



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

**INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN  
UNIVERSIDAD DE SONORA

**“Sistema tipo FRESNEL Reflectivo de No Imagen para la Caracterización de Celdas Solares de Alta Eficiencia”**

**INFORME TÉCNICO**  
**RESIDENCIA PROFESIONAL**

PRESENTA:

**Diana Laura Figueroa Valenzuela**  
**Jazabel Noriega González**

TUTOR INTERNO:

M.I. Omar Enrique Manjarrez Vega

TUTOR EXTERNO:

Dr. Ricardo Arturo Pérez Enciso

Culiacán, Sinaloa.

Diciembre de 2020

---



“2021, Año de la Independencia”

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ASUNTO: **Autorización de Impresión**

Culiacán, Sinaloa, 17/08/2021 13:50

**C. DIANA LAURA FIGUEROA VALENZUELA Y JAZABEL NORIEGA GONZÁLEZ  
PASANTE(S) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES  
P R E S E N T E.**

De acuerdo con fallo emitido por la Comisión Revisora Integrada por:

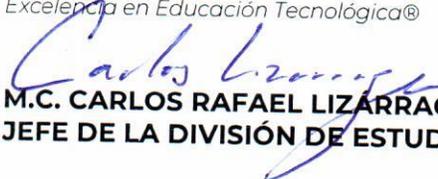
	Cédula Profesional
Presidente: Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica <b>Omar Enrique Manjarrez Vega</b>	0958598
Secretario: Maestría en Ingeniería <b>Luis Alberto Domínguez Inzunza</b>	8772832
Vocal: Maestría en Ciencias de la Ingeniería <b>Joel Josue Ontiveros Mireles</b>	10428448

Y considerando que reúne los requisitos establecidos en la Opción: **TITULACIÓN INTEGRAL: INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL "SISTEMA TIPO RESNEL REFLECTIVO DE NO IMAGEN PARA LA CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES DE ALTA EFICIENCIA"**, damos a usted nuestra autorización para que proceda a imprimir su trabajo profesional

Sin otro particular, quedo de usted.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica®

  
**M.C. CARLOS RAFAEL LIZARRAGA ARREOLA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES**



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN  
DEPARTAMENTO DE DIVISIÓN DE  
ESTUDIOS PROFESIONALES



Juan de Dios Bátiz 310 Pte.  
Col. Guadalupe, C.P. 80220  
Culiacán, Sinaloa  
Tel. 667-713-3804

tecnm.mx | culiacan.tecnm.mx



---

## Índice

Agradecimientos .....	i
Resumen.....	iii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tablas .....	vi
<b>CAPITULO 1. Generalidades del Proyecto .....</b>	<b>9</b>
1.1    Introducción.....	10
1.2    Descripción de la empresa u organización y puesto del estudiante.....	11
1.3    Problemas que resolver.....	12
1.4    Objetivos .....	13
1.5    Justificación.....	13
<b>CAPITULO 2. Marco Teórico.....</b>	<b>14</b>
<b>CAPITULO 3. Desarrollo .....</b>	<b>20</b>
3.1 Principio de operación.....	20
3.1.1 Óptica del Sistema .....	20
3.1.2 Sistema de seguimiento solar.....	20
3.2 Sistema de control SCADA.....	21
<b>CAPITULO 4. Resultados .....</b>	<b>45</b>
<b>CAPITULO 5. Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>55</b>
<b>CAPITULO 6. Competencias Desarrolladas y/o Aplicadas .....</b>	<b>56</b>
Bibliografía y Referencias .....	57

---

---

## Agradecimientos

*Diana Laura Figueroa Valenzuela*

Durante todo este trayecto, siempre existieron personas a la cual agradeceré infinitamente, ya que siempre recibimos su apoyo incondicional y fueron nuestra guía a través de cada una de las etapas de este proyecto, tales como profesores académicos, compañeros de trabajo, familiares y amigos, gracias a ellos pudimos alcanzar los resultados esperados en la estancia y nos sentimos bien recibidas en todo momento.

Empiezo agradeciendo a lo más importante para mí, mi familia. Agradezco a los dos amores de mi vida, mis papás, Francisco Javier y Alma Isabel, gracias por su apoyo incondicional, por confiar y siempre creer en mí, y de esta forma impulsarme a no rendirme, crecer tanto personal como intelectualmente y siempre dar lo mejor de mí. A mis hermanos, Alma Cristina y Javier Alberto, gracias por apoyarme en todo momento y demostrarme su amor desde lejos.

Agradezco a la plataforma solar de Hermosillo de la UNISON por confiar en nosotras, por abrirnos las puertas y permitirnos realizar todo el proceso investigativo dentro de su establecimiento educativo. En particular quiero agradecer de manera especial:

Al Dr. Ricardo Arturo Pérez Enciso, asesor externo y principal colaborador durante todo este proceso, quien, con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este proyecto, además le agradezco por su tiempo, apoyo incondicional, paciencia y confianza.

Al M.I. Omar Enrique Manjarrez Vega, porque contribuyo en nuestra formación académica y fue pieza clave en ella, además por su incondicional apoyo y guía en todo momento durante la carrera, servicio social, residencias profesionales y proyecto de titulación.

Al Dr. Carlos Alberto Pérez Rábago, por asesorarnos de manera virtual en el proyecto, preocuparse por nuestro bienestar y así mismo impulsarnos a seguir en la rama de la investigación.

Al programa de apoyos de proyectos para innovar y mejorar la educación (PAPIME), muchísimas gracias por brindarnos un apoyo en la estancia con la beca de desarrollo de prácticas de solar térmica y materias afines.

Al M.I Héctor Iván González Camarillo, por ser un excelente compañero de trabajo, director de proyecto, además de un gran amigo, quien con tan solo unos meses se logró crear un excelente equipo de trabajo y de esta forma poder realizar de manera muy dinámica cada una de las etapas en este proyecto. Gracias por siempre ayudarnos en cualquier cosa que necesitáramos, por tenernos paciencia, por estar para nosotras.

A mi mejor amiga y compañera de trabajo, Jazabel Noriega Gonzales, por ser parte de cada uno de mis logros y por realizar cada etapa juntas desde la universidad, gracias por cada aventura que pasamos juntas, además de ayudarme y apoyarme en lo que necesitara.

