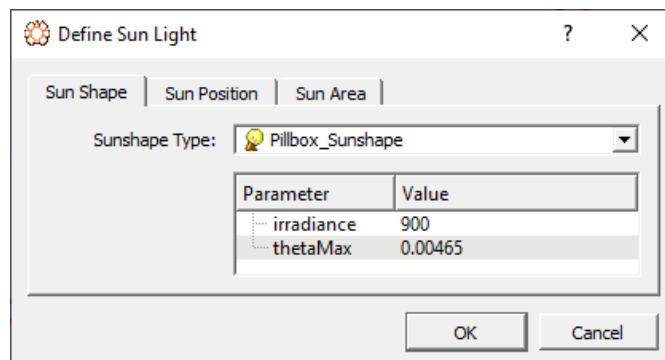


Figura 3.9 Definir la forma solar (Sun Shape)

3.1 Configuración del Sistema

El primer paso fue definir los parámetros a iterar en el sistema, de acuerdo con su influencia en las superficies reflectantes, para cada uno de ellos se eligieron 5 valores, tanto de superficie reflectiva como de distancia focal, los cuales se detallan en la tabla 3.2

Tabla 3.2 Valores de los parámetros a iterar

Distancia focal (Df)	2	4	6	8	10	[m]
Area del Heliostato	1	4	9	16	25	[m ²]
Area del concentrador*	1	4	9	16	25	[m ²]

Cabe destacar que la Distancia focal, se refiere a la distancia del foco al vértice de la parábola que define la posición z del concentrador, la cual esta detallada en la sección 2.4.

*El área del concentrador busca reflejar la misma área que refleja el heliostato, pero debido a que es un conjunto de facetas hexagonales, se decidió definir un Nx, numero de facetas en una fila y Ny, numero de facetas en una columna, para alcanzar un área similar a la definida en la iteración. Se calcula el área de 1 faceta y se divide por el área de la iteración y así se llega a un número de filas y columnas 3.3.

$$\text{Arista faceta} = 0,2 \text{ [m]} \quad (3.5)$$

$$\text{Área de la faceta} = 6 \cdot 0,2^2 \cdot \sqrt{3}/4 = 0,1039 \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.6)$$

Tabla 3.3 Número de facetas por cada iteración

Área Iteración	1 [m ²]	4 [m ²]	9 [m ²]	16 [m ²]	25 [m ²]
Nº facetas calculado	9,6	38,49	86,60	153,96	240,56
Nº facetas elegido (Nx · Ny)	16 (4 · 4)	49 (7 · 7)	121 (11 · 11)	196 (14 · 14)	289 (17 · 17)

Si bien el número de facetas elegido es bastante mayor al entero siguiente, con respecto al número de facetas calculado, esto se justifica porque las facetas al estar inclinadas en 2 ejes, disminuye el área efectiva de reflexión. También la separación entre ellas es un factor a tener en consideración, por lo que se eligió un número que asegurara la reflexión de cada área del heliostato seleccionada. Luego de las iteraciones se puede ajustar el número de facetas según reflejan los rayos o se quedan fuera de la imagen del heliostato.

La importancia de variar las áreas de los elementos reflectantes es directa, dado que, al aumentar la superficie, aumenta la energía que direccionan al foco. La distancia del foco es relevante, dado que cambia todas las ecuaciones que definen las posiciones y ángulos de las facetas del concentrador, como se detalla más adelante.

Las coordenadas para los elementos del sistema se pueden ver en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Coordenadas de los elementos del sistema

	X	y	z	
Heliostato	xHel	0	zHel	[m]
Concentrador	Xi	yi	Zi	[m]
Foco	0	0	Df	[m]

Con respecto al Heliostato las coordenadas que se presentan son las que definen la posición de su centro, donde xHel está definida por la ecuación 3.7. Con zHel=10[m] debido a que en algunas de las configuraciones del sistema cuando Df > zHel el mismo Heliostato podía producir obstrucción de los rayos al estar delante del Foco.

xHel: Posición del heliostato en x, que coincide con el centro del concentrador

$$xHel = (2 * ar + t) * \left(\frac{Nx}{2}\right) - 5 * foc \quad (3.7)$$

ar: Arista de la faceta

t: Distancia entre facetas

foc: Mitad de la arista de la superficie focal

Nx: Numero de Columnas de facetas del concentrador, que varía según el área definida en la iteración

Los valores que adopta xHel en función de Nx se detallan en la tabla 3.5 y los parámetros fijos de las ecuaciones se detallan al final de esta sección en la Tabla 3.9.

Tabla 3.5 Valores de xHel con respecto al número de facetas de la iteración

Nx	4	7	11	14	17
xHel	-1,15 [m]	-1,6375 [m]	-2,2875 [m]	-2,775 [m]	-3,2625 [m]

Para el Heliostato plano, que realiza la primera reflexión, se busca apuntar al centro del concentrador procurando que sus rayos sean dirigidos paralelos al eje de la parábola según lo detallado en la sección 2.4. El ángulo del heliostato (*angHel*) se calcula según la ecuación 3.8.

$$angHel = 90 - (Altura Solar)/2 \quad (3.8)$$

El área efectiva de reflexión se refiere a la superficie que la fuente percibe, si esta se dispone con su normal hacia la fuente, el área efectiva de reflexión será igual al área de superficie, pero esto no tendría sentido porque los rayos serían reflejados a la fuente. Por esto para direccionarlos se necesita inclinar dicha superficie, y con esto el área efectiva de reflexión disminuye.

El parámetro que nos permite entender este fenómeno es el factor coseno (*fcos*), el cual se refiere a esta la variación del área que perciben los rayos incidentes, en este caso particular los rayos de la fuente de programa Tonatiuh con respecto al heliostato. El factor coseno de heliostato se calcula según la ecuación 3.9. y se refiere a la inclinación que realiza la normal con respecto a los rayos incidentes.

$$fcos = \cos (90 - angHel) \quad (3.9)$$

Tabla 3.6 parámetros de entrada del sistema y del heliostato

	Valores	Unidades
Altura Solar	81,3136	[grados]
AngHel	49,3431	[grados]
Fcos	0,7586	

Para la modelación, primero se creó un Group Node y se nombró “SC” por Sistema Concentrador, en el Nodo SC se crean 3 Nodos más, 1 para cada elemento de la configuración: Heliostato, Concentrador, Foco como se ve en la figura 3.10.

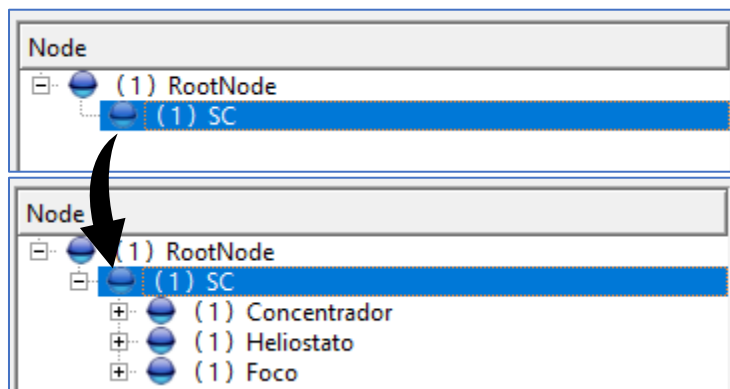


Figura 3.10 Definir elementos del sistema de concentración

Primero definimos el Heliostato y el Foco, por lo que se genera un Group Node más, con el fin de definir sus traslaciones e inclinaciones respectivas, a continuación se define un Surface Node, mediante el cual podemos definir la forma y características de superficie como se ve en la figura 3.11 y 3.12, donde en la segunda figura se aprecia que la reflexión del foco es nula lo que facilita el análisis en el punto focal al comportarse similar a un cuerpo negro.

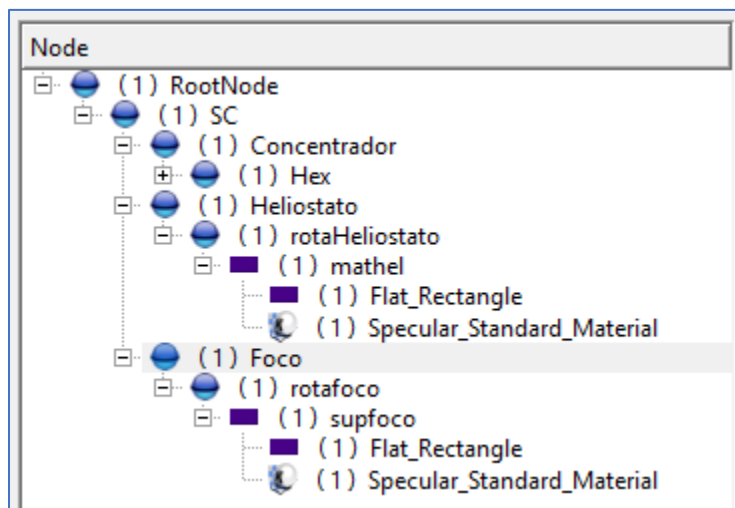


Figura 3.11 Heliostato y Foco creados

+ (1) Foco		+ (1) Heliostato	
Specular_Standard_Material		Specular_Standard_Material	
Parameter	Value	Parameter	Value
m_reflectivity	0	m_reflectivity	0.92000002
m_sigmaSlo...	2	m_sigmaSlo...	2
m_distributi...	NORMAL	m_distributi...	NORMAL
m_ambient...	0.2 0.2 0.2	m_ambient...	0.2 0.2 0.2
m_diffuseC...	0.80000001 0.80000001 0.80000001	m_diffuseC...	0.80000001 0.80000001 0.80000001
m_specular...	0 0 0	m_specular...	0 0 0
m_emissive...	0 0 0	m_emissive...	0 0 0
m_shininess	0.2	m_shininess	0.2
m_transpar...	0	m_transpar...	0

Figura 3.12 Características superficiales del Foco y el Heliostato respectivamente

Donde los elementos ya definidos con valores de aristas unitarios se pueden apreciar en la figura 3.13, los cuales inicialmente están dispuestos con su normal de superficie, la cual se hace coincidir con la superficie activa del elemento o “Active Side”, esta es la cara que tiene las propiedades de las superficie definidas. Dicha normal en un comienzo es paralela al eje vertical (eje y) y direccionada hacia los valores positivos, el heliostato fue desplazado para que se pudieran diferenciar dado que todos los elementos generados por default aparecen en el origen. En la segunda imagen se puede observar el heliostato inclinado con respecto a la altura solar y desplazado hacia el positivo del eje Z.

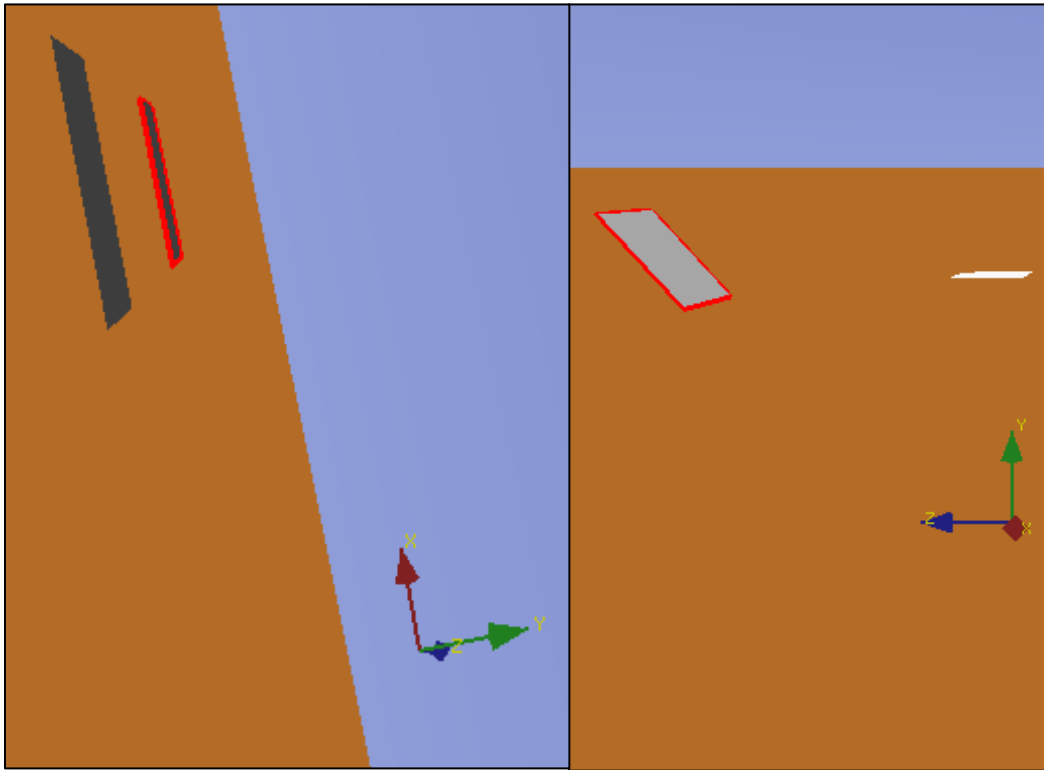


Figura 3.13 Imágenes de ambos elementos modelados de distintas vistas, en la imagen de la derecha se incluye el ángulo del heliostato para reflejar al concentrador y aumenta la arista del Heliostato a 2[m]

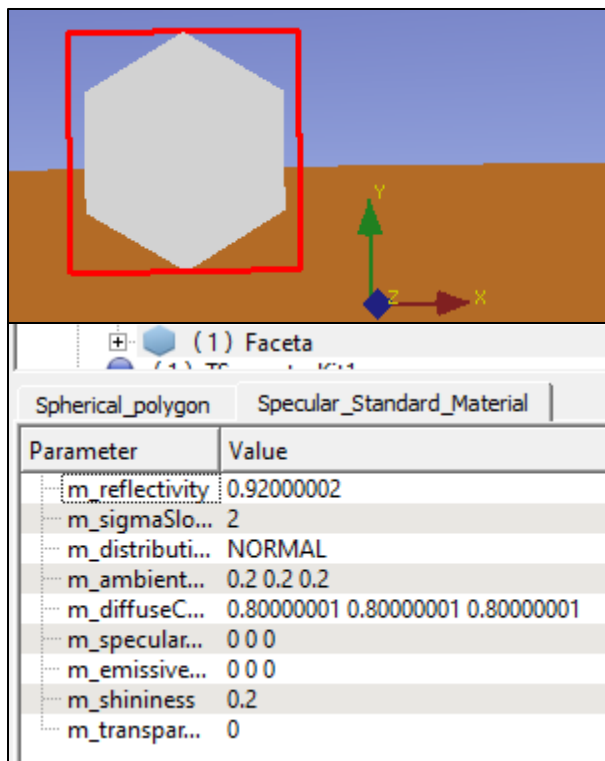


Figura 3.14 Faceta y características superficiales

Para el concentrador, la faceta es su unidad básica, las que tienen una geometría hexagonal que permite optimizar el espacio utilizado por un conjunto de facetas [15]. Son de un material con especularidad similar a la del heliostato, como se puede ver en la figura 3.14.

Las facetas tienen un radio de 0,2[m] y una curvatura esférica, la cual se determina en el programa Tonatiuh en función del diámetro de una esfera, pensando en que la faceta fuera parte de su superficie.

Este radio esférico en un comienzo se definió como el doble de la distancia focal, dado que valores menores no cumplían con una reflexión adecuada. En la figura 3.15 se pueden ver 3 diámetros esféricos distintos y la configuración de la superficie esférica de la faceta seleccionada. En el Anexo B se puede apreciar cómo se iteró sobre dicho parámetro para encontrar el diámetro esférico que permitiera concentrar en un área focal adecuada para el estudio.

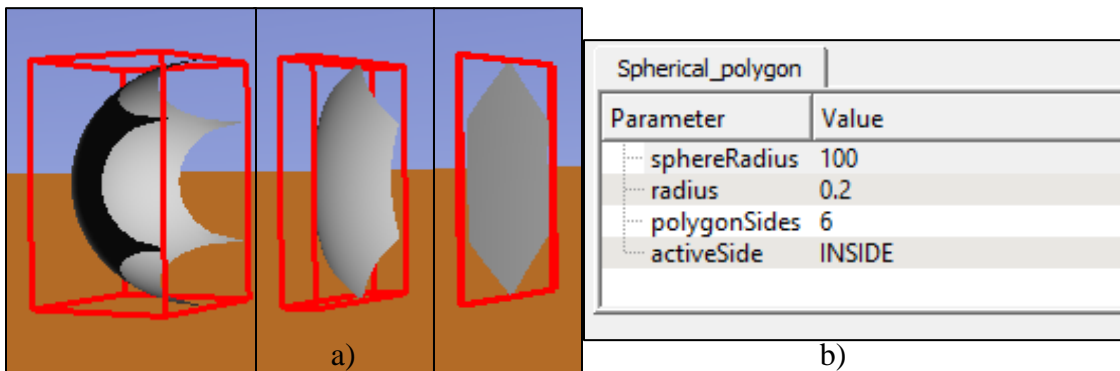


Figura 3.15 a) Facetas de distintas curvaturas, b) Parámetros geométricos de la faceta seleccionada

Con el fin de que el concentrador fuera definido en función de su área para las iteraciones, se ordenó en filas y columnas, donde a cada columna se le asignó un número N_y de facetas y cada una de ellas una coordenada y_i según las cuales se van ordenando desde arriba hacia abajo en el eje Y, como se ve en la figura 3.16. Por otro lado, N_x corresponde al número de columnas, ordenadas en el eje X, como se ve en la figura 3.17. Cabe destacar que las columnas van siendo dispuesta hacia el negativo del eje X según la ecuación 3.11.