Gracias a mi primo Christian Alberto Gómez Villegas por recibirme en su casa por segunda vez con las puertas abiertas, muchísimas gracias por todo lo que vivimos juntos los tres, por cuidarnos, por preocuparse por nosotras, gracias a él, estar en una ciudad extraña nos hizo sentir como si estuviéramos en nuestra propia casa.

Este informe no es solo un requerimiento más hacia obtener un título académico, representa el fin de un ciclo, el cierre de una de las etapas más significativas que simboliza un logro por lo que he estado trabajando varios años, y objetivo que no hubiera logrado de manera satisfactoria sin la ayuda de personas que representan un soporte y parte fundamental para llegar a la meta que esto representa.

En primer lugar, quiero agradecer a nuestro tutor y amigo, Dr. Ricardo, por su paciencia y confianza, por creer en nosotras y alentarnos diariamente a seguir en este largo camino de aprendizaje.

A nuestro Maestro y tutor, Omar Manjarrez, por compartirnos su conocimiento y guiarnos a lo largo de nuestro desarrollo universitario. Por ser pieza clave en nuestra formación académica y al igual que el resto de nuestros profesores, tiene todo mi respeto y admiración.

Quiero hacer una especial mención a nuestro compañero y amigo Héctor, quien en poco tiempo se ganó un lugar especial. Le doy las gracias por compartirnos sus experiencias y conocimientos, que, aunque llego a nosotras al final de esta etapa, estuvo y está ahí para darnos palabras reconfortantes y de aliento.

A Diana quiero agradecerle por su apoyo, por compartir conmigo buenos y malos ratos, por ser mi familia y poder contar con ella en cualquier momento, es una amistad sincera, con el mayor valor y un lazo que quiero conservar siempre.

A las personas que integran la Plataforma Solar Hermosillo por permitirnos, al igual que a otros jóvenes estudiantes, llevar a cabo actividades de investigación donde pudimos desarrollar habilidades y adquirir conocimientos empíricos, además de acogernos y tratarnos como uno más de los integrantes de dicha institución.

Muchas gracias, al Dr. Carlos y al programa de apoyos de proyectos para innovar y mejorar la educación (PAPIME), por impulsar la superación y desarrollo de académicos y estudiantes.

Quiero **dedicar** este logro a mi familia porque todo el empeño para llegar al objetivo no es nada en comparación al amor que les tengo y la felicidad que me provoca saberlos orgullosos.

A mis padres por compartir conmigo sus consejos y sabiduría, por convertirme en lo que soy enseñarme a hacer las cosas bien y con los mejores valores. Con su amor, apoyo y sacrificio, son y serán el sostén más grande que voy a tener en la vida. Me llevaría una vida agradecerles todo lo que han hecho por mí y aun así no terminaría. A mis hermanas, que con su fe en mí y la misma que yo tengo en ellas, me incitan a querer siempre lograr cada día algo mejor y más relevante.

---

---

## Resumen

A lo largo de los años se han desarrollado hábitos erróneos en el uso de recursos energéticos no renovables, una utilización ineficiente de la energía. Es por ello que, en la actualidad, las energías renovables juegan un papel importante para contribuir al cambio.

La energía solar fotovoltaica es una de las energías limpias más populares en el mercado, debido al enorme crecimiento de inversión, infraestructura, investigación y desarrollo tecnológico en la rama solar.

El presente informe detalla el desarrollo de un proyecto de investigación utilizando tecnología de concentración solar, la cual consiste en el aprovechamiento de un espectro más amplio de la radiación solar. Estos sistemas incrementan el flujo radiativo incidente sobre el área focal.

Los sistemas Fotovoltaicos de Concentración (CPV) son un tipo de energía solar fotovoltaica apoyada por elementos ópticos y representan una opción a los sistemas utilizados convencionalmente. La idea principal de éstos sistemas es reducir la cantidad de material semiconductor utilizado en sistemas convencionales, para abaratar los precios, reducir el área necesaria y aumentar la eficiencia de los sistemas.

El proyecto desarrollado durante las residencias profesionales consta de un Sistema tipo Fresnel reflectivo de no imagen para la caracterización de celdas solares de alta eficiencia, este es un equipo que permitirá caracterizar el desempeño de dispositivos fotovoltaicos sometidos a altos niveles de flujo radiativo con distribución homogénea en condiciones de intemperie, y permite variar la intensidad de flujo radiativo sin modificar la uniformidad de este al desenfocar uno a uno los elementos que componen su óptica primaria.

La realización de estos estudios de comportamiento puede dar inicio al avance y desarrollo de nuevas tecnologías con celdas solares de alta concentración, con la facultad de aprovechar mayormente la radiación solar y aumentar las eficiencias de la tecnología fotovoltaica para la generación de energía.

El sistema tipo Fresnel reflectivo de no imagen para la caracterización de celdas de alta eficiencia está compuesto por dos partes, la óptica del sistema consiste en superficies que modifican la dirección de la propagación de los rayos solares; definidas como Primer Elemento Óptico (PEO) formado en alrededor de 1800 espejos con área de 25 cm<sup>2</sup> cada uno y Segundo Elemento Óptico (SEO) que consiste en un espejo plano de 75 cm de diámetro posicionado a 1.50 m de altura del PEO, mientras que el sistema de seguimiento lo integra un seguido solar de dos ejes.

Para asegurar una eficiencia relativamente alta, es necesario ejecutar evaluaciones de las distribuciones de la radiación incidente en el concentrador/receptor, así como el estudio de la

---

obtención de flujos uniformes a diferentes niveles de concentración solar. Por lo que se desarrollaron dos distintas metodologías de alineación para la caracterización del concentrador: Laser Laica y Colimador de Luz.

Una superficie reflectante puede presentar desviaciones con respecto a su forma ideal, lo que ocasiona que los rayos de luz incidentes sobre el concentrador/receptor no se reflejen de la manera correcta a la distancia focal de diseño y se distribuyan de manera uniforme o que los rayos pueden terminar fuera del área del receptor dependiendo de la magnitud de su error, lo que ocasiona grandes pérdidas de energía en el sistema.