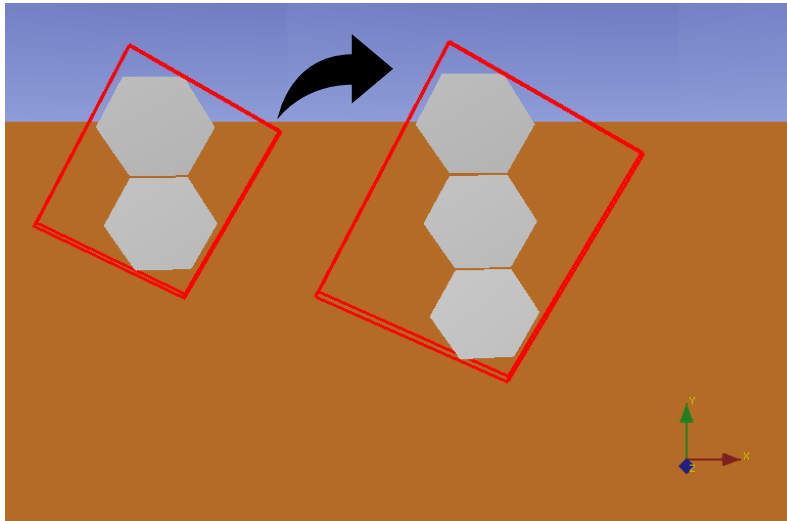


Figura 3.16 Creación de una columna de facetas

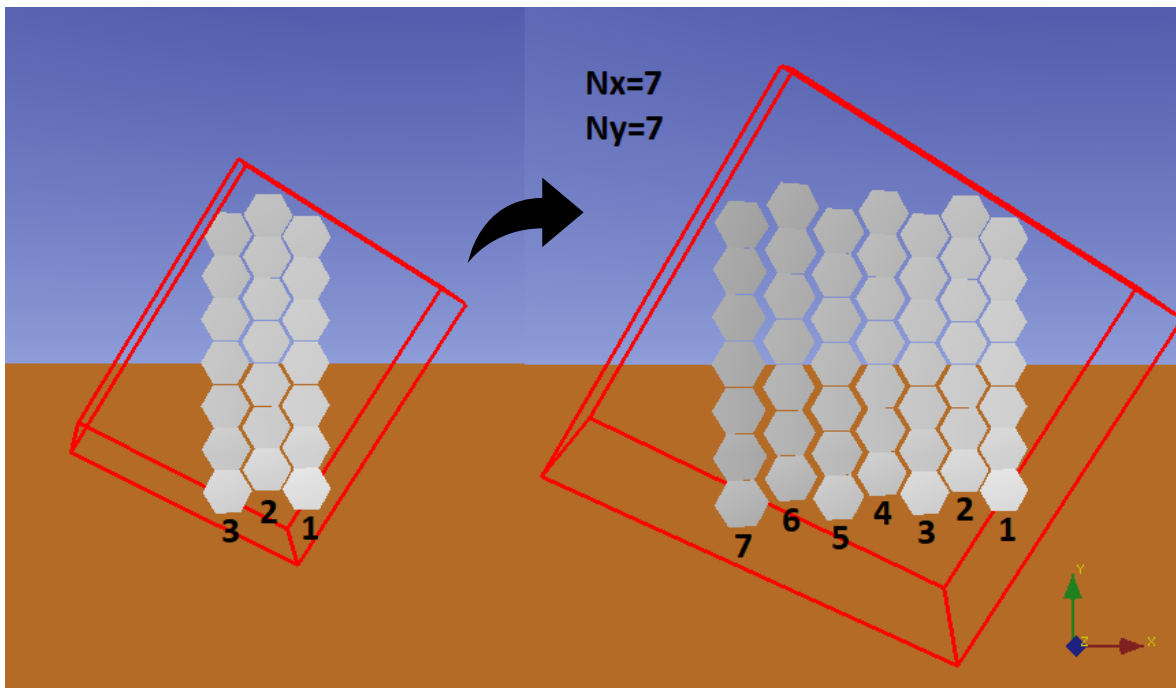


Figura 3.17 Creación del concentrado mediante adición de columnas de facetas

Las ecuaciones que definen la posición en (x_i, y_i) de las facetas son las siguientes

$$x_i = \left(2 * ar + \frac{t}{2}\right) * (-r) - 5 * foc + ar \quad (3.10)$$

$$y_i = \begin{cases} \text{posy1} - (2 * \text{ygap} + t) * (h - 1) - \text{ygap} + \text{ydesp}, & \text{y}_i \text{ es par} \\ \text{posy1} - (2 * \text{ygap} + t) * (h - 1) - \text{ygap}, & \text{y}_i \text{ es impar} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\text{posy1} = (N_y * (2 * \text{ygap} + t) - t) / 2 \quad (3.12)$$

Donde:

$$r \in [1, Nx]$$

$$h \in [1, Ny]$$

$$Nx = Ny = [4, 7, 11, 14, 17]$$

posy1: Límite superior de y

ydesp: Desplazamiento en y de las columnas pares

ygap: Espacio en el eje Y destinado a 1 faceta

Notar que en x_i , como cada faceta debe ser definida desde su centro, cada columna debe ser pensada con una distancia suficiente del foco, la cual se decidió como $5 * \text{foc}$ dado que en las iteraciones con el Heliostato de $25[m^2]$ este era obstruido en algunas instancias por la zona focal. También con una distancia suficiente entre ellas, $(2 * ar + \frac{t}{2})$ donde se considera entre centros de facetas la distancia total de una faceta más una distancia de $0,025[m]$ de espaciado, lo cual es suficiente dado que las facetas al inclinarse aumentan esta distancia. Para un concentrador de 7×7 , las coordenadas x_i, y_i son las que muestra la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Posición en x e y de las facetas de un concentrador de 7×7

$Nx=Ny$	1	2	3	4	5	6	7	
x_i	-2,6625	-2,985	-3,3075	-3,63	-3,9525	-4,275	-4,5975	[m]
y_i impar	1,071	0,714	0,357	-5,5511E-17	-0,357	-0,714	-1,071	[m]
y_i par	1,246	0,889	0,532	0,175	-0,182	-0,539	-0,896	[m]

Mediante la ecuación de la parábola (2.4.1) se obtiene el valor de Z_i (donde Z_i es la posición en el eje Z de las columnas), como se ve en la figura 3.18, las columnas parecen una línea continua, debido a que están acopladas para maximizar los rayos reflejados. Todos los valores de Z_i serán calculados en la sección siguiente, dado que varía en función de la distancia focal (tabla 3.10).

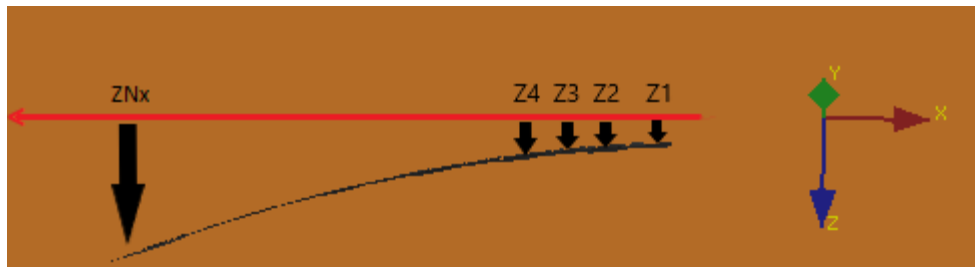


Figura 3.18 Posición de las columnas de facetas en el eje Z

Por último, cada columna de facetas tiene una curvatura determinada por la ecuación de la parábola 2.3.3, donde ingresando el valor de y_i , se obtiene el valor de z_i . Es importante destacar que en esta ecuación la distancia al foco varía según cada columna. En la imagen 3.19 se puede apreciar la curvatura en el plano YZ.

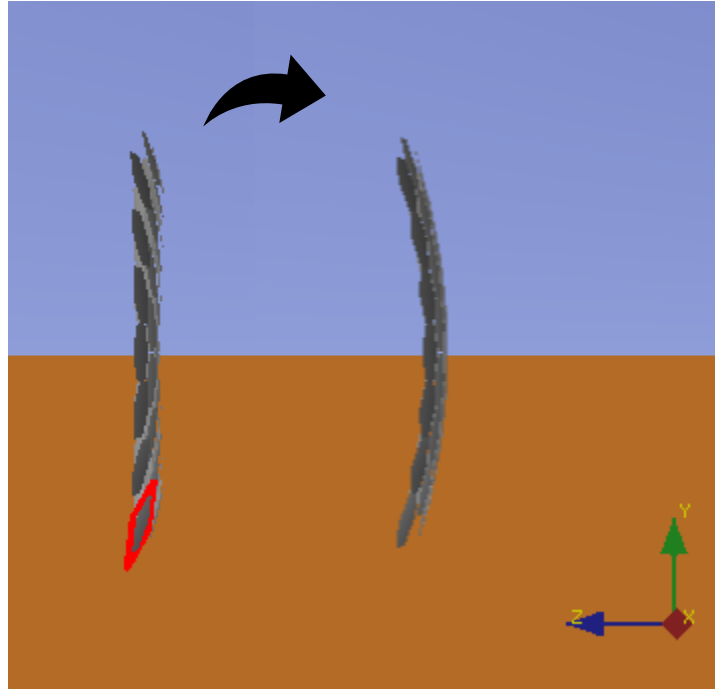


Figura 3.19 Antes y después de definir la posición z_i a cada faceta

Para la superficie del Foco se elige una de $1 [m^2]$ dado que permite visualizar la mayoría de los rayos incidentes de las iteraciones, además no supone gran interés saber lo que sucede en una superficie mayor para las dimensiones del sistema concentrador que queremos modelar. El fin de este estudio es concentrar en una superficie más pequeña pero estas dimensiones permiten observar si existe algún desplazamiento de la zona focal con respecto al centro.

El ángulo ($angF$) con el que se orienta la superficie del foco hacia el concentrador varía en función del área del concentrador, la cual depende directamente del número de columnas N_x e indirectamente de la distancia al foco. Dado que el concentrador y el heliostato tienen su centro alineados, el foco estará direccionado hacia las coordenadas $(x_{Hel}, 0, z_{mid})$, donde las ecuaciones que definen su orientación se detallan a continuación.

$$z_{mid} = (x_{Hel}^2)/(4 \cdot Df) \quad (3.13)$$

$$hip = \sqrt{(0 - x_{Hel})^2 + (Df - z_{mid})^2} \quad (3.14)$$

$$angF = aseno(x_{Hel}/hip) \quad (3.15)$$

$$anguloF = \begin{cases} |angF|, & \text{si } Z_{mid} < Df \\ 180 + angF, & \text{si } Z_{mid} > Df \end{cases} \quad (3.11)$$

$$anguloF = angF * (-1) - 90^\circ \quad (3.16)$$

Es importante mencionar que $angF$ es negativo, dado que está en función de x_{Hel} . La inclinación de la superficie del foco en función de Df y del número de facetas, para cada iteración se detalla en la tabla 3.8. Cabe destacar que el ángulo de inclinación detallado es el que forma la normal de la superficie con eje de la parábola y el origen, dado que el giro es en dirección horaria, sus valores son positivos.

Tabla 3.8 Inclinaciones de la superficie focal para todas las configuraciones

Df \ Nx	4	7	11	14	17
2[m]	76,4409°	84,5651°	93,9737°	100,094°	105,5234°
4[m]	42,9841°	43,5305°	56,377°	61,6638°	66,6748°
6[m]	41,2921°	42,2912°	52,9728°	57,4321°	61,5944°
8[m]	40,4866°	42,2826°	51,377°	55,453°	59,2202°
10[m]	40,0157°	42,2826°	50,4516°	54,3095°	57,8493°

Tabla 3.9 Tabla resumen Valores de los Parámetros

Parámetro	Definición parámetro	Valor	Unidad
Ar	Equivale a la arista de la faceta hexagonal	0,2	[m]
foc	Distancia que equivale a la mitad de ancho de la superficie del foco	0,5	[m]
<i>h</i>	Altura Solar, ángulo que describe el sol con la horizontal	81,3136	[grados]
ρ	Coefficiente de reflectividad	0,92	
DNI	Radiación directa normal	900	[W/m ²]
AngHel	Angulo inclinación heliostato a las 12 solar	49,3431	[grados]
ydesp	Desplazamiento de las columnas pares	0,175	[m]
Ygap	Espacio vertical para 1 faceta	0,176	[m]
t	Parámetro del espaciado entre facetas	0,005	[m]

3.2 Identificar parámetros de la iteración

Al modificar la distancia al foco, varían las ecuaciones de la parábola 2.4.2 y 2.4.3 que rigen la disposición en el eje X y Z de las facetas respectivamente. Con esto también cambian los ángulos de inclinación necesarios para emular ambas parábolas y redireccionar los rayos al foco. A continuación, se detalla el cálculo para los 2 ángulos que definen la inclinación de las facetas.

angXiZi: Ángulo de inclinación de la columna de facetas, que se forma entre el rayo incidente y el rayo reflejado, respecto a las coordenadas (xi, Zi).

angYiZi: Ángulo de inclinación para cada faceta respecto a las coordenadas (yi, zi).

Notar que Zi es la coordenada de la columna de facetas y zi es la coordenada de cada una de las facetas. Primero se definió la inclinación de las columnas de facetas, las cuales están en función de xi y Zi. Donde:

$$Zi = (x_0 - x_i)^2 / (4 * DistxiZi) \quad (3.2.1)$$

$$DistxiZi = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (z_0 - Z_i)^2} \quad (3.2.2)$$

$$angxiZi = \text{seno}^{-1} \left(\frac{x_0 - x_i}{DistxiZi} \right) \quad (3.2.3)$$

$$Angulox_iZ_i = \begin{cases} -\frac{angxiZ_i}{2}, & Z_i < zfoco \\ \frac{angxiZ_i}{2} + \pi/2, & Z_i \geq zfoco \end{cases} \quad (3.2.4)$$

Donde $DistxiZi$ es la distancia de la posición de origen de las columnas de facetas $(xi, 0, Zi)$ del concentrador con respecto al foco. El ángulo $Angulox_iZ_i$ es usado para definir la inclinación de las columnas, se separa en 2 casos debido a que sus ángulos varían según su valor de Zi con respecto al $zfoco$, dado que el ángulo para reflejar los rayos va creciendo hasta sobrepasar los 45° entre la normal y el rayo incidente, esto ocurre por la ciclicidad de las función Seno. En la tabla 3.10 se muestran los valores del ángulo $angXiZi$ con respecto a la distancia focal y las columnas (Nx) del concentrador, además de la posición xi y Zi de cada columna.

Tabla 3.10 Ángulo de inclinación, posición xi y Zi de cada columna del concentrador en función de la distancia focal.

	Df =	2 [m]		4 [m]		6 [m]		8 [m]		10 [m]	
Nx	xi[m]	Zi[m]	AngxiZi	Zi[m]	AngxiZi	Zi[m]	AngxiZi	Zi[m]	AngxiZi	Zi[m]	AngxiZi
1	-1,1625	0,169	16,205°	0,084	8,268°	0,056	5,533°	0,042	4,156°	0,034	3,327°
2	-1,485	0,276	20,367°	0,138	10,516°	0,092	7,054°	0,069	5,303°	0,055	4,246°
3	-1,8075	0,408	24,317°	0,204	12,731°	0,136	8,566°	0,102	6,445°	0,082	5,164°
4	-2,13	0,567	28,035°	0,284	14,909°	0,189	10,065°	0,142	7,583°	0,113	6,079°
5	-2,4525	0,752	31,514°	0,376	17,044°	0,251	11,551°	0,188	8,715°	0,150	6,991°
6	-2,775	0,963	34,751°	0,481	19,130°	0,321	13,021°	0,241	9,839°	0,193	7,899°
7	-3,0975	1,199	37,753°	0,600	21,166°	0,400	14,474°	0,300	10,957°	0,240	8,804°
8	-3,42	1,462	40,530°	0,731	23,147°	0,487	15,908°	0,366	12,065°	0,292	9,704°
9	-3,7425	1,751	43,095°	0,875	25,071°	0,584	17,321°	0,438	13,165°	0,350	10,599°
10	-4,065	2,066	45,462°	1,033	26,936°	0,689	18,714°	0,516	14,255°	0,413	11,489°
11	-4,3875	2,406	47,645°	1,203	28,742°	0,802	20,084°	0,602	15,335°	0,481	12,373°
12	-4,71	2,773	49,660°	1,387	30,487°	0,924	21,430°	0,693	16,403°	0,555	13,252°
13	-5,0325	3,166	51,521°	1,583	32,172°	1,055	22,752°	0,791	17,460°	0,633	14,124°
14	-5,355	3,585	53,242°	1,792	33,797°	1,195	24,049°	0,896	18,505°	0,717	14,989°
15	-5,6775	4,029	54,834°	2,015	35,363°	1,343	25,320°	1,007	19,537°	0,806	15,848°
16	-6	4,500	56,310°	2,250	36,870°	1,500	26,565°	1,125	20,556°	0,900	16,699°
17	-6,3225	4,997	57,680°	2,498	38,320°	1,666	27,784°	1,249	21,562°	0,999	17,543°

Por otro lado, para los ángulos de las facetas con respecto al eje Z, las ecuaciones que los definen son las siguientes

$$z_i = (y_0 - y_i)^2 / 4 * DistxiZi \quad (3.2.5)$$

$$angYiZi = \text{seno}^{-1}\left(\frac{ecYi}{DistXiYiZi}\right) \quad (3.2.6)$$

$$DistXiYi = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} \quad (3.2.7)$$

$$DistXiYiZi = \sqrt{(DistXiYi)^2 + (z_0 - z_i)^2} \quad (3.2.8)$$

Los ángulos calculados son del rayo incidente, que es paralelo al eje de la parábola con respecto al rayo que es reflejado directo al foco. Para calcular el ángulo de la faceta, se usó la ecuación 2.4.2, dado que el rayo incidente es reflejado con un ángulo simétrico con respecto a la normal de la superficie reflectante, para reflejarlo la faceta debe inclinarse la mitad del ángulo

$$\text{anguloFacetaYiZi} = \frac{\text{angYiZi}}{2} \quad (3.2.9)$$

En este caso no es necesario realizar casos dado que los ángulos están entre $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$.