Para poder caracterizar propiamente un concentrador, es necesario contabilizar la precisión del sistema para reducir pérdidas, teniendo como referencia el comportamiento ideal. Debido a que es un experimento de medición de flujos de concentración solar, requiere de una inversión considerable tanto en recursos técnicos como en tiempo de implementación.

Para evitar lo anteriormente mencionado, se realiza una simulación numérica mediante softwares de trazado de rayos donde estos podrán anticipar los resultados esperados antes de llevar a cabo las pruebas experimentales. Los softwares de trazado de rayos, son una herramienta comúnmente utilizada para predecir de manera aproximada el comportamiento de un sistema óptico sometido a un flujo radiativo.

Los softwares de simulación numérica para experimentos de concentración solar más utilizados en la actualidad y de la que se hace uso en el desarrollo del proyecto, son SolTrace y Tonatiuh. Estos brindan la ventaja de realizar el diseño óptimo característicos, tanto de manera gráfica, como resultados numéricos para ser procesado.

El sistema tipo FRESNEL reflectivo de no imagen para la caracterización de celdas solares de alta eficiencia, se desarrolla en las instalaciones de la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH). Ésta es una instalación que ha sido creada conjuntamente por la Universidad de Sonora (UNISON) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), principalmente para llevar a cabo investigación, desarrollo e innovación sobre tecnología en energía solar.

La PSH pertenece al Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar Y Química Solar (LACYQS), está constituido por una red de grupos de investigación con el propósito de avanzar en el desarrollo de las tecnologías de concentración y química solar en México y tiene como objetivo fortalecer las bases de la industria mexicana en el ramo de las energías renovables y ser facilitador de la sustentabilidad energética de México y el mundo.

---

---

## Lista de Figuras

Figura 1. Configuración de los sistemas de concentración. (a) sistema de concentración lineal, (b) sistema de concentración puntual.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2 (a) diagrama esquemático de un sistema LFR con receptor orientado hacia abajo, (b) Diagrama esquemático de un PTC.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3. Configuración básica para un concentrador térmico fotovoltaico basado en lentes de Fresnel. ....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4. Montaje del primer elemento óptico (ensamblaje de espejos con adhesivos en la unión de tuerca y sujeción con el espejo) .....	22
Figura 5. Flujo radiativo uniforme consecuente de la superposición de imágenes reflejadas del primer elemento óptico.....	23
Figura 6. Esquema de método de alineación de espejos del concentrador Fresnel. ....	24
Figura 7. Metodología de alineación de los espejos del concentrador Fresnel. ....	25
Figura 8. Diseño de ensamblaje de colimador de luz, sobre la estructura del portamuestras para la caracterización óptica. ....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9. Representación de los elementos del colimador. ....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 10. Sombras proyectadas por objetos iluminados por una fuente puntual. ....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Marcador no definido.</b>	
Figura 11. sombras proyectadas por objetos iluminados por una frente de ondas plano..	¡Error! Marcador no definido.
<b>Marcador no definido.</b>	
Figura 12. Sun shape simulación soltrace .....	31
Figura 13. Propiedades ópticas del espejo .....	31
Figura 14. propiedades ópticas del receptor.....	32
Figura 15. propiedades del apartado espejo para system stage.....	32
Figura 16. Propiedades del apartado receptor para system stage.....	33
Figura 17. Parámetros para el numero de intersecciones de rayos .....	33
Figura 18. Resultado de intersecciones. ....	34
Figura 19. Resultado de flux maps .....	34
Figura 20. Modelo de formas de sol (Pillbox).....	36
Figura 21. Ventana de códigos del programa (información de los nodos).....	37
Figura 22. Ejemplo de ventana para ingresar los parámetros y valores de cada uno de los nodos (en este caso, características del material del PEO) .....	38
Figura 23. Información arrojada por el software tras ejecutar el análisis del flujo. ....	39
Figura 24. Opciones para la interpretación de la simulación mediante a) base de datos SQL y b) código binario.....	39
Figura 25. Ventana de configuración para la exportación de los datos resultantes de la simulación .....	40
Figura 26. Ventana para crear, ingresar o editar un script. se abre mediante la opción de "automation" en la barra de herramientas.....	40
Figura 27. Simulación en Tonatiuh aplicando 1'000,000 rayos. ....	41

---

Figura 28. Análisis de flujo de radiación de la simulación en Tonatiuh aplicando 1'000,000 rayos. ....	41
Figura 29. Sistema tipo Fresnel de no imagen para la caracterización de celdas solares de alta eficiencia. ....	42
Figura 30. Cámara porta muestras y carcasa guía cónica. ....	43
Figura 31. Cámara porta muestras y carcasa guía cónica. ....	44
Figura 32. simulacion en soltrace aplicando 10,000 rayos, visualizando los rayos del 1-100.....	45
Figura 33. Spot del primer receptor .....	46
Figura 34. surface del primer receptor, mostrando el total de rayos captados, promedio de energía captada, potencia, etc. ....	46
Figura 35. Simulación error óptico de 1 mrad contour plot de receptor.....	47
Figura 36. Simulación error óptico de 1 mrad Surface plot de receptor.....	47
Figura 37. Simulación error óptico de 3 mrad contour plot de receptor.....	48
Figura 38. Simulación error óptico de 2 mrad Surface plot de receptor.....	48
Figura 39. Simulación error óptico de 3 mrad contour plot de receptor.....	49
Figura 40. Simulación error óptico 3 mrad Surface plot de receptor .....	49
Figura 41. simulación ideal teórica (reflectividad 1, error 0).....	50
Figura 42. Simulación teórica (reflectividad 1, error 2 mrad) .....	51
Figura 43. Simulación ideal experimental (reflectividad 1, error 0) .....	51
Figura 44. Simulación experimental (reflectividad 1, error 2 mrad) .....	51
Figura 45. Pruebas de distancia focal colimador. ....	52
Figura 46. probando metodología colimador. ....	53
Figura 47. Ángulos de sujeción para el anclaje del fresnel al sistema de seguimiento. ....	54
Figura 48. acoplamiento actuador lineal en seguidor.....	54

## Lista de Tablas

Tabla 1. Tabla de distribucion de espejos.....	41
--	----

## CAPITULO 1. Generalidades del Proyecto

El sistema de Fresnel reflectivo de no imagen para la caracterización de celdas de alta eficiencia está compuesto por dos partes, la óptica del sistema consiste en superficies reflectivas que modifican la dirección de la propagación de los rayos solares; definidas como Primer Elemento Óptico (PEO) formado por alrededor de 1800 espejos con un área de 25 cm<sup>2</sup> cada uno y el Segundo Elemento Óptico (SEO) que consiste en un espejo plano de 75 cm de diámetro posicionado a 1.50 m de altura del PEO, mientras que el sistema de seguimiento lo integra un estructura mecánica de seguimiento solar de dos ejes de movimiento.