Al definir todas las ecuaciones que gobiernan el sistema concentrador, las posiciones de sus elementos, sus dependencias con respecto a las inclinaciones de las superficies reflectivas, ya es posible realizar las iteraciones del sistema. La figura 3.20 detalla el orden que sigue el código desarrollado en Tonatiuh para realizar el análisis de flujo respectivo de cada configuración y exportarlo como un archivo. El código utilizado se adjunta en el Anexo C.

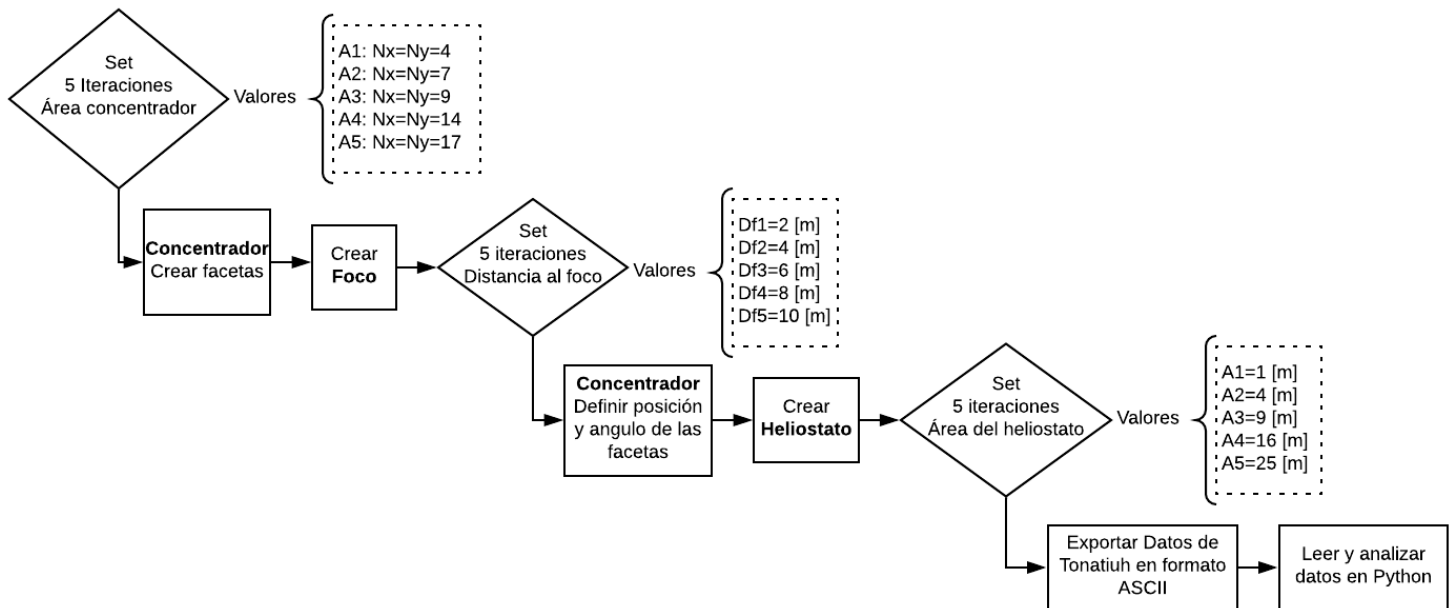


Figura 3.20 Diagrama de flujo de los pasos lógicos

3.3 Análisis de las configuraciones del sistema

Mediante un código de Python, que se detalla en el Anexo D, se pueden analizar los 125 documentos exportados, Los cuales tienen 3 columnas como muestra la figura 3.21

	x(m)	y(m)	Flux(w/m2)
1383	0.17	0.05	8900.86
1527	0.05	0.11	8460.22
1181	0.13	-0.03	8283.97
1367	-0.15	0.05	8283.97
1325	0.01	0.03	8107.71
...
695	0.41	-0.23	0.00
693	0.37	-0.23	0.00
654	-0.41	-0.23	0.00
653	-0.43	-0.23	0.00
2499	0.49	0.49	0.00

Figura 3.21 Columnas del documento exportado de Tonatiuh

Estas columnas, mediante el código Python, fueron ordenadas con respecto al flujo de mayor a menor y posteriormente se sumaron los valores hasta obtener el 95% del flujo total en la superficie focal, de esta manera se analizaron las coordenadas y se definió un Diámetro con respecto al eje X (Dx) y un Diámetro con respecto al eje y (Dy). Estos diámetros fueron calculados con ayuda del código de Python, encontrando los Máximos y mínimos valores x e y tal que pertenecieran a la zona focal donde se calculó el 95% del flujo.

Para la concentración se usó, la concentración geométrica, ecuación 2., con la superficie efectiva del heliostato definida por la ecuación 3.3.3

$$S_e = \text{Área Heliostato} * f_{cos} \quad (3.3.3)$$

Dichos flujos con el motivo de encontrar una zona focal de concentración más ajustada. Luego se seleccionaron las coordenadas más lejanas al centro de los ejes X e Y; se calculó una elipse donde los parámetros a y b son los que se ven en la figura 3.22.

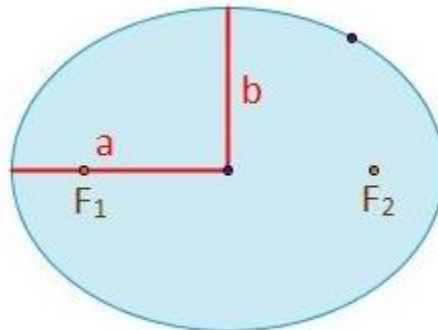


Figura 3.22 Parámetros a y b de la elipse

$$\text{Área elipse} = \pi \cdot a \cdot b \quad (3.3.4)$$

Mediante la potencia y concentración en la zona focal se buscaron los mínimos y máximos para cada valor del Área del heliostato en las iteraciones, dado que es el que define la cantidad de DNI que entra al sistema concentrador según la función de su área efectiva.

Se compararon los gráficos y las potencias generadas, decidiendo un rango de potencia un poco más amplio, dado que los valores elegidos para la iteración fueron arbitrarios, se eligieron teniendo en cuenta la información presentada en la sección 2.3.3, de 1,8 a 4 [kW] para luego poder minimizar la superficie reflectiva de los sistemas concentradores. Por último, se calculó la concentración geométrica alcanzada para seleccionar la configuración Optima para los requerimientos señalados en los objetivos.

Mediante la Herramienta computacional Python se leyó cada documento de formato ASCII exportado desde Tonatiuh, se calculó el total concentrado y el porcentaje de concentración para cada configuración. Se ordenaron de mayor a menor con respecto a los valores de flujo y se analizó cuáles cumplían con los requerimientos iniciales (potencia de trabajo 2-3kW y de tamaño del arreglo) buscados. Código utilizado en el Anexo 4.

4. Resultados y discusión

Con respecto a las iteraciones realizadas, la figura 4.1 nos permite ver cómo fue variando la disposición de las columnas de facetas con respecto a los ejes XZ. Donde cada punto en los segmentos de parábola corresponde a una columna de facetas.

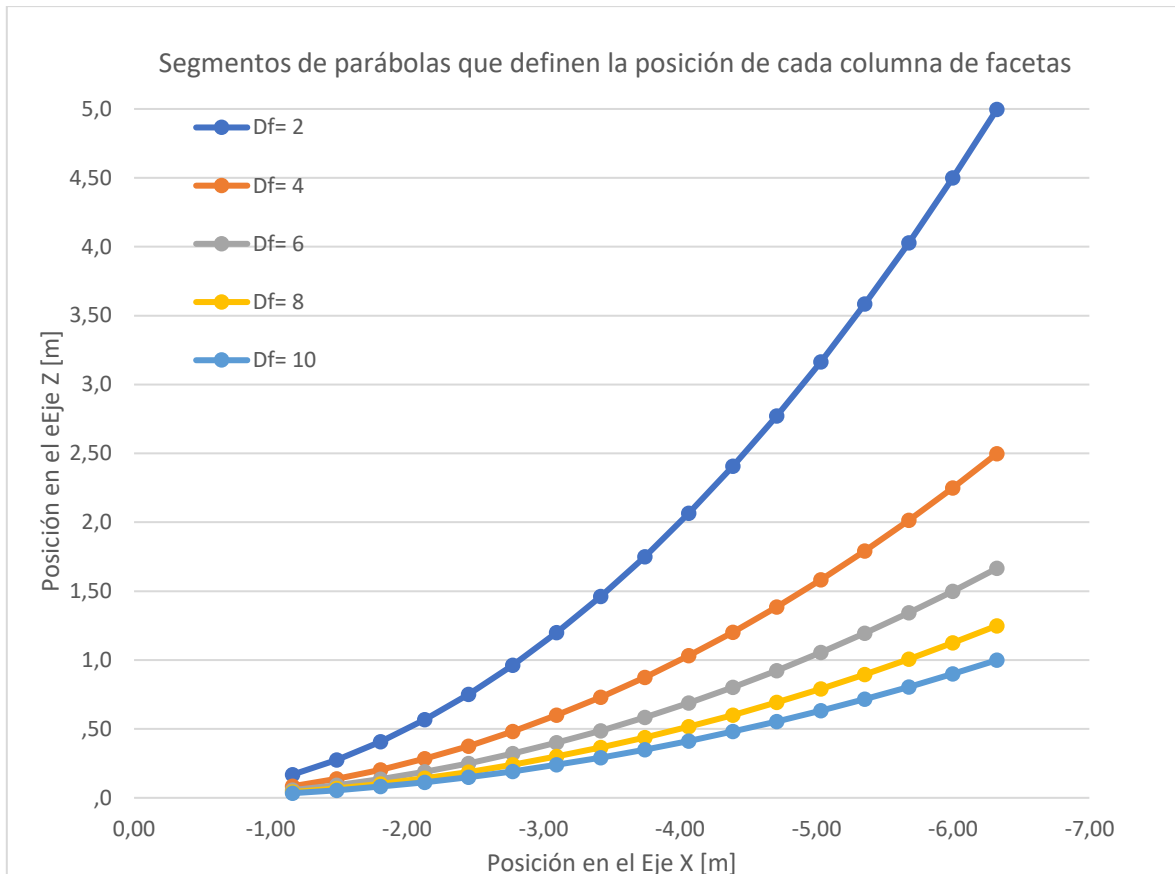


Figura 4.1 Posición de las columnas de facetas con respecto al plano XZ

Se puede distinguir cómo cambia la posición de las columnas de facetas según la distancia focal del arreglo, esta variación también ocurre con respecto al plano YZ del concentrador. En la figura 4.2 se puede ver cómo varían las parábolas que definen las posiciones de las facetas que conforman las columnas, al modificar la distancia entre las parábolas y el foco.

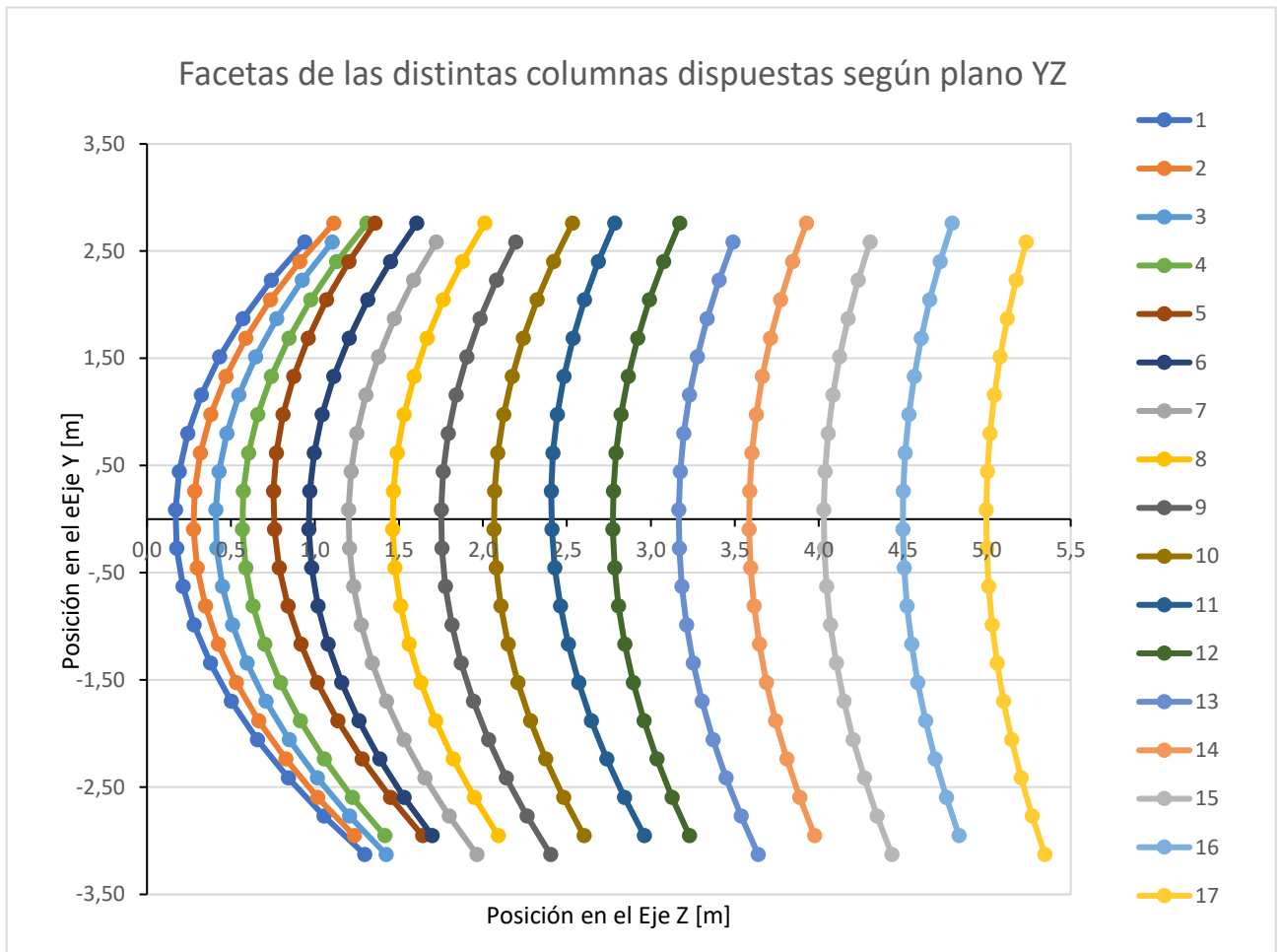


Figura 4.2 Posición de las facetas con respecto al plano YZ, para $D_f = 2[m]$

En las figuras 4.3, 4.4, 4.5 se puede apreciar la disposición de las 17 columnas de facetas con respecto al plano YZ, en función de la distancia focal $D_f = 4[m]$, $D_f = 6[m]$ y $D_f = 8[m]$, $D_f = 10[m]$ respectivamente.

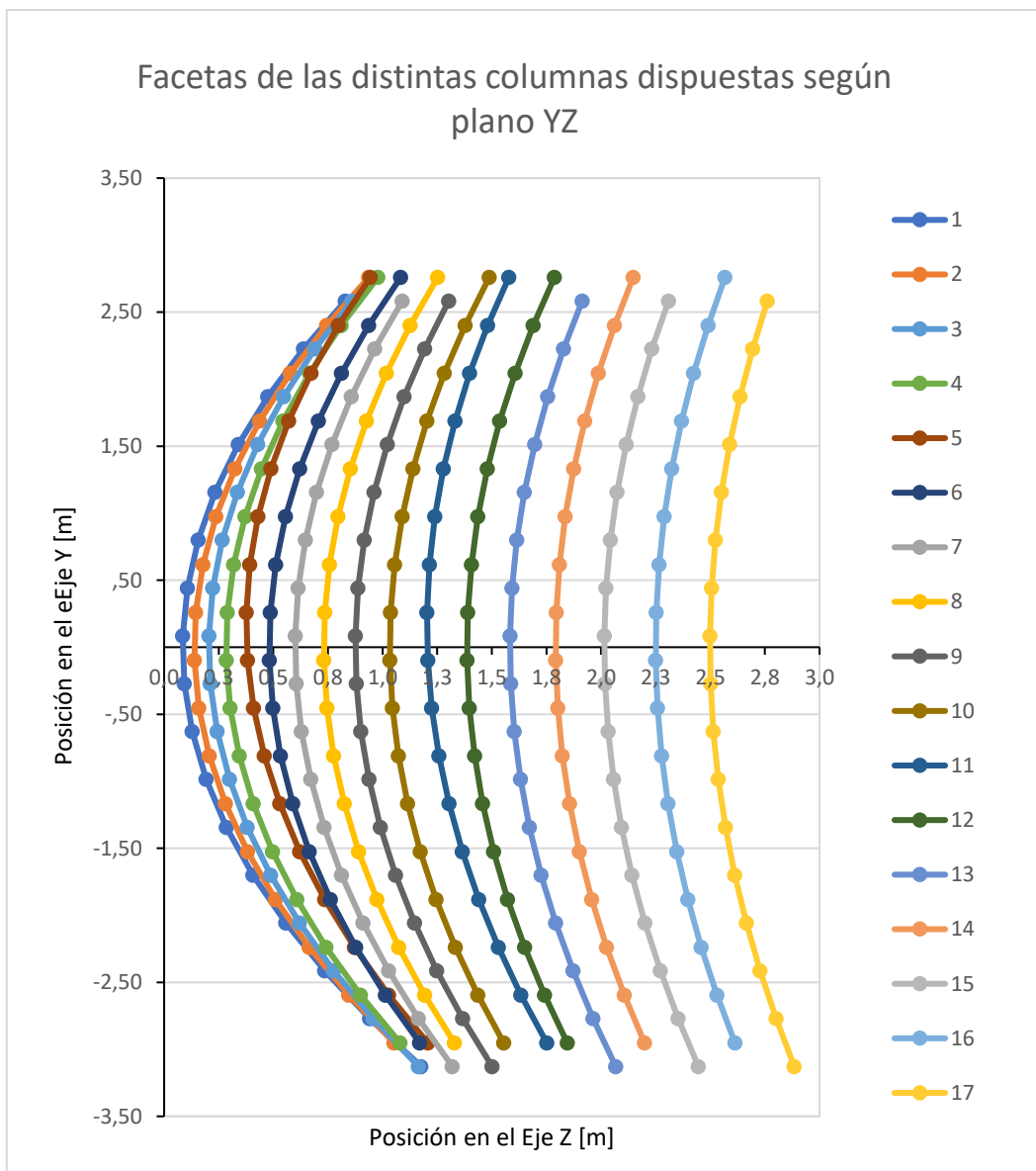


Figura 4.3 Posición de las facetas con respecto al plano YZ, para $D_f = 4[m]$

Se observa que mientras la D_f aumenta, las posiciones Z_i de las columnas de facetas y la posición z_i de cada faceta van disminuyendo, dado que la curvatura del segmento de parábola del plano XY (Figura 4.1), como la curvatura de la parábola que define las posiciones de las facetas disminuyen.

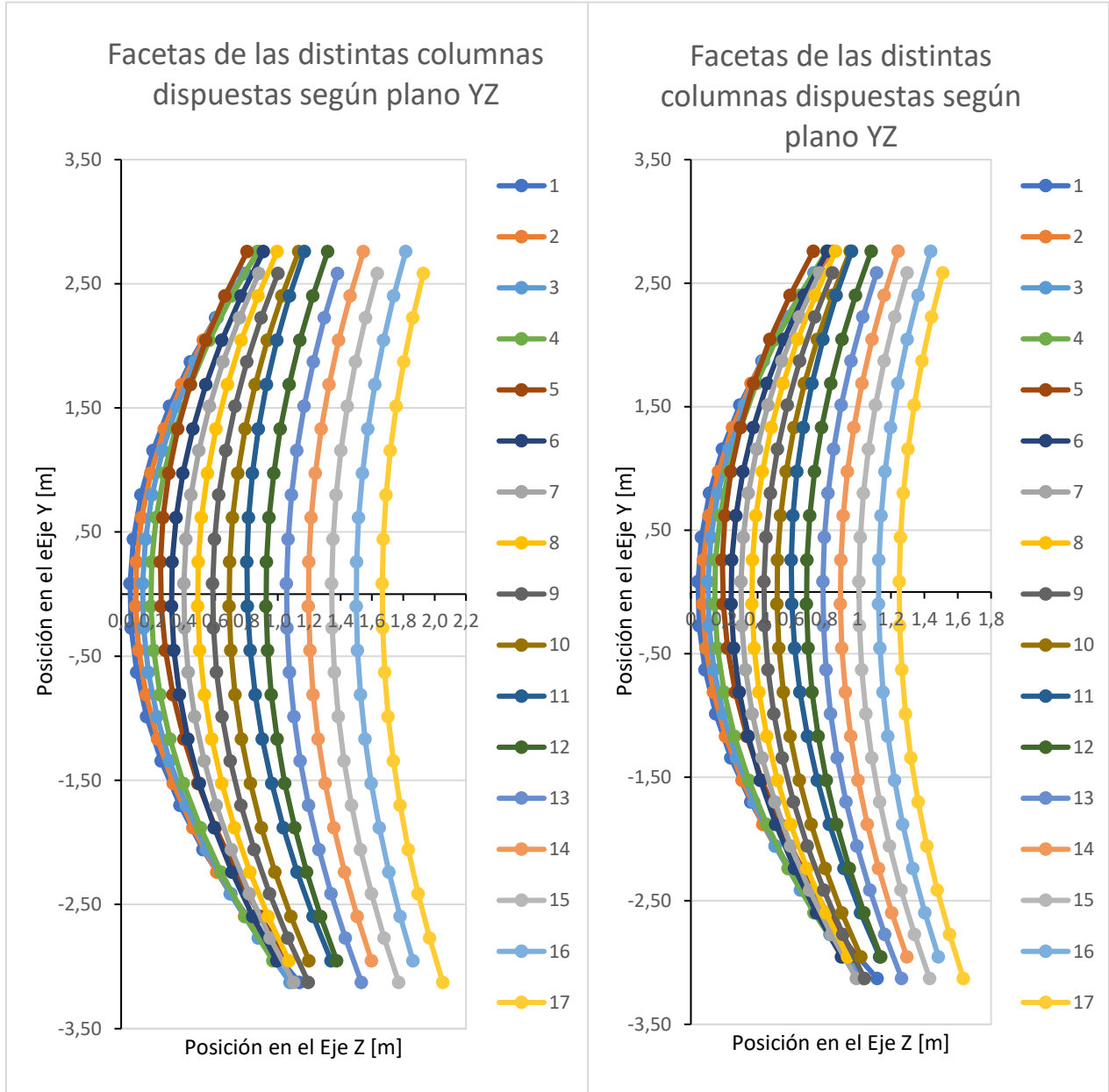


Figura 4.4 Posición de las facetas, a la izquierda con respecto a $D_f=6[m]$ y a la derecha $D_f=8[m]$

Cabe destacar que mediante la componente X del concentrador se logra un espaciado suficiente para que no exista obstrucción entre las facetas y solo se ven las columnas superpuestas en los gráficos debido a que es una vista desde el plano YZ.

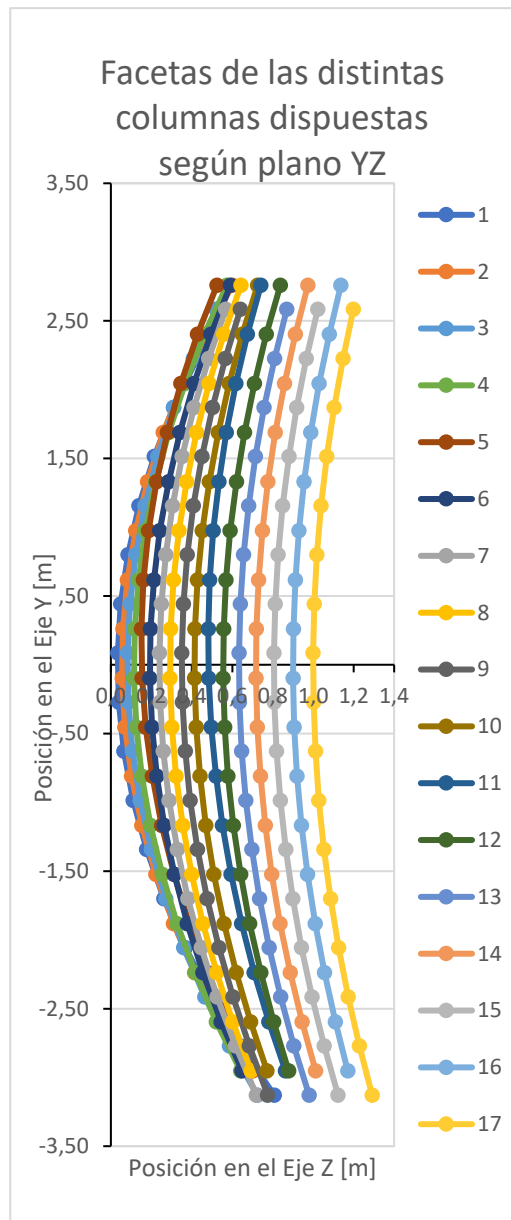


Figura 4.5 Posición de las facetas con respecto al plano YZ, para $D_f=10$ [m]

En esta etapa estudiamos la potencia obtenida de todas las iteraciones y se decidió separar por área del heliostato iterada dado que es la primera reflexión y de él depende la energía que se direcciona al foco. En la Tabla 4.1 se pueden ver los máximos y mínimos de las configuraciones en base al área reflectiva del heliostato. En el Anexo E se detallan los valores entregados por Python de cada configuración.

Tabla 4.1 Potencia máxima y mínima de las distintas configuraciones según el área del heliostato

Área Heliostato	Potencia max		Potencia min	
	Sistema (Df /, NxNy)	Valor[kW]	Sistema (Df /, NxNy)	Valor[kW]
1[m ²]	10 / 4x4	0,513	2 / 17x17	0,307
4[m ²]	10 / 7x7	2,055	2 / 4x4	0,9484
9[m ²]	10 / 11x11	4,58	2 / 4x4	0,987
16[m ²]	10 / 14x14	8,12	2 / 4x4	1,009
25[m ²]	10 / 17x17	12,575	2 / 4x4	0,972

Dado que el objetivo de la memoria es encontrar una configuración que alcance una potencia entre 2-3kW, se definió un rango un poco más amplio para evaluar las potencias de las configuraciones obtenidas.

El valor mínimo de potencia se fijó en 1,8kW para estudiar si alguna configuración con un área reflectiva total pequeña podía entrar en el rango mediante algún ajuste, pero esto se realizó con el fin de entender cómo las configuraciones alcanzaban distintas potencias según sus dimensiones, ya que sin una variación en algún elemento esas configuraciones (entre 1,8–2 kW) no cumplirían, a priori, con el Objetivo General. El valor máximo se fijó en 4kW en base al mismo argumento anterior que permite entender de mejor manera cómo se relacionaron las distintas configuraciones de los elementos del sistema concentrador.

La tabla 4.2 muestra todas las configuraciones que quedaron en el rango de potencias mencionado, con el área reflectiva total calculada, para elegir las configuraciones que minimicen este valor, las cuales están destacadas. Donde Hel es la arista del heliostato cuadrado.

Para los valores seleccionados que minimizan el área total reflectiva, se puede ver una particularidad y es que todas las configuraciones son con respecto al concentrador de 49 facetas (7x7). Además, los Valores del Heliostato son de 4 [m²] y 9 [m²], ambos valores parecen razonables. Por lo que se realizó un nuevo análisis incluyendo la concentración de la configuración.

Tabla 4.2 Configuraciones en el rango 1,8 - 4 kW

Potencia	Df	Facetas	Hel [m]	Area facetas	Área heliostato	Área reflectiva total
2006,596	6	7x7	2	5,0922	4	9,0922
2044,281	8	7x7	2	5,0922	4	9,0922
2054,904	10	7x7	2	5,0922	4	9,0922
2604,987	2	7x7	3	5,0922	9	14,0922
3199,011	4	7x7	3	5,0922	9	14,0922
3356,524	6	7x7	3	5,0922	9	14,0922
3416,388	10	7x7	3	5,0922	9	14,0922
3422,006	8	7x7	3	5,0922	9	14,0922
2028,4	8	11x11	2	12,5747	4	16,5747
2045,987	10	11x11	2	12,5747	4	16,5747
2812,942	2	7x7	4	5,0922	16	21,0922
3530,035	4	7x7	4	5,0922	16	21,0922
3729,947	6	7x7	4	5,0922	16	21,0922
3781,113	8	7x7	4	5,0922	16	21,0922
3825,277	10	7x7	4	5,0922	16	21,0922
3156,525	2	11x11	3	12,5747	9	21,5747
2009,696	10	14x14	2	20,3689	4	24,3689
3010,808	2	7x7	3	20,3689	9	29,3689
2810,731	2	7x7	5	5,0922	25	30,0922
3518,533	4	7x7	5	5,0922	25	30,0922
3680,174	6	7x7	5	5,0922	25	30,0922
3779,94	8	7x7	5	5,0922	25	30,0922
3841,101	10	7x7	5	5,0922	25	30,0922
1995,525	8	17x17	2	30,034	4	34,0337
2028,058	10	17x17	2	30,034	4	34,0337
2703,323	2	17x17	3	30,034	9	39,0337
3896,525	4	17x17	3	30,034	9	39,0337

Tabla 4.3 Cálculo de la concentración de las configuraciones

Potencia [W]	Potencia 95% [W]	Df	facetas	Área heliostato [m ²]	Área concentrador [m ²]	Área total	Área Focal [m ²]	Concentración
3199,011	3039,061	4	49	9	5,0922	14,0922	0,1715	39,8040
3356,524	3188,698	6	49	9	5,0922	14,0922	0,1734	39,3714
3422,006	3250,906	8	49	9	5,0922	14,0922	0,2042	33,4354
2604,987	2474,738	2	49	9	5,0922	14,0922	0,2161	31,5886
3416,388	3245,569	10	49	9	5,0922	14,0922	0,2375	28,7473
2006,596	1906,267	6	49	4	5,0922	9,0922	0,1662	18,2592
2044,281	1942,067	8	49	4	5,0922	9,0922	0,2042	14,8601

4.1. Selección de la configuración óptima

Las configuraciones destacadas en tabla 4.3 se seleccionaron dado que tienen los valores más altos. Se puede observar que tienen el mismo heliostato (9 [m²]) y el mismo número de facetas (49) del concentrador. Esto es bastante interesante, dado que, para los mismos elementos, solo variando la disposición de las facetas con respecto a la distancia focal y sacrificando la concentración del sistema, se puede tener una diferencia de cerca de 800[W] entre Df=2 [m] y Df=8 [m] respectivamente.

Se analiza la configuración que maximiza la concentración geométrica y esta tiene una potencia sobre los 3 [kW]. Por otro lado, de las configuraciones destacadas hay una que se encuentra en el rango de potencias, en la tabla 4.4 se detallan ambas configuraciones.

Tabla 4.4 Configuraciones seleccionadas

Potencia [W]	Potencia 95% [W]	Df	facetas	Área heliostato [m ²]	Área concentrador [m ²]	Área total	Área Focal [m ²]	Concentración
2604,987	2474.7379	2	49	9	5,0922	14,0922	0,2161	31,5886
3199,012	3039.0609	4	49	9	5,0922	14,0922	0,1715	39,8040

A partir de ello se decidió que la configuración seleccionada fuera la destacada en la figura 4.4, dado que, para la misma superficie reflectiva, es decir, solo ajustando las posiciones e inclinaciones de las facetas se obtuvo mayor potencia y concentración solo variando la distancia focal.

Mantenerse dentro del rango de potencias y seleccionar la configuración que tenía la distancia focal de 2[m] hubiese sido elegir una configuración menos eficiente. De requerir una configuración con una potencia entre 2-3kW, se propone buscar una distancia intermedia entre ambas configuraciones (por ejemplo, Df=3[m]).

A continuación, en la figura 4.1 se puede ver la disposición espacial de los elementos del sistema concentrador seleccionado en el programa Tonatiuh.