Con los elementos ya antes mencionados, se obtiene un sistema con la capacidad de producir flujos radiativos uniformes en un rango de 1 a 1300 soles en 16 cm<sup>2</sup> de área, o bien, con la capacidad de configurar la óptica para producir distintos niveles de concentración en áreas igualmente distintas y que permitirá llevar a cabo la caracterización de dispositivos fotovoltaicos de alta concentración en ambientes controlados de laboratorio.

El proyecto consiste en el montaje de los espejos de segunda superficie de la primera óptica del sistema sobre los anillos de soporte, así como la modelación de la óptica del sistema mediante el método de trazado de rayos.

También es necesario implementar una metodología de alineación óptima de los espejos del POE que permita obtener una evaluación de la distribución de flujo radiativo sobre el receptor.

El desarrollo del SCADA, acrónimo de Supervisory Control And Data Acquisition, del sistema FRESNEL, permitirá obtener una interfaz usuario-máquina capaz de realizar funciones de operación, control y monitoreo mediante los sistemas de control. Posteriormente, se realiza la caracterización de la óptica del concentrador mediante la evaluación de la distribución de flujo radiativo concentrado en el receptor y la validación del funcionamiento del sistema de control de seguimiento del movimiento aparente del Sol del FRESNEL. Estas actividades, así como las metodologías de caracterización de los componentes que integran el sistema de FRESNEL permitirán obtener un sistema referente en cuanto a los estudios de caracterización de nuevas tecnologías de concentración solar fotovoltaica.

## 1.1 Introducción

Con el tiempo, el uso abundante de recursos energéticos no renovable como lo son el carbón y petróleo hizo adquirir en su uso hábitos erróneos muy difíciles de corregir, provocando así en una primera instancia una utilización ineficiente de la energía. Esto fue provocando con el tiempo a un uso irracional del mismo, por lo que hoy en día, estos hábitos podrían llegar a un punto de no retorno.

Anualmente, se generan aproximadamente 8 millones de toneladas de carbón, las cuales son arrojadas a la atmósfera, esto debido al incremento de la población y la industrialización, a su vez aumentando el consumo de combustibles fósiles y el gran incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los combustibles fósiles son utilizados para producir energía eléctrica y energía térmica, donde la extracción, la elaboración y el transporte de estos combustibles tienen como consecuencia el ya mencionado efecto invernadero. Casi un 80% de las emisiones de dióxido de carbono provienen del consumo y de la transformación de los combustibles fósiles en energía. Por lo tanto, la única forma de limitar las condiciones adversas que ya se mencionaron sería cambiar a fuentes de energías renovables como energía solar, energía eólica, energía geotérmica, entre otras. Es por esto que las tecnologías de captación de energía solar presentan una prometedora solución ante la problemática actual, con la ventaja que a diferencia de otros tipos de tecnologías renovables ésta puede ser aprovechada en la mayor parte del mundo, siempre y cuando las condiciones climáticas sean las adecuadas. Aunque existen varias alternativas para aprovechar la energía solar, sobresale la tecnología de concentración solar de potencia (CSP) y la tecnología solar fotovoltaica (PV).

La tecnología que utilizamos en este proyecto es el sistema de concentración solar (CPV, por sus siglas en inglés), el cual consiste en aprovechar un espectro más amplio de la radiación solar. Los sistemas de concentración incrementan el flujo radiativo incidente sobre el área focal. Se emplean dispositivos ópticos de tecnología baratas y accesibles (lentes y espejos) para concentrar la radiación sobre celdas que aprovechan la mayor cantidad del espectro de radiación solar, con una reducción del área del material semiconductor proporcional al factor de concentración del equipo. La eficiencia de los CPV suele ser del doble del de la tecnología de primera generación, estos sistemas generan aproximadamente el doble de energía por metro cuadrado de área.

La concentración solar en la tecnología fotovoltaica permite reducir costos inherentes al material utilizado en celdas donde uno o más de sus elementos son escasos y por ende más bajos, ya que utilizando un mínimo de área se consigue la misma potencia que la de una superficie  $n$  veces mayor al concentrar  $n$  veces la radiación en esta.

El proyecto en cuestión consta de un Sistema tipo Fresnel de no imagen para la caracterización de celdas solares de alta eficiencia, es un equipo que permitirá caracterizar el desempeño de

dispositivos fotovoltaicos, sometidos a altos niveles de flujo radiativo con distribución homogénea en condiciones de intemperie.

El dispositivo concentra la radiación solar mediante la superposición de imágenes reflejadas de 1800 espejos cuadrados de 5 cm de lado, teniendo una distribución de flujo de radiación uniforme máxima de 16 cm<sup>2</sup>, en el receptor.

Para evaluar cualquier dispositivo que requiera una distribución homogénea de flujo radiativo para un óptimo desempeño, el Fresnel permite variar la intensidad de flujo radiativo sin modificar la uniformidad de este al desenfocar uno a uno los elementos que componen su óptica primaria.

## 1.2 Descripción de la empresa u organización y puesto del estudiante

El Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar Y Química Solar (LACYQS) está constituido por una red de grupos de investigación con el propósito de avanzar en el desarrollo de las tecnologías de concentración y química solar en México. LACYQS está abierto a la academia, industria, gobierno y público en general para la generación de conocimiento científico y tecnológico, así como para la formación recursos humanos de alto nivel.

El principal objetivo de este esfuerzo colaborativo es fortalecer las bases de la industria mexicana en la rama de las energías renovables y ser facilitador de la sustentabilidad energética de México y el mundo.

El LACYQS está formado por un conjunto de varios subproyectos, un horno solar de altos flujos radiativos (HoSIER), un campo experimental de torre central (CEToC), una planta de tratamiento de aguas residuales, y un laboratorio para el estudio de sistemas fotovoltaicos con concentración (LaSiFC) en el cual se desarrolló el sistema tipo Fresnel de no imagen. El CEToC y el LaSiFC se encuentran instalados en la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH).

La Plataforma Solar de Hermosillo (PSH) es una instalación que ha sido creada conjuntamente por la Universidad de Sonora y la Universidad Nacional Autónoma de México, principalmente para llevar a cabo investigación, desarrollo e innovación sobre tecnología en energía solar.

Entre los principales servicios que ofrece la PSH son el diseño, prueba y evaluación de componentes y subsistemas como seguidores solares, helióstatos, receptores solares, sistemas de almacenamiento térmico, sistemas de control, entre otros.

En general la PSH se trata de una instalación de ensayo y laboratorio para diferentes aplicaciones que requieran de altas concentraciones de irradiación solar. También se lleva a cabo investigación sobre ciclos termodinámicos para generación eléctrica a partir de energía solar, química solar, y fotovoltaicos con concentración.

El rol que se llevó a cabo en las residencias profesionales fue el puesto de “ayudante de investigación”, donde las principales actividades fueron la búsqueda, registro y reducción de información, así como la organización logística de la implementación de procedimientos.

Se desarrollaron actividades tales como el análisis de datos basados en simulaciones, para la comparación y comprobación de la hipótesis del proyecto. Así mismo, el diseño y desarrollo de dispositivos complementarios para el funcionamiento del proyecto.

Las actividades antes mencionadas se llevaron a cabo aplicando protocolos de investigación, cumpliendo criterios éticos, bajo la supervisión del asesor.

### 1.3 Problemas que resolver

El desarrollo del presente proyecto permitirá obtener un sistema mediante el cual se podrá llevar a cabo la caracterización de dispositivos fotovoltaicos con alta concentración en ambientes controlados de laboratorio. La realización de estos estudios de comportamiento puede dar inicio al avance y desarrollo de nuevas tecnologías con celdas solares de alta concentración, con la facultad de aprovechar mayormente la radiación solar y aumentar las eficiencias de la tecnología fotovoltaica para la generación de energía.

El Sistema tipo Fresnel reflectivo de no imagen para la caracterización de celdas solares de alta eficiencia da la posibilidad de llevar a cabo las actividades de caracterización térmica y eléctrica de las celdas fotovoltaicas, que permitirá analizar las tecnologías de concentración solar en etapa de investigación para después de la elaboración de pruebas poder introducirlas en el mercado competitivo.

Establecer un sistema, a nivel laboratorio, para la evaluación de estas tecnologías, resulta muy conveniente ya que tendría un efecto importante debido a que en México no existe bases del desarrollo de esta tecnología, y esto representa una limitación, de modo que contar con un sistema de caracterización de nuevas tecnologías pueden dar inicio para poder desarrollar e innovar en futuros proyectos para el progreso de la tecnología en el país.

- Aumento de la eficiencia de sistemas fotovoltaicos convencionales.
- Reducción de costos en generación de energía.
- Reducción del área ocupacional en la instalación de los sistemas fotovoltaicos.

## 1.4 Objetivos

### Objetivo general

- Puesta en operación de un sistema tipo Fresnel de no imagen para la caracterización de celdas solares de alta eficiencia.

### Objetivos específicos

- Estudio teórico de la distribución de la radiación solar concentrada por el Fresnel, por medio de software especializado que utiliza la técnica de trazado de rayos.
- Armado del Fresnel.
- Desarrollo de una metodología para alineación de los espejos del Fresnel.
- Realizar una evaluación óptica del Fresnel.

## 1.5 Justificación

Actualmente la energía solar fotovoltaica juega un papel importante en el mercado ya que es una de las energías renovables con más popularidad debido a que cada vez hay más inversión en esta rama por el enorme recurso solar con el que se cuenta.

Los sistemas Fotovoltaicos de Concentración (CPV) son un tipo de energía solar fotovoltaica apoyada por elementos ópticos y representan una opción a los sistemas utilizados convencionalmente.

La idea principal de la CPV es reducir la cantidad de material semiconductor utilizada en un sistema fotovoltaico ya que este tiene un costo muy elevado. A cambio, se propone utilizar elementos ópticos como lentes o espejos de menor costo, que funcionan mediante la concentración de radiación solar en una zona focal donde se coloca una celda solar de menor tamaño, pero de eficiencia superior a las convencionales esto para poder conseguir la misma producción de electricidad como en un sistema fotovoltaico.

El aprovechamiento obtenido por medio de la aplicación de sistemas fotovoltaicos de concentración, es la baja de costos en el equipo utilizado para la generación de energía al reducir considerablemente el área ocupada por paneles fotovoltaicos y al incrementar la radiación incidente en las placas fotovoltaicas y se tiene como resultado el aumento en la eficiencia del sistema.

## CAPITULO 2. Marco Teórico

La generación de energía por sistemas fotovoltaicos se ha convertido en uno de los principales intereses de investigación mundial. Existen distintas tecnologías de sistemas PV (Photovoltaic, por sus siglas en inglés) de los cuales, los sistemas de concentración fotovoltaica se caracterizan principalmente por utilizar celdas solares con menor material semiconductor que los sistemas convencionales y estos presentan mayores eficiencias de conversión de la energía solar.

En el ámbito de la generación de energía eléctrica por medio de fuentes limpias, en particular la Solar Fotovoltaica de Concentración (CPV, por sus siglas en inglés) en la que las celdas solares juegan un papel importante dentro de los sistemas de generación de electricidad, es importante señalar que el desarrollo de las celdas con mayor eficiencia de conversión de la energía solar a energía eléctrica conlleva a elevar los costos de producción. La tecnología de celdas solares de tercera generación maneja el principio de funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos de concentración, el cual se basa en el uso de sistemas ópticos para aumentar el flujo de fotones que incide sobre las celdas. El principio de estos sistemas es simple, se emplean dispositivos ópticos de tecnología accesible y barata (lentes y espejos) para concentrar la radiación sobre celdas de alta eficiencia que aprovechan la mayor cantidad del espectro radiación solar, con una reducción del área del material semiconductor proporcional al factor de concentración del equipo; aunado a la eficiencia que suele ser del doble que la de la tecnología de primera generación, estos sistemas generan aproximadamente el doble de energía por metro cuadrado de área [González Camarillo, 2018].