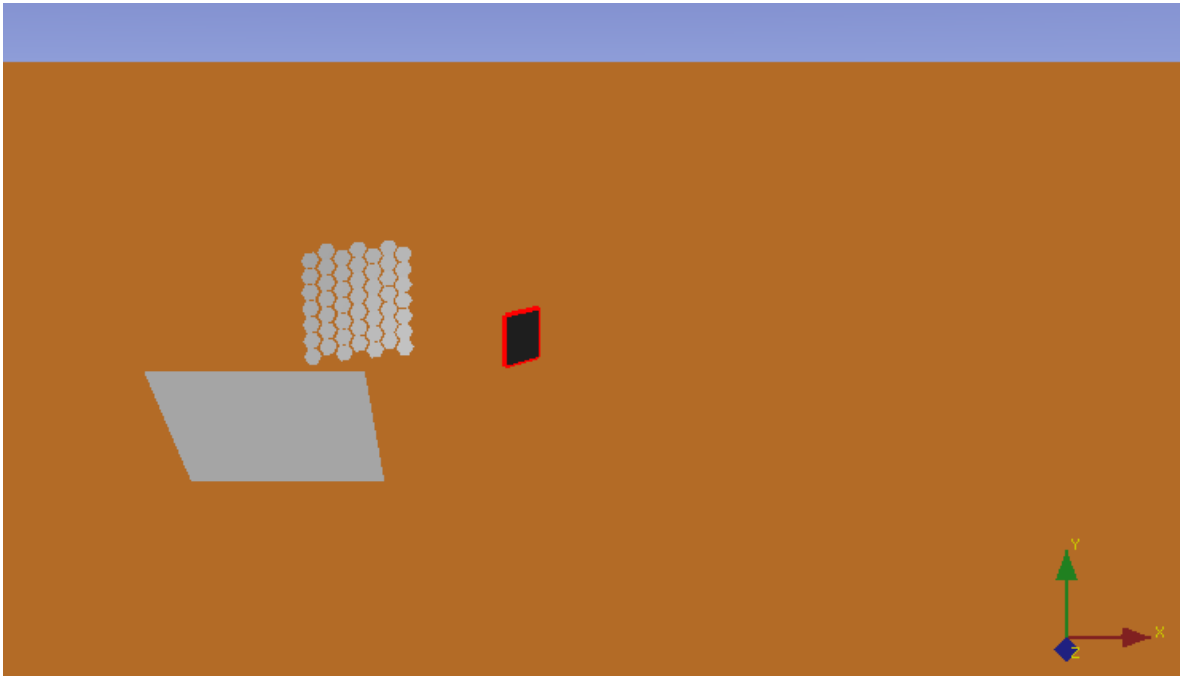


Figura 4.6 Disposición en Tonatiuh de la configuración óptima

En la figura 4.2 se puede ver la disposición seleccionada concentrando 500 rayos. En la figura 4.3 se pueden ver los gráficos de flujo con respecto a los ejes X e Y, el Heat Map respectivo, que proporciona el programa Tonatiuh, con un Grid de 50x50 y 500.000 rayos.

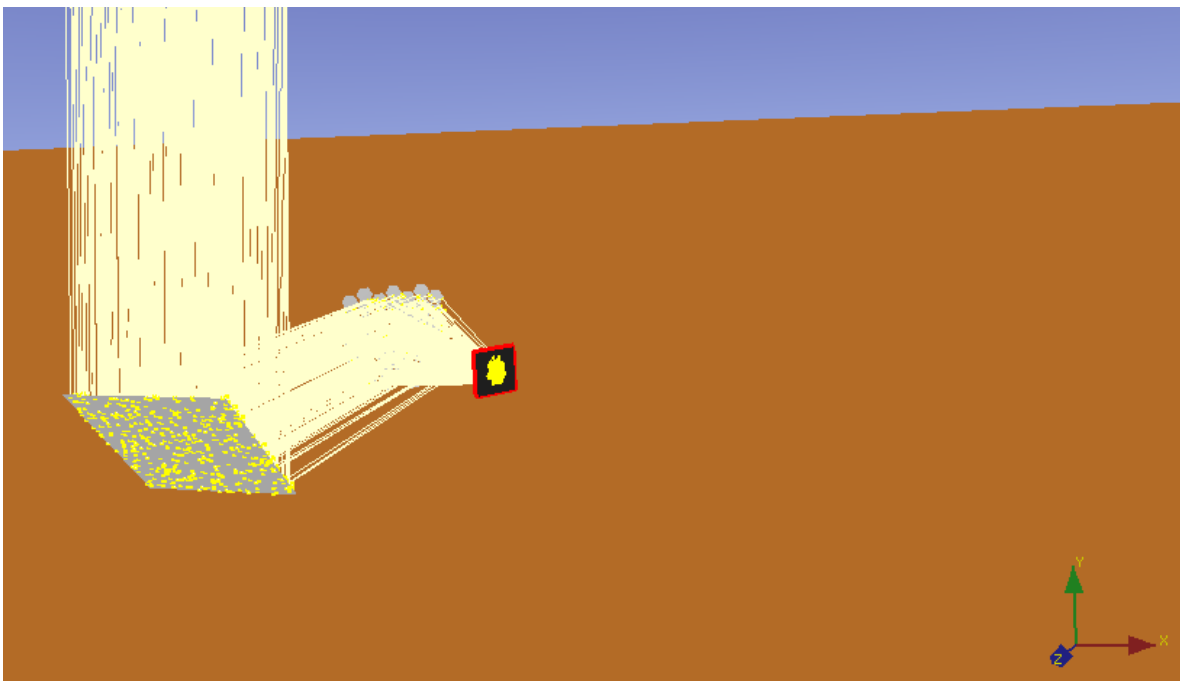


Figura 4.7 Rayos direccionados al foco por el sistema concentrador

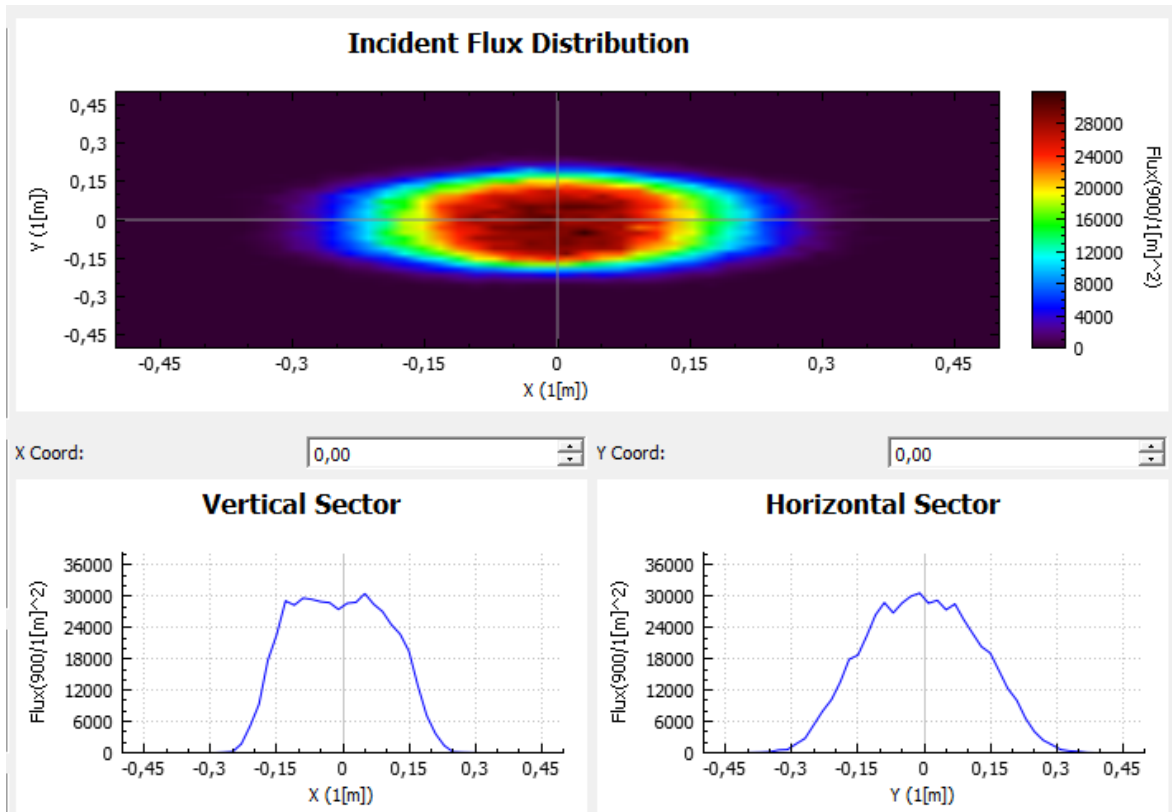


Figura 4.8 Heat Map y graficos de flujo con respecto a los ejes X e Y

5. Conclusiones

Esta memoria analizó las distintas configuraciones posibles para un sistema concentrador de 2 reflexiones, tomando 5 valores distintos respecto a cada uno de los parámetros: área del heliostato, área del concentrador y distancia focal de la parábola, de la cual depende la disposición del concentrador.

Debido al amplio espectro de valores en los que se itera, las potencias obtenidas para cada sistema también suponen configuraciones de pequeña, mediana y alta potencia, lo cual hace que el sistema de 2 reflexiones muestre lo flexible y útil que puede ser para pensar proyectos de concentración solar como una posibilidad para reemplazar las distintas tecnologías que actualmente realizan procesos térmicos de alta temperatura mediante combustibles fósiles.

Para un sistema de concentración mediano (2-3kW de potencia) se encontraron muchas alternativas que alcanzaron esos valores, lo cual permitió analizar las diferencias entre configuraciones y entender cómo una superficie reflectiva grande (concentrador de 17x17 por ejemplo) concentraba tan poca potencia. Una consideración importante, es que hay que tener en cuenta las áreas de los elementos reflectivos, dado que si la diferencia de superficie se vuelve considerable, queda mucha área reflectiva en desuso.

El Objetivo General de obtener una Potencia incidente entre 2-3kW se cumple e incluso el sistema permite configuraciones para los mismos elementos que pueden aumentar la Potencia concentrada de ser necesario en un análisis posterior. Esta configuración maximizó la concentración para la mínima superficie reflectiva.

Para los concentradores pseudo parabólicos es muy importante establecer una distancia focal correcta para su desempeño y para encontrarla, el análisis de sensibilidad mediante modelación 3D es una herramienta muy completa y confiable que permite encontrar la configuración más idónea en función de los objetivos planteados al comienzo de este estudio.

El programa open source Tonatiuh es una herramienta de trazado de rayos 3D muy completa, que se va actualizando de manera periódica y permite modelar en una amplia gama de figuras, geometrías, superficies, lugares del mundo, inclinación del sol y hasta definir seguidores con una precisión que aún no buscan alcanzar los sistemas materiales. Permite generar un código para crear las configuraciones deseadas, mediante su herramienta Script Editor la cual según el nivel de programación del usuario permite muchas libertades, pues al programar el sistema deseado mediante sus herramientas y lenguaje propio detallados en el repositorio GitHub, como también el uso del lenguaje ECMA, de su código fuente, lo que supone una potente herramienta que para esta memoria permitió realizar iteraciones, usar funciones matemáticas, definir funciones, ecuaciones, exportar documentos, siendo estas algunas de las múltiples opciones que ofrece.

Mientras desarrollaba este estudio pude adquirir herramientas para usar cada vez mejor Tonatiuh, logrando programar el sistema concentrador y la adquisición de datos. Sin embargo, hubo algunas configuraciones y herramientas que no logré incorporar como hubiese querido, pues al ser un código open source está en constante desarrollo. Esto implica oportunidades dentro del área a seguir desarrollando y ampliando los alcances del estudio.

Realizar las 125 iteraciones mediante el Script Editor fue un desafío, en un comienzo tomó mucho tiempo entender el lenguaje y programar las acciones deseadas, pero una vez que se logró una buena caracterización de la superficie de concentración y la adquisición de datos, fue crucial en la evaluación y selección del sistema concentrador. Primero el programa se desarrolló haciendo que el código generara inicialmente 1 configuración del sistema y luego se testeaba en el código que permitía 25 iteraciones, lo cual fue bastante óptimo para la evaluación, adquisición del flujo y la potencia, pero bastante lento para el cálculo mediante Excel de cada posición y ángulos de los elementos, proceso que se realizó en paralelo para poder comprobar los valores de las iteraciones y de las ecuaciones incorporadas.

Queda propuesta la mejora de la disposición de las facetas del concentrador, minimizando el espacio entre ellas o manteniendo la separación constante con respecto a la ecuación de la parábola que las define, lo cual en esta memoria para valores cercanos al vértice el resultado fue bastante bueno. Sin embargo, cuando el concentrador sobrepasaba al foco con respecto al eje z, las distancias entre facetas comenzaban a requerir otras ecuaciones que definieran su posición minimizando su separación.

Entendiendo que la configuración de sus elementos constitutivos se puede realizar por separado, es decir de forma modular, es posible definir mejoras sin tener que reconfigurar todo el sistema. Variando las propiedades geométricas y/o de superficie de cada elemento para optimizar la configuración que el usuario desee.

Se propone realizar una segunda iteración sobre los parámetros de la configuración óptima y disponer las facetas del concentrado de forma que se dispongan como un verdadero panel, eligiendo una posición para una faceta central y mediante un radio variable realizar la disposición de facetas alrededor, lo cual, según lo realizado en este estudio podría mejorar su performance.

El sistema concentrador modelado permitió alcanzar un rango de potencia incidente entre los 0,3kW hasta los 12,5kW. Este amplio espectro de Potencias permite esbozar la versatilidad que puede tener el sistema de 2 reflexiones de Trombe, que junto con el análisis mediante iteraciones de las configuraciones permiten considerar al Sol como alternativa viable y sustentable para reemplazar procesos contaminantes de cara a la crisis climática y los compromisos de Carbono Neutralidad Chile 2050.

Bibliografía

- [1] Haberreiter, M; Schmutz (2008) Solving the Discrepancy between the Seismic and Photospheric Solar Radius. *Astrophysical Journal* 675 (1): p.53-56
- [2] Bauerle, I. (2018). DISEÑO CONCEPTUAL DE UN HORNO SOLAR DE ALTA TEMPERATURA, MEDIANTE SEGMENTO DE PARABOLOIDE MÓVIL, CON RECEPTOR FIJO, DE PEQUEÑA ESCALA. Tesis de pregrado publicada, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- [3] DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley, 1980.
- [4] Román, R. (2005). CONVERSIÓN TÉRMICA DE ENERGÍA SOLAR, Sistemas Concentradores con Imagen Parte 2 [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2018/1/ME6001/1/material_docente/
- [5] Bayón, A. (1990). Producción de hidrógeno mediante ciclos termoquímicos basados en compuestos de Na y Mn acomplados a energía solar de concentración. Tesis de doctorado no publicada, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España
- [6] RIVEROS-ROSAS, D., et al. Optical design of a high radiative flux solar furnace for Mexico. *Solar energy*, 2010, vol. 84, no 5, p. 792-800.
- [7] DUWEZ, Pol E. The Solar Furnace. *Engineering and Science*, 1956, vol. 19, no 5, p. 13-16.
- [8] Plataforma Solar de Almería (PSA). Horno Solar SF-5 [En línea] [[Último acceso:13 Junio 2019]. Recuperado de: http://www.psa.es/es/instalaciones/hornos_solares/sf5.php
- [9] LEVÊQUE, Gaël, et al. High-flux optical systems for solar thermochemistry. *Solar Energy*, 2017, vol. 156, p. 133-148. <
https://www.researchgate.net/publication/319343068_High-flux_optical_systems_for_solar_thermochemistry> [consulta: 4 mayo 2020]
- [10] Standard ECMA-262 9th Edition June 2018, ECMA Script 2018 Language Specification <<http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/Ecma-262.pdf>,> [En línea]. [Último acceso: 13 Mayo 2020].
- [11] Duncan, G. S., Nudehi, S. S., Palumbo, R. D., Blood, D., & Venstrom, L. J. (2015). Student development of a five kW solar furnace for solar thermal chemistry research. ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, 122nd ASEE Annual Conference and Exposition: Making Value for Society (122nd ASEE Annual Conference and Exposition: Making Value for Society).