Como se mencionó en el párrafo anterior, además de poder agrupar la radiación solar en una zona e incrementar la intensidad incidente en las celdas para generar casi el doble de energía, los sistemas CPV presentan otras ventajas sobre los sistemas PV convencionales, algunas de las principales son la reducción del área de trabajo efectiva para las celdas PV, y brinda la oportunidad de utilizar celdas de menor tamaño. Es debido a esta reducción de tamaño, que es posible utilizar celdas de mayor eficiencia. Además, es viable utilizar sistemas híbridos que aprovechen también el flujo térmico generado, ya que, en comparación a los sistemas PV convencionales, los sistemas solares de concentración generalmente alcanzan mayores temperaturas en los receptores [Angulo Calderón, 2018].

Existen dos variantes dentro de los cuales se identifican los sistemas de concentración solar, los de imagen y los de no imagen. Los concentradores de imagen son ampliamente utilizados para diversas aplicaciones, sin embargo, esta clasificación de los concentradores formadores de imagen no está destinada a producir distribuciones de flujo radiativo uniforme las cuales son ampliamente requeridas en los módulos de celdas de concentración fotovoltaicas. Se ha considerado que los desempeños en las eficiencias de los concentradores fotovoltaicos que incorporan celdas de concentración mejorarán en el momento en que se implementen las distribuciones de flujo uniforme u homogéneas mediante el uso de concentradores de no imagen

(óptica anidólica) por lo que se han desarrollado diferentes estudios y diseños de concentradores de no imagen para producir distribuciones de flujo radiativo homogéneo.

Investigadores de la Universiti Tunku Abdul Rahman desarrollaron un prototipo de un sistema de concentrador fotovoltaico de alta densidad que utiliza como concentrador primario un concentrador de plato parabólico sin imagen y un concentrador secundario como una matriz de concentradores parabólicos compuestos cruzados acoplados a celdas fotovoltaicas multi unión. Las eficiencias promedio de las celdas solares registradas para los módulos básicos en el receptor del sistema fueron de 35% a 36.1% lo que presento una similitud a las pruebas en laboratorio hechas por Spectrolab del 38.5%. La eficiencia del sistema se midió en el rango de entre el 16% y el 17.4% con un DNI que variaba entre 740 y 840 W/m<sup>2</sup>. En el análisis económico se estimó el costo por Watt del prototipo que se ha estimado en un valor de 5.8 USD/W en función del precio por unidad. [Chong, et al., 2017].

El implemento de sistemas ópticos para realizar la concentración de la radiación solar, conlleva a utilizar dispositivos que modifiquen periódicamente la orientación de estos con respecto al sol. El movimiento realizado por dichos dispositivos tiene que ser de forma muy precisa y periódica, esto es necesario para lograr direccionar de forma óptima los rayos del sol hacia un punto en específico a lo largo del tiempo de trabajo. En caso de no lograr una correcta concentración de luz solar el alguno de los elementos PV del sistema, pueden existir pérdidas generadas al no existir uniformidad en estos. Los sistemas de concentración pueden requerir movimientos en uno, o en dos ejes. Es por esto, que demandan de una inversión adicional en comparación a los sistemas estáticos.

Además de la orientación, la temperatura es una variable que juega un importante papel para lograr un óptimo funcionamiento de los sistemas, tanto en los CPV como en los PV convencionales. Buscando solucionar este problema, intercambiadores de calor son utilizados para mantener una temperatura de operación lo suficientemente baja, para no alterar los parámetros eléctricos de los elementos semiconductores de las celdas PV [Angulo Calderón, 2018].

Adicionalmente de buscar disminuir la temperatura en las celdas, se busca que el flujo de calor en estas sea de forma uniforme a lo largo del día. En caso de no cumplirse esta condición, se

puede generar estrés térmico en las celdas debido a las variaciones de temperatura. Así mismo, las variaciones climatológicas alteran de mayor forma a los sistemas de concentración.

La tecnología de los sistemas CPV se puede categorizar según el nivel de intensidad luminosa con concentración solar; el rango al que pertenece el sistema se designa por la capacidad de concentración del sistema. [Mokri & Emziane, 2011].

- Baja Concentración (LCPV): son aquellos sistemas que concentran la radiación solar entre 1 y 40 soles (un sol es la intensidad de radiación solar incidente en un instante dado).
- Media Concentración (MCPV): son aquellos sistemas que concentran entre 40 y 300 soles.
- Alta Concentración (HCPV): con un rango mucho más amplio estos sistemas varían su concentración entre 300 y 2000 soles.

Dentro de los sistemas de media y alta concentración se pueden catalogar en sistemas de foco lineal y sistemas de foco puntual (ver figura 1). Como su nombre lo describe, los sistemas de foco lineal se caracterizan por concentrar la radiación solar a lo largo de una línea. Estos sistemas utilizan receptores lineales, con formas de bandas largas y estrechas o estructuras tubulares. Dentro de estos sistemas, destacan el reflector lineal Fresnel (LFR, por sus siglas en inglés), concentrador de canal parabólico (PTC, por sus siglas en inglés) y sistemas con lentes de Fresnel lineal.

Por otro lado, los sistemas de foco puntual tienen estructuras rotacionales y concentran los rayos solares en un solo punto. El receptor puede ser de forma circular, construido normalmente con una alta densidad de celdas PV agrupadas que forman un semicírculo. Dentro de estos sistemas, predominan el concentrador de disco parabólico, sistemas de torre central y lentes de Fresnel puntuales.