- [12] Buie, D., Imenes, A. G. (2001). A Solar and vector class for the optical simulation of solar concentrating systems, University of Sydney, Australia.
- [13] Blazquez, R (2011). ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE FLUJO Y FACTOR DE DESBORDAMIENTO DE UN SISTEMA DE DISCO PARABÓLICO- Tesis de pregrado no publicada. Universidad de Sevilla, España.
- [14] MENTADO-ISLAS, Diana, et al. Simulación de un concentrador solar de canal parabólico mediante el software SolTrace. Revista de Prototipos Tecnológicos, 2016, p. 68.
- [15] HALES, Thomas C. The honeycomb conjecture. Discrete & Computational Geometry, 2001, vol. 25, no 1, p. 1-22.
- [16] Ashby, M. F y Jones, D. R. 2006. Engineering Materials 2, An introduction to Microstructures, Processing and Desing. 3ª ed. Oxford, Butterworth-Heinemann.
- [17] VILLEDA-MUÑOZ, G., et al. Clay-brick firing in a high-temperature solar furnace. Ingeniería. Investigación y Tecnología, 2011, vol. 12, no 4, p. 395-408.
- [18] Buie, D.; MONGER, A. G.; DEY, C. J. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations. Solar energy, 2003, vol. 74, no 2, p. 113-122.
- [19] Emison . Hornos de cámara eléctricos.[en línea] <<https://www.emison.com/222.htm>> [consulta: 1 agosto 2020]
- [20] Hornos del valle S.A. 2013. Horno electrico de carga frontal sobremesa para cerámica y vidrio. [en línea] <https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/143839/benjaminV.4-inox-ATR-902.pdf> [consulta: 1 agosto 2020].
- [21] CEPAL, N. U. La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Objetivos, metas e indicadores mundiales. 2019.
- [22] García, J; Iguago, F. (2016). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO PARA REDUCIR EL TIEMPO DE CUECE Y CURADO DE RESINA Y CERÁMICA PARA LA MICROEMPRESA CERÁMICAS NOVA. Tesis de pregrado publicada, Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, Ecuador.

Anexos

Anexo A.

Imágenes con respecto al Run Flux Análisis y la adquisición de los valores de flujo en la zona focal. Se puede observar que, al tener muchas divisiones en la superficie de interés, se pierde la claridad en los gráficos de flujo de ambos ejes, como la gráfica de colores o Heat Map.

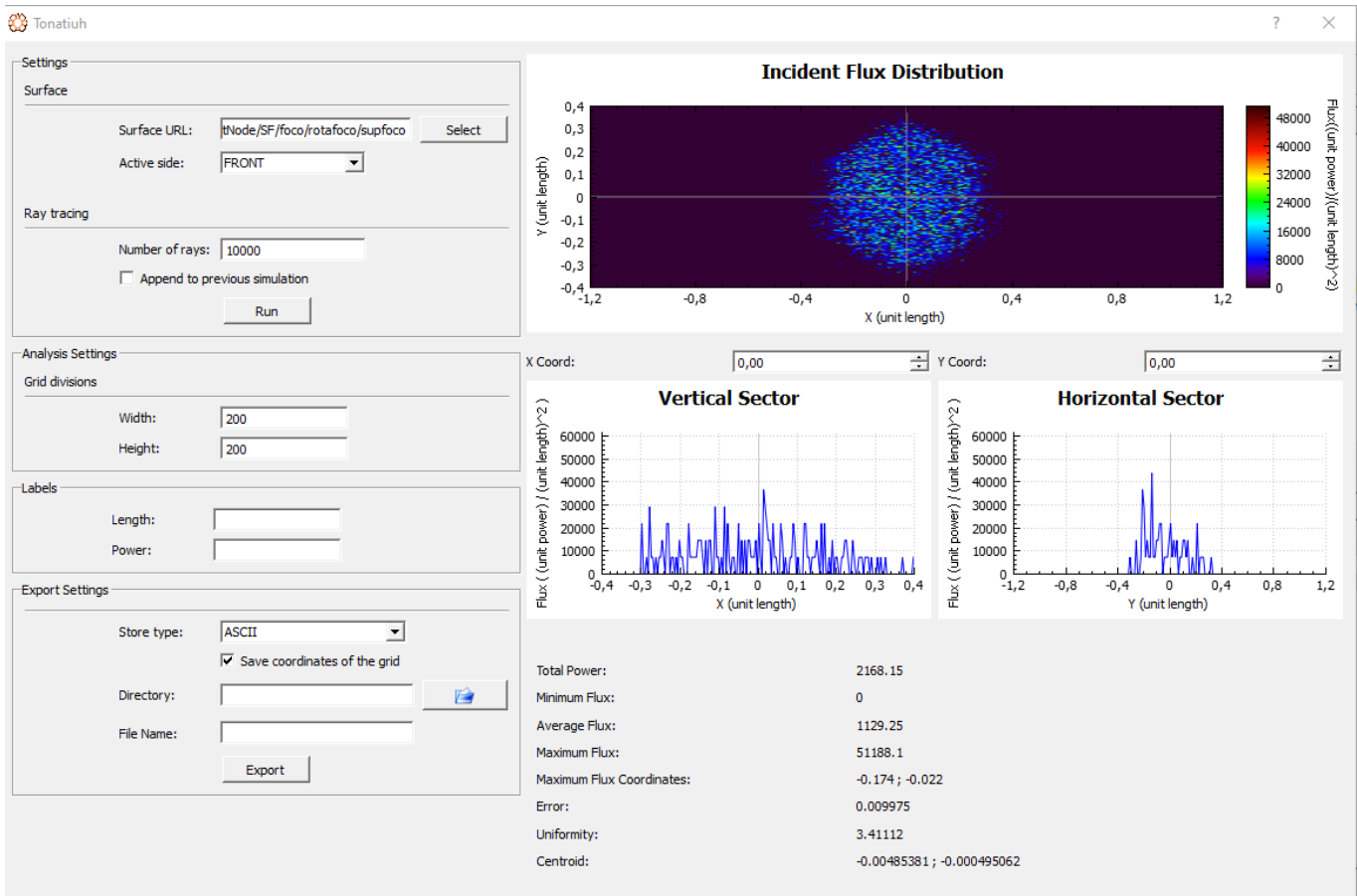


Figura 5.1 Imagen Grid 200x200 y 10.000 rayos

En las siguientes imágenes se ve cómo, al aumentar los rayos, los gráficos y el Heat Map comienzan a tener sentido, manteniéndose los valores del “Total Power”, es decir, le da más precisión al análisis al aumentar el número de muestras (rayos).

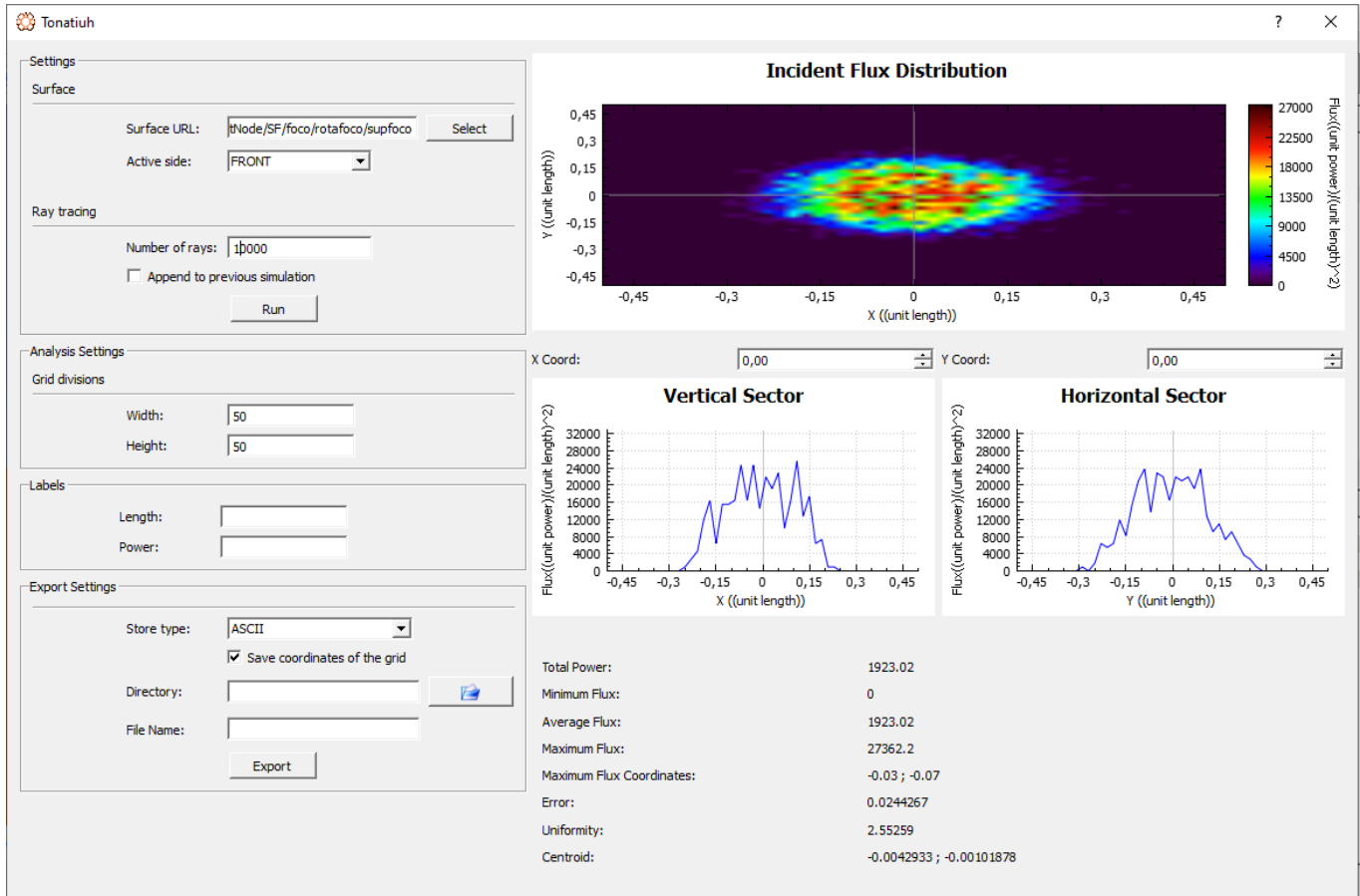


Figura 5.2 Imagen con Grid de 50x50 y 1.000 rayos

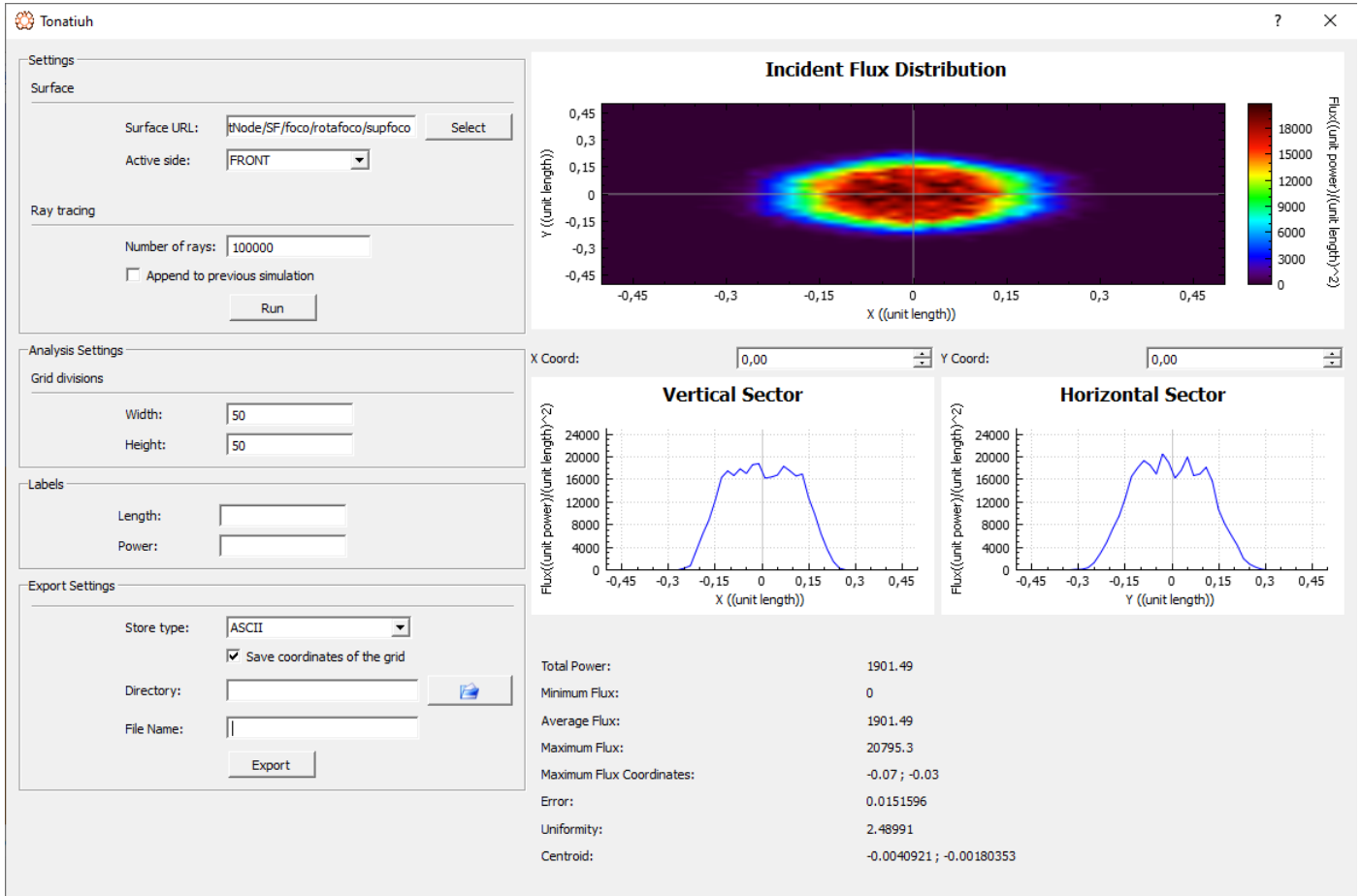


Figura 5.3 Imagen con Grid de 50x50 y 100.000 rayos

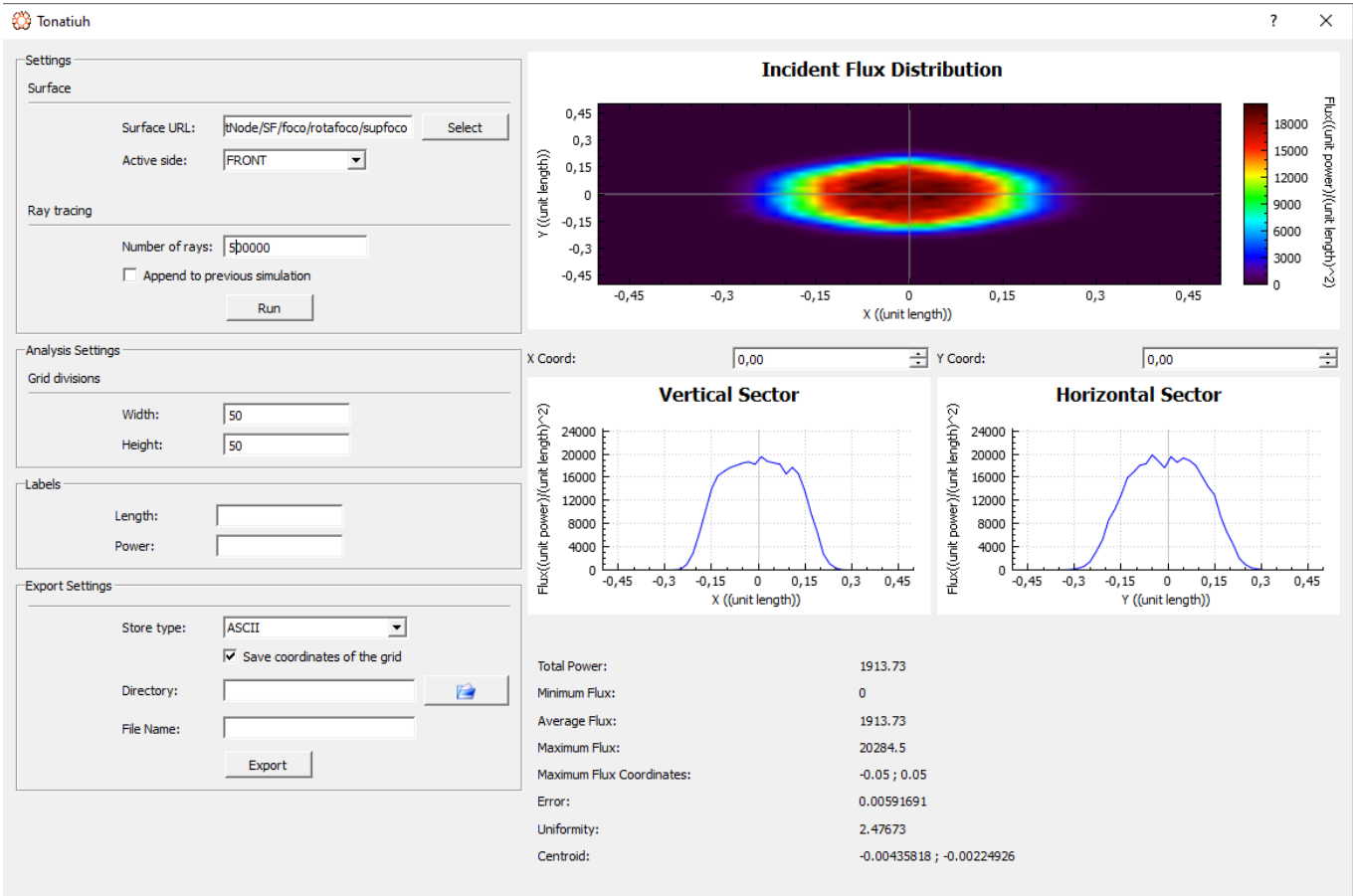


Figura 5.3 Imagen Grid 50x50 y 500.000 rayos

Anexo B .