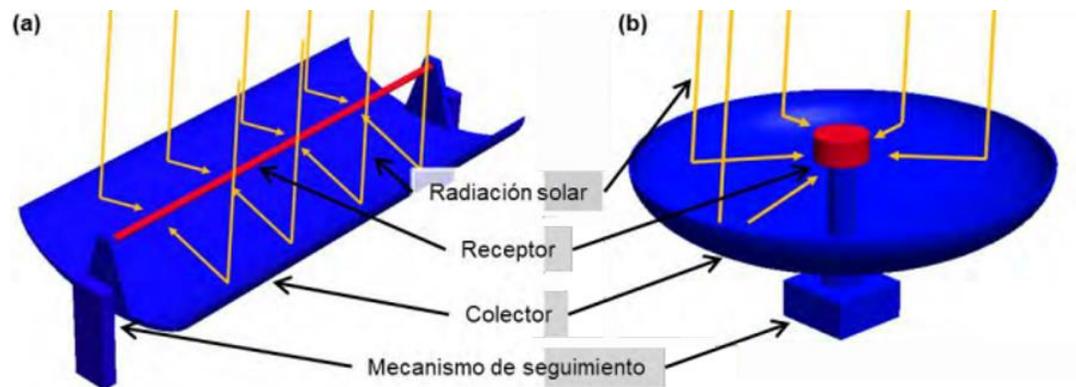


Figura 1. Configuración de los sistemas de concentración. (a) sistema de concentración lineal, (b) sistema de concentración puntual.

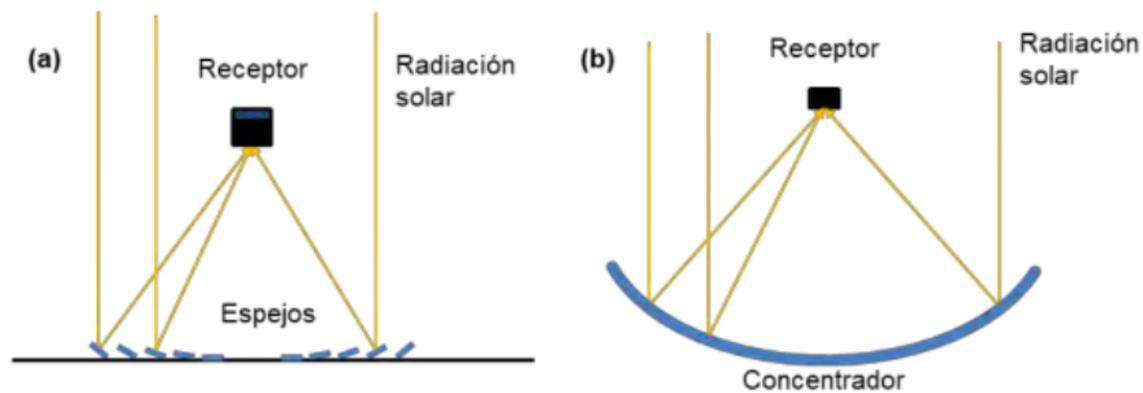


Figura 2 (a) diagrama esquemático de un sistema LFR con receptor orientado hacia abajo, (b) Diagrama esquemático de un PTC.

Los sistemas clásicos de concentración de reflector lineal Fresnel, utilizan arreglos de espejos rectangulares para redirigir los rayos solares hacia un receptor. Este receptor está normalmente ubicado a una altura superior a los espejos, mientras que los espejos se ubican cercanos al suelo, buscando minimizar la estructura del sistema.

Una representación gráfica de un sistema de concentración LFR se muestra en la figura 2 (a), donde podemos apreciar la distribución de espejos en una superficie estable, y como estos redireccionan los rayos solares hacia un receptor. La principal ventaja de estos sistemas es que usan reflectores planos o curvados elásticamente, los cuales son más económicos en comparación con un disco parabólico [Kalogirou, 2004]. Al igual que en la mayoría de los sistemas de concentración, en este sistema también se requiere que el seguimiento solar sea de alta precisión.

Un sistema capaz de calcular la posición solar con una elevada precisión tendrá mayor margen de tolerancia para el resto de errores que pueden surgir dentro de los sistemas de concentración, como lo son errores mecánicos u ópticos.

En los sistemas de CPV que utilizan lentes puntuales de Fresnel, es necesario utilizar un sistema de seguimiento en dos ejes. Como elemento óptico primario, se utilizan lentes de Fresnel fabricadas a base de polímeros, cuarzo o vidrio. Las lentes refractan la luz incidente en la superficie de éstas, dirigiendo la radiación hacia un punto. Sin embargo, pueden existir pérdidas en el sistema, debido a una mala distribución de radiación en el área del receptor. Un segundo elemento óptico, puede ser utilizado para mejorar la uniformidad de la luz concentrada.

En la figura 3 se presenta una estructura típica de un sistema de concentración PV con lentes puntuales de Fresnel, incluyendo los elementos ópticos, la celda PV, el sistema de disipación. Además, en esta misma figura podemos apreciar como los rayos solares son refractados mediante los elementos ópticos hacia el receptor.

A diferencia de los sistemas con lentes de Fresnel lineales, los sistemas puntuales alcanzan una mayor relación de concentración (200 –7000 soles) [Ju et al, 2017]. Algunas simulaciones de estos sistemas han demostrado que es posible alcanzar eficiencias de conversión energética realmente altas. Combinando los sistemas de concentración PV a 1090 soles, con los modelos de transferencia de calor, es posible alcanzar un 28% y 60, de eficiencia eléctrica y térmica respectivamente [Xu et al, 2016].

En Toyohashi e Inuyama, Japón, se llevaron a cabo pruebas de campo de un sistema de concentración fotovoltaica con una lente Fresnel plana con las que se evaluaron el rendimiento del sistema de seguimiento solar y la generación de energía eléctrica. En base a los resultados sobre la alta precisión del sistema de seguimiento solar se instalaron homogeneizadores de vidrio y metal en el módulo fotovoltaico con lo que se pudo alcanzar una eficiencia promedio del 17.6%. (Kemmu, Sakakibara, Hiramatsu, Miyazaki, & Egami, 2003).

Se mencionó que los sistemas de concentración fotovoltaica utilizan sistemas de seguimiento solar para incrementar la eficiencia de conversión energética, en comparación con sistemas convencionales. Dichos sistemas de seguimiento consisten en estructuras mecánicas, sobre los cuales se colocan los sistemas CPV. Para lograr un balance entre costo y eficiencia, el desarrollo de estas estructuras busca la optimización y el balance entre el material, fabricación, instalación, versatilidad, durabilidad, y el medio ambiente.