En este anexo se comparten 4 imágenes del análisis de flujo en la superficie del foco, con un Grid de 50x50 y 500.000 rayos. El parámetro que va cambiando es la ca concavidad o “Sphere radius” de la definición de la faceta. Para cada imagen el Sphere radius es a) 5, b) 10, c) 50, d) 100 .

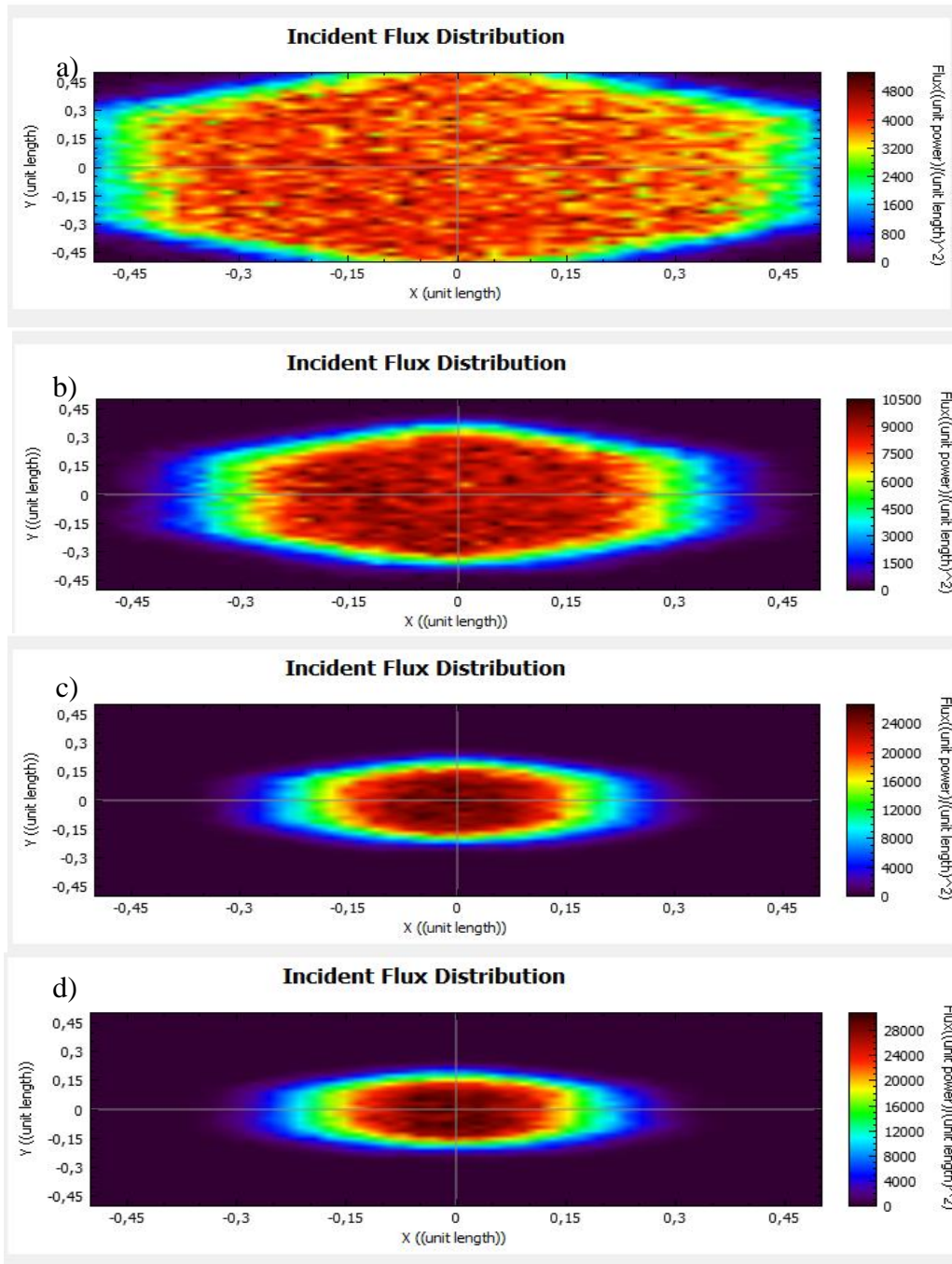


Figura 5.4 Cambio del área focal de concentración en función de la concavidad de las facetas del concentrador

Anexo C.

El código utilizado Para las iteraciones en Tonatiuh es el siguiente el cual itera 25 veces con respecto a la distancia focal y el área del heliostato , teniendo que cambiar manualmente los valores de Nx y Ny.

```
//SOLAR SISTEM
tonatiuh.New();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode");
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/TSeparatorKit1");
tonatiuh.SetNodeName("SF");
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF" );
var Nx=4;
var Ny=4;
var t= 0.005;
var foc=0.5;
var ar= 0.16;
nx =Nx.toString();
ny =Ny.toString();

//HELIOSTATO
//Modeling de reciver
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF" );
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/SF/TSeparatorKit1");
Figura 5.5 Imagen Grid 50x50 y 500.000 rayos
tonatiuh.SetNodeName("Heliostato");
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF/Heliostato" );
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF/Heliostato/TSeparatorKit1" );
tonatiuh.SetNodeName("rotaHeliostato");
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/SF/Heliostato/rotaHeliostato/TShapeKit1");
tonatiuh.SetNodeName("mathel");
tonatiuh.CreateShape( "Flat_Rectangle");
tonatiuh.CreateMaterial( "Specular_Standard_Material" );
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/Heliostato","rotation","0 0 1 0");
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/Heliostato/rotaHeliostato", "rotation" , "-1 0 0
0.86159277");
tonatiuh.SetValue(
 "//SunNode/RootNode/SF/Heliostato/rotaHeliostato/mathel/Specular_Standard_Material",
 "m_reflectivity", "0.92" );

//FOCO
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF");
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF/TSeparatorKit1" );
tonatiuh.SetNodeName( "foco" );
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/foco","rotation","0 0 1 1.5707964");
```

```

tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF/foco" );
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF/foco/TSeparatorKit1" );
tonatiuh.SetNodeName( "rotafoco" );
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/SF/foco/rotafoco/TShapeKit1");
tonatiuh.SetNodeName("supfoco");
tonatiuh.CreateShape( "Flat_Rectangle");
tonatiuh.CreateMaterial( "Specular_Standard_Material" );
var targetShapNode = "//SunNode/RootNode/SF/foco/rotafoco/supfoco/Flat_Rectangle";
tonatiuh.SetValue( targetShapNode, "width", "1" );
tonatiuh.SetValue( targetShapNode, "height", "1");
tonatiuh.SetSunshape( "Pillbox_Sunshape" );
tonatiuh.SetSunshapeParameter( "irradiance", "900" );
tonatiuh.SetSunshapeParameter( "thetaMax", "0.00465" );
tonatiuh.ChangeSunPosition(0, 81.3136);
/*Define ray tracing options*/
tonatiuh.SetRaysPerIteration( 20000 );
tonatiuh.SetRayCastingGrid( 300,300 );
tonatiuh.SetRandomDeviateType("Mersenne Twister");
tonatiuh.SetRaysDrawingOptions( 1, true);
tonatiuh.SetPhotonMapBufferSize( 500000 );

```

```
//CONCENTRADOR
```

```

tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/SF");
tonatiuh.CreateGroupNode()
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/SF/TSeparatorKit1")
tonatiuh.SetNodeName("concentrador")
var rootnode="//SunNode/RootNode/SF/concentrador";
tonatiuh.SelectNode(rootnode);
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode(rootnode.concat("/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Hex");
var fieldPath = rootnode.concat("/Hex");

```

```

for( r=1; r<=Nx;++r){
var r1=r*(-1);
tonatiuh.SelectNode( fieldPath );
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( fieldPath.concat("/TSeparatorKit1" ) );
var rowName = "Row".concat(r);
tonatiuh.SetNodeName( rowName );
var rowPath = fieldPath.concat("/",rowName);

```

```

for( h=1;h<= Ny; ++h){
//Create a new GroupNode for the heliostat.
tonatiuh.SelectNode( rowPath );
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( rowPath.concat( "/TSeparatorKit1" ) );
var heliostatName = "casquete".concat( h );

```

```

var heliostatPath = rowPath.concat( "/", heliostatName );
tonatiuh.SetNodeName( heliostatName );
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( heliostatPath.concat( "/TSeparatorKit1" ) );
tonatiuh.SetNodeName("casqueteNode" );
var heliostatmaterialPath = heliostatPath.concat( "/casqueteNode" );

if( r == 1 && h == 1){
//Create a tShapeKitNode which will contain the shape and the material of the heliostat
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
tonatiuh.SelectNode( heliostatmaterialPath .concat( "/TShapeKit1" ) );
tonatiuh.SetNodeName( "HeliostatSurface");
var heliostatSurfacePath = heliostatmaterialPath .concat( "/HeliostatSurface" );
tonatiuh.CreateShape("Spherical_polygon");
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_polygon"), "sphereRadius",
"100" );
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_polygon"), "radius", "0.2");
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_polygon"), "polygonSides",
"6");
tonatiuh.SetValue(heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_polygon"),"activeSide","INSIDE
");
tonatiuh.CreateMaterial("Specular_Standard_Material");
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat( "/Specular_Standard_Material" ),
"m_reflectivity", "0.92" );
tonatiuh.Copy();
}
else{
tonatiuh.PasteLink();
}
}
}

//Variables
var t= 0.005;
var foc=0.5;
var ar= 0.16;
var ygap=0.176;
var ydesp=0.175;
var zifoco = 2;
var xfoco= 0;
var yfoco= 0;
var toty= (Ny*(2*ygap + t)- t)/2;
var totY = toty.toString();
tonatiuh.SetValue("//Light", "disabledNodes",
"//SunNode/RootNode/SF/concentrador;//SunNode/RootNode/SF/foco");
for( z=1; z<=5;++z){
var Zfoco= z*zifoco;
var zfoco= Zfoco.toString();
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/foco", "translation", "0 0 ".concat(zfoco));
}
}
}

```

```

var xHel = (-1)*(2*ar+t)*(Nx/2) - 5*foc ;
var XHel= xHel.toString();
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/Heliostato","translation", XHel.concat( " 0 10"
));
var Zmid= Math.pow((XHel ), 2)/(4*zfoco) ;
var zmid =Zmid.toString();
var hip = Math.sqrt( Math.pow((xfoco-XHel), 2 ) + Math.pow((zfoco - zmid), 2));
var Hip = hip.toString();
var Sina=(XHel/Hip);
var sina=sina.toString();
var Angulo1 = Math.asin(sina);
var Angulo=Angulo1.toString();
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/Heliostato","translation", XHel.concat( " 0 10"
));

if (zmid < zfoco ){
Angulofinal1= Angulo1*(-1) - Math.PI/2;
var angulof1= Angulofinal1.toString();
//print (" Angulof1 ")
//print ( angulof1 )
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/foco/rotafoco","rotation","1 0 0 ".concat(" ",
angulof1 ));
}
else{
var Angulo2= Angulo1*(-1)-Math.PI;
Angulofinal2= Angulo2*(-1) - (Math.PI/2);
var angulof2= Angulofinal2.toString();
//print (" Angulof1 ")
//print ( angulof2 )
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/foco/rotafoco","rotation","1 0 0 ".concat(" ",
angulof2 ));
}

//CONCENTRADOR

for( r=1; r<=Nx;++r){
var r1=r*(-1);
var fieldPath = rootnode.concat("/Hex");
tonatiuh.SelectNode(fieldPath);
var rowname = "Row".concat(r);
var rowPathi = fieldPath.concat("/",rowname);
var rowX = (2*ar+t/2)*r1 - 5*foc +ar;
var rowx=rowX.toString();
var rowx2= Math.pow(rowX , 2) ;
var ecZ = rowx2/(4*zfoco) ;
var ecz = ecZ.toString() ;
var rowxxfoco2= Math.pow((rowx-xfoco) , 2) ;
var eczzfoco2= Math.pow((ecz- zfoco), 2) ;
var Xz=Math.sqrt( rowxxfoco2+ eczzfoco2);
var COXz= (xfoco - rowx);
var COxz= COXz.toString();

```

```

var XZ= Xz.toString();
var sinang1= (COxz/XZ);
tonatiuh.SetValue( rowPathi , "translation", rowx.concat(" 0 ").concat(" ", ecz ) );

if (ecz < zfoco ){
var ang1=Math.asin(sinang1);
var angxz1= (ang1)/2 - Math.PI;
var angXZ1=angxz1.toString();
print (" AngRow ")
print ( angXZ1 )
tonatiuh.SetValue( rowPathi , "rotation" , "0 1 0 ".concat(" ", angXZ1 ));
}
else{
var ang2=Math.asin(sinang1);
var angxz2= (-1)*(Math.PI + ang2)/2;
var angXZ2=angxz2.toString();
print (" angRow")
print ( angXZ2 )
tonatiuh.SetValue( rowPathi , "rotation" , "0 1 0 ".concat(" ", angXZ2 ));
}

for( h=1;h<= Ny; ++h){
if (r % 2== 0){
var rowY = toty -(2*ygap+t)*(h-1) - ygap + ydesp ;
}
else{
var rowY = toty -(2*ygap+t)*(h-1) - ygap ;
}

//Create a new GroupNode for the heliostat.
tonatiuh.SelectNode( rowPathi );
var heliostatName = "casquete".concat( h );
var heliostatPathi = rowPathi.concat( "/", heliostatName );
tonatiuh.SelectNode( heliostatPathi );
var rowy = rowY.toString();
var rowy2= Math.pow(rowy,2) ;
var xy = Math.sqrt(Math.pow((xfoco-rowx),2) + Math.pow((yfoco-rowy),2));
var XY=xy.toString();
var ecZ1 =(rowy2)/(4*XZ)*(-1);
var ecz1=ecz1.toString();
var ecZtot =ecz - ecz1;
var ecztot=ecz1.toString();
var Dist = Math.sqrt(Math.pow((zfoco-ecztot),2)+Math.pow(XY,2));
var dist = Dist.toString();
var senang2= rowy/dist;
var ang2= Math.sin(senang2);
var angyz=(-1)* ang2/2 ;
var angYZ=angyz.toString();
tonatiuh.SetValue( heliostatPathi , "translation", " 0 ".concat(" ", rowy).concat(" 0 ") )
tonatiuh.SetValue( heliostatPathi, "rotation" , "1 0 0 ".concat(" ", angYZ ));

```

```

//Create a new groupNode for the tracker and rename it
var heliostatmaterialPathi = heliostatPathi.concat( "/casqueteNode" );
tonatiuh.SelectNode( heliostatmaterialPathi );
tonatiuh.SetValue( heliostatmaterialPathi , "rotation" , " 0 0 1 0.52359877" );
tonatiuh.SetValue( heliostatmaterialPathi , "translation" , " 0 0 ".concat(ecz1) );
}
}
for( c=1;c<= 5; ++c){
var materialheliostato=
"//SunNode/RootNode/SF/Heliostato/rotaHeliostato/mathel/Flat_Rectangle";
tonatiuh.SetValue( materialheliostato, "width", c);
tonatiuh.SetValue( materialheliostato, "height", c );
tonatiuh.SetValue("//Light", "disabledNodes",
"//SunNode/RootNode/SF/concentrador;//SunNode/RootNode/SF/foco");
var fileNames = "memoriaDFH" ;
var iteration = c.toString();
tonatiuh.RunFluxAnalysis( "//SunNode/RootNode/SF/foco/rotafoco/supfoco", "FRONT",
"100000", "50" , "50" , "C:/Users/Lobianos/Desktop/Escritorio/tonatiuh/RunFluxAnalysis",
fileNames.concat(zfoco).concat(nx).concat(iteration) , true );
}
}

```

El siguiente código se utilizo para modelar los sistemas de forma individual, fue importante para ver las fallas del código anterior.

```

// F:11x11 - Df:2 - Hel:2x2
//SOLAR FURNACE
tonatiuh.New();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode");
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/TSeparatorKit1");
tonatiuh.SetNodeName("SF");
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF" );

//CONCENTRADOR
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/SF");
tonatiuh.CreateGroupNode()
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/SF/TSeparatorKit1")
tonatiuh.SetNodeName("concentrador")
var rootnode="//SunNode/RootNode/SF/concentrador";
tonatiuh.SelectNode(rootnode);
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode(rootnode.concat("/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Hex");
var fieldPath = rootnode.concat("/Hex");
//Variables
var Nx=14;

```

```

var Ny=3;
var t= 0.005;
var foc=0.5;
var ar= 0.16;
var ygap=0.176;
var ydesp=0.175;
var Zfoco = 2;
var zfoco= Zfoco.toString();
var xfoco= 0;
var yfoco= 0;
aristaHel=3;
var toty= (Ny*(2*ygap + t)- t)/2;
var totY = toty.toString();
//print ("totY")
//print ( totY )

for( r=1; r<=Nx;++r){
var r1=r*(-1);
//Create a group node for the row
tonatiuh.SelectNode( fieldPath );
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( fieldPath.concat("/TSeparatorKit1" ) );
var rowName = "Row".concat(r);
tonatiuh.SetNodeName( rowName );
var rowPath = fieldPath.concat("/",rowName);
var rowx = (2*ar+t/2)*r1 - 5*foc +ar;
var rowx2= Math.pow(rowx , 2) ;
var ecZ = rowx2/(4*zfoco) ;
var ecz = ecZ.toString() ;
var rowxxfoco2= Math.pow((rowx-xfoco) , 2) ;
var eczzfoco2= Math.pow((ecz- zfoco), 2) ;
var Xz=Math.sqrt( rowxxfoco2+ eczzfoco2);
var COXz= (xfoco - rowx);
var COxz= COXz.toString();
var XZ= Xz.toString();
var sinang1= (COxz/XZ);
tonatiuh.SetValue( rowPath , "translation" , rowx.toString().concat( " 0 " ).concat( ecz ));

if (ecz < zfoco ){
var ang1=Math.asin(sinang1);
var angxz1= (ang1)/2 - Math.PI;
var angXZ1=angxz1.toString();
print (" AngRow ")
print ( angXZ1 )
tonatiuh.SetValue( rowPath , "rotation" , "0 1 0 ".concat(" ", angXZ1 ));
}
else{
var ang2=Math.asin(sinang1);
var angxz2= (-1)*(Math.PI + ang2)/2;
var angXZ2=angxz2.toString();
print (" angRow ")

```



```

print ( angXZ2 )
tonatiuh.SetValue( rowPath , "rotation" , "0 1 0 ".concat(" ", angXZ2 ));
}

for( h=1;h<= Ny; ++h){
if (r % 2== 0){
var rowY = toty -(2*ygap+t)*(h-1) - ygap + ydesp ;
}
else{
var rowY = toty -(2*ygap+t)*(h-1) - ygap ;
}

//Create a new GroupNode for the heliostat.
tonatiuh.SelectNode( rowPath );
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( rowPath.concat( "/TSeparatorKit1" ) );
var heliostatName = "casquete".concat( h );
var heliostatPath = rowPath.concat( "/", heliostatName );
tonatiuh.SetNodeName( heliostatName );

//set the value of translation to the heliostat
//print ( toty)

var rowy = rowY.toString();
//print (" prueba2 ")
tonatiuh.SetValue( heliostatPath , "translation", " 0 ".concat(" ", rowy).concat(" 0 " ) );

var rowy2= Math.pow(rowy,2) ;
var xy = Math.sqrt(Math.pow((xfoco-rowx),2) + Math.pow((yfoco-rowy),2));
var XY=xy.toString();
var ecZ1 =(rowy2)/(4*XZ)*(-1);
var ecz1=ecz1.toString();
var ecZtot =ecz - ecz1;
var ecztot=ecztot.toString();
var Dist = Math.sqrt(Math.pow((zfoco-ecztot),2)+Math.pow(XY,2));
var dist = Dist.toString();
var senang2= rowy/dist;
var ang2= Math.sin(senang2);
var angyz=(-1)* ang2/2 ;
var angYZ=angyz.toString();
tonatiuh.SetValue( heliostatPath , "rotation" , "1 0 0 ".concat(angYZ ));
tonatiuh.SetValue( heliostatPath , "translation", " 0 ".concat(" ", rowy).concat(" 0 " ) );

//Create a new groupNode for the tracker and rename it
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( heliostatPath.concat( "/TSeparatorKit1" ) );
tonatiuh.SetNodeName("casqueteNode" );
var heliostatmaterialPath = heliostatPath.concat( "/casqueteNode" );
tonatiuh.SelectNode( heliostatmaterialPath );

```

```

tonatiuh.SetValue( heliostatmaterialPath , "rotation" , " 0 0 1 0.52359877" );
tonatiuh.SetValue( heliostatmaterialPath , "translation" , " 0 0 ".concat(ecz1) );

if( r == 1 && h == 1){
//Create a tShapeKitNode which will contain the shape and the material of the heliostat
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
tonatiuh.SelectNode( heliostatmaterialPath .concat( "/TShapeKit1" ) );
tonatiuh.SetNodeName( "HeliostatSurface");
var heliostatSurfacePath = heliostatmaterialPath .concat( "/HeliostatSurface" );
//Create the shape. It's going to be a "Spherical_rectangle"
tonatiuh.CreateShape("Spherical_polygon");
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_polygon"), "sphereRadius",
"100" );
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_polygon"), "radius", "0.2");
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_polygon"), "polygonSides",
"6");
tonatiuh.SetValue(heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_polygon"),"activeSide","INSIDE
");
//Create the material. It's going to be a "Specular_Standard_Material"
tonatiuh.CreateMaterial("Specular_Standard_Material");
//Set the material properties.
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat( "/Specular_Standard_Material" ),
"m_reflectivity", "0.92" );
//Copy the node just created
tonatiuh.Copy();
}
else{
tonatiuh.PasteLink();
}
}
}
//HELIOSTATO
//Modeling de reciver
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF" );
//Select sf node to create the target
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/SF/TSeparatorKit1");
//Change the default name to Heliostato
tonatiuh.SetNodeName("Heliostato");
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF/Heliostato" );
var xHel = (-1)*(2*ar+t)*(Nx/2) - 5*foc ;
var XHel= xHel.toString();
print( " xHel = " )
print ( XHel )
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/Heliostato","translation", XHel.concat( " 0 10"
));
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/Heliostato","rotation","0 0 1 0");
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF/Heliostato/TSeparatorKit1" );
tonatiuh.SetNodeName("rotaHeliostato")

```

```

tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/Heliostato/rotaHeliostato", "rotation" , "-1 0 0
0.86159277")
//Create a SurfaceNode as a child of "matHel"
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
//Select the last node created and rename it to "matHel"
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/SF/Heliostato/rotaHeliostato/TShapeKit1");
tonatiuh.SetNodeName("mathel");
tonatiuh.CreateShape( "Flat_ Rectangle");
tonatiuh.CreateMaterial( "Specular_ Standard_ Material" );
//creates a variable
var materialheliostato=
 "//SunNode/RootNode/SF/Heliostato/rotaHeliostato/mathel/Flat_ Rectangle";
//Change some properties
tonatiuh.SetValue( materialheliostato, "width", aristaHel);
tonatiuh.SetValue( materialheliostato, "height", aristaHel );
tonatiuh.SetValue(
 "//SunNode/RootNode/SF/Heliostato/rotaHeliostato/mathel/Specular_ Standard_ Material",
 "m_reflectivity", "0.92" );

```

```
//FOCO
```

```

tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF");
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF/TSeparatorKit1" );
tonatiuh.SetNodeName( "foco" );
//Change in Target node "translation" parameter values to "0 0 2 "
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/foco", "translation", "0 0 ".concat(zfoco));

```

```

//Set Target values of "rotation" parameter to "0 1 0 2.5 "
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/foco", "rotation", "0 0 1 1.5707964");
//Target node to create a rotation node
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF/foco" );
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/SF/foco/TSeparatorKit1" );
tonatiuh.SetNodeName( "rotafoco" );
var Zmid= Math.pow((XHel ), 2)/(4*zfoco) ;
var zmid =Zmid.toString();
var hip = Math.sqrt( Math.pow((xfoco-XHel), 2) + Math.pow((zfoco - zmid), 2));
var Hip = hip.toString();
var Sina=(XHel/Hip);
var sina=sina.toString();
var Angulo1 = Math.asin(sina);
var Angulo=Angulo1.toString();

```

```

if (zmid < zfoco ){
Angulofinal1= Angulo1*(-1) - Math.PI/2;
var angulof1= Angulofinal1.toString();
print (" Angulof1 ")
print ( angulof1 )

```

```

tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/foco/rotafoco","rotation","1 0 0 ".concat(" ",
angulof1 ));
}
else{
var Angulo2= Angulo1*(-1)-Math.PI;
Angulofinal2= Angulo2*(-1) - (Math.PI/2);
var angulof2= Angulofinal2.toString();
print (" Angulof1 ")
print ( angulof2 )
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/SF/foco/rotafoco","rotation","1 0 0 ".concat(" ",
angulof2 ));
}

```

```

//Now, create target surface node
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
//Select the last node created and rename it to "TargetSurface"
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/SF/foco/rotafoco/TShapeKit1");
tonatiuh.SetNodeName("supfoco");
//Add the shape and material to the surface
tonatiuh.CreateShape( "Flat_Rectangle");
tonatiuh.CreateMaterial( "Specular_Standard_Material" );
//Change target parameters values
var targetShapeNode =
"//SunNode/RootNode/SF/foco/rotafoco/supfoco/Flat_Rectangle";

tonatiuh.SetValue( targetShapeNode, "width", "1" );
tonatiuh.SetValue( targetShapeNode, "height", "1");

```

```

//Set conditions, Runs and export data

```

```

tonatiuh.SetSunshape( "Pillbox_Sunshape" );
tonatiuh.SetSunshapeParameter( "irradiance", "900" );
tonatiuh.SetSunshapeParameter( "thetaMax", "0.00465" );
tonatiuh.ChangeSunPosition(0, 81.3136);
//this function calculates the azimuth and zenith in the place
//which coordinates are (-32.1361,-71.3590) and date is 11/12/2010 at 12:00:00AM.
/*Define ray tracing options*/
tonatiuh.SetValue("//Light", "disabledNodes",
"//SunNode/RootNode/SF/concentrador;//SunNode/RootNode/SF/foco");
//Number of rays to trace into each iteration
tonatiuh.SetRaysPerIteration( 20000 );
//Sun divisions.
tonatiuh.SetRayCastingGrid( 300,300 );
//type of random
tonatiuh.SetRandomDeviateType("Mersenne Twister");
//Draw options
tonatiuh.SetRaysDrawingOptions( 1, true);
//Buffer size
tonatiuh.SetPhotonMapBufferSize( 500000 );
/*Define export parameters*/
//The simulation will be saved into a binary file

```

```
tonatiuh.SetExportPhotonMapType("Binary_file");
//The coordinates will be saved into target local coordinates
tonatiuh.SetExportCoordinates( true, false );
//The intersection surface will not saved because only target photons will be saved.
tonatiuh.SetExportIntersectionSurface( false );
//The surface side will also be saved
tonatiuh.SetExportIntersectionSurfaceSide( true );
//Previous and next data in not needed
tonatiuh.SetExportPreviousNextPhotonID( false );
//Target surface photons will be saved.
var targetSurface = "//SunNode/RootNode/SF/foco/rotafoco/supfoco";
tonatiuh.AddExportSurfaceURL( targetSurface );
//Define the directory to binary files, the files names and the size in photons for the files.
var exportDir = "XXX";
tonatiuh.SetExportTypeParameterValue( "ExportDirectory", exportDir );
var fileNames = "TargetData";
var iteration = h.toString();
tonatiuh.SetExportTypeParameterValue( "ExportFile", fileNames.concat( iteration ) );
tonatiuh.SetExportTypeParameterValue( "FileSize", "-1" );
//Increments the photon map for tunned iterations.
tonatiuh.SetIncreasePhotonMap( false );
tonatiuh.Run();
```

Anexo D.

Mediante un código de Python que se detalla se pueden analizar los 125 documentos exportados

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from os import listdir
from os.path import isfile, join
mypath= '/Users/Lobianos/Desktop/Escritorio/toniatiuh/RunFluxAnalysis/hel5'
files = [f for f in listdir(mypath) if isfile(join(mypath, f))]
import math as m

maximos=[]
maximoscon=[]
for nombre in files:
    data = pd.read_csv('/Users/Lobianos/Desktop/Escritorio/toniatiuh/RunFluxAnalysis/hel5/'+nombre,sep = '\t') ## Cargamos el
    data.sort_values(by = 'Flux(W/m2)', ascending = False, inplace = True)
    data['cumsum'] = data['Flux(W/m2)'].cumsum()
    data['distancia']= np.sqrt(data['x(m)']**2 + data['y(m)']**2)
    total = data['Flux(W/m2)'].sum()
    total95= total*0.95
    data['porcentaje']= data['Flux(W/m2)']/ total
    data['limite'] = data['porcentaje'].cumsum() <= 0.95
    data['porcentajecum'] = data['porcentaje'].cumsum()
    temp = data.loc[data['limite']==True] #Seleccionamos solo los que tienen true
    x_max=temp['x(m)'].max() #Calcular el maximo y los minimos de las columnas
    y_max=temp['y(m)'].max()
    x_min=temp['x(m)'].min()
    y_min=temp['y(m)'].min()
    rx= (x_max -x_min)/2
    ry= (y_max -y_min)/2
    areaFocal= rx*ry*m.pi
    Potencia= (total)/2500
    conc=(Potencia/areaFocal)
    print("-----")
    print("Archivo: " +nombre)
    print("X maximo: "+ str(x_max),"X minimo: "+str(x_min),"Y maximo: "+str(y_max),"Y minimo: "+str(y_min))
    print("Total flujo [W/m^2]: " +str(total))
    print("Area Focal " + str(areaFocal), "Flujo 95% [W/m^2]: " +str(total95))
    print("Potencia Total: " +str(Potencia)+"[W]")
    #print("Energia concentrada: " + str(conc) + "[W/m^2]")

    #print("Total flujo 95% [W/m^2]: " +str(total95))
    maximos.append((Potencia ,nombre)) ## Agregamos el valor (total,nombre del archivo) a una lista
    maximoscon.append((conc,nombre))
```

Anexo E.

Resultados entregados luego de ser procesados los documentos por el programa Python donde se detallan las configuraciones con Potencias Máximas y Mínimas, obtenidas por las iteraciones, Fueron agrupadas en pares con respecto al tamaño del heliostato con el que fueron diseñadas, Se puede ver el área focal y el flujo en la superficie focal

Potencia máxima	Potencia mínima
Archivo: memoriaDFH1041.txt X maximo: 0.27 X minimo: -0.29 Y maximo: 0.27 Y minimo: -0.27 Total flujo [W/m ²]: 1282031.0093 Area Focal 0.23750440461138841 Flujo 95% [W/m ²]: 1217929.458835 Potencia Total: 512.81240372[W]	Archivo: memoriaDFH2171.txt X maximo: 0.25 X minimo: -0.27 Y maximo: 0.15 Y minimo: -0.15 Total flujo [W/m ²]: 768630.1157 Area Focal 0.12252211349000193 Flujo 95% [W/m ²]: 730198.6099149999 Potencia Total: 307.45204628[W]
Archivo: memoriaDFH1072.txt X maximo: 0.27 X minimo: -0.29 Y maximo: 0.27 Y minimo: -0.27 Total flujo [W/m ²]: 5137261.721000001 Area Focal 0.23750440461138841 Flujo 95% [W/m ²]: 4880398.634950001 Potencia Total: 2054.9046884000004[W]	Archivo: memoriaDFH242.txt X maximo: 0.27 X minimo: -0.29 Y maximo: 0.17 Y minimo: -0.17 Total flujo [W/m ²]: 2370813.917 Area Focal 0.14953981031087418 Flujo 95% [W/m ²]: 2252273.2211499996 Potencia Total: 948.3255667999999[W]
Archivo: memoriaDFH10113.txt X maximo: 0.29 X minimo: -0.29 Y maximo: 0.29 Y minimo: -0.29 Total flujo [W/m ²]: 11447664.007000001 Area Focal 0.2642079421669016 Flujo 95% [W/m ²]: 10875280.80665 Potencia Total: 4579.0656028[W]	Archivo: memoriaDFH243.txt X maximo: 0.35 X minimo: -0.29 Y maximo: 0.17 Y minimo: -0.17 Total flujo [W/m ²]: 2467094.097 Area Focal 0.17090264035528474 Flujo 95% [W/m ²]: 2343739.3921499997 Potencia Total: 986.8376388[W]
Archivo: memoriaDFH10144.txt X maximo: 0.29 X minimo: -0.29 Y maximo: 0.29 Y minimo: -0.29 Total flujo [W/m ²]: 20288716.857 Area Focal 0.2642079421669016 Flujo 95% [W/m ²]: 19274281.01415 Potencia Total: 8115.486742800001[W]	Archivo: memoriaDFH244.txt X maximo: 0.33 X minimo: -0.29 Y maximo: 0.17 Y minimo: -0.17 Total flujo [W/m ²]: 2523711.6529999995 Area Focal 0.1655619328441821 Flujo 95% [W/m ²]: 2397526.0703499992 Potencia Total: 1009.4846611999998[W]
Archivo: memoriaDFH10175.txt X maximo: 0.29 X minimo: -0.31 Y maximo: 0.27 Y minimo: -0.29 Total flujo [W/m ²]: 31437361.786000002 Area Focal 0.26389378290154264 Flujo 95% [W/m ²]: 29865493.6967 Potencia Total: 12574.9447144[W]	Archivo: memoriaDFH245.txt X maximo: 0.33 X minimo: -0.29 Y maximo: 0.15 Y minimo: -0.17 Total flujo [W/m ²]: 2429615.7040000004 Area Focal 0.15582299561805374 Flujo 95% [W/m ²]: 2308134.9188 Potencia Total: 971.8462816000001[W]