El principal objetivo de las estructuras, es orientar los sistemas CPV en diferentes posiciones a lo largo del día de trabajo, buscando mantener una posición perpendicular a los rayos del sol e incrementar así el rendimiento energético del sistema.

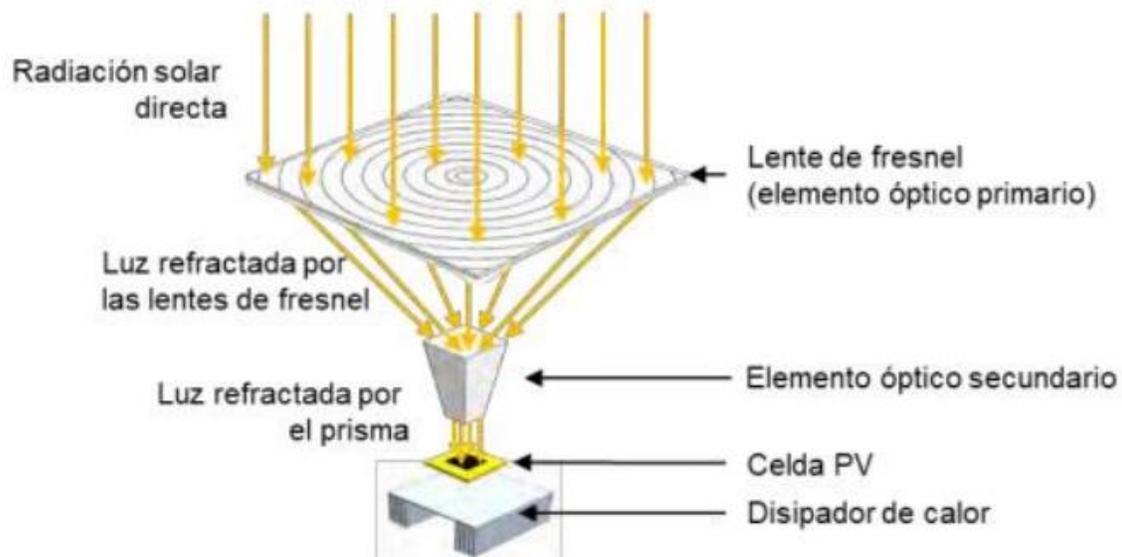


Figura 3. Configuración básica para un concentrador térmico fotovoltaico basado en lentes de Fresnel.

Desde un punto de vista mecánico, los sistemas de seguimiento se pueden clasificar basándose en el número de ejes móviles disponibles. Los sistemas de un solo eje no son capaces de mantener la estructura de forma perpendicular en todo momento durante el tiempo de trabajo. Por otra parte, incrementan la radiación incidente en el receptor, en comparación con sistemas fijos. Estos se pueden orientar horizontalmente, verticalmente o inclinados. Los sistemas con movimiento en dos ejes operan dos grados de libertad para mantener el sistema CPV perpendicular de forma estable durante el día, alcanzando la máxima radiación incidente posible.

Los sistemas CPV se caracterizan por utilizar elementos ópticos para concentrar el flujo de radiación solar en una zona focal, donde se coloca una celda solar PV de alta eficiencia con características diferentes a las convencionales. Distintas configuraciones de lentes, espejos o prismas son utilizadas para modificar la trayectoria de la radiación solar. Dos tipos de concentradores ópticos son los más comúnmente empleados en la conversión de la energía solar. El primero de ellos utiliza espejos, y se basa en el principio de reflexión óptica; mientras que el otro funciona mediante lentes, prismas y elementos que trabajan con el fenómeno de refracción óptica [Ryu K. et al. 2006].

Uno de los elementos más importantes de un sistema de concentración, es la estructura de soporte y seguimiento solar. El material empleado, su estructura, su fácil manufactura y mantenimiento son condiciones de diseño importantes. La sinergia entre estos elementos resulta en una disminución de inversión inicial, costo de fabricación, menor mantenimiento requerido y ahorro durante la operación.

Algunos conceptos expuestos previamente como la concentración solar, el posicionamiento del sol, y el rendimiento de elementos ópticos y fotovoltaicos, son considerados para el diseño mecánico.

Para lograr implementar el seguimiento solar para el concentrador de forma autónoma, es necesario desarrollar un sistema de movimiento de dos ejes. Este movimiento debe ser realizado con precisión y de forma controlado.

Para el desarrollo del sistema de control seguimiento solar de lazo cerrado, es necesario realizar una retroalimentación de la posición angular del módulo mediante un sensor. La ausencia de una señal que otorgue esta información en los motores a pasos, obliga a utilizar interruptores que ayuden en la solución de este problema. En este proyecto se plantea utilizar dos interruptores de límite, que se accionen cuando la estructura se encuentre en la posición de origen. Se sugiere colocar a los sensores en una posición de inicio o final de carrera, con la finalidad de detectar el ángulo de  $0^\circ$  o  $360^\circ$ .

---

## CAPITULO 3. Desarrollo

### 3.1 Principio de operación

El sistema de Fresnel reflectivo de no imagen para la caracterización de celdas de alta eficiencia está compuesto por tres elementos importantes, la óptica el receptor, y mecanismo de seguimiento solar.

La óptica del sistema consiste en superficies reflectivas que modifican la dirección de los rayos solares incidentes (PEO y SEO) enfocándola en un punto (zona focal) donde se encuentra el receptor. El mecanismo de seguimiento es una estructura el tipo altazimutal donde se encuentra montado el sistema FRESNEL y permite realizar el seguimiento de la posición aparente del sol los 365 días del año.

#### 3.1.1 Óptica del Sistema

- Primer Elemento Óptico

El primer elemento óptico del Fresnel es un concentrador Fresnel reflectivo de matriz circular, está compuesto por aproximadamente 1800 espejos de segunda superficie con geometría cuadrada de 5 cm de lado. El nivel de concentración máximo al que opera el equipo es superior a los 1300 soles en un área con distribución de flujo radiativo uniforme de  $25 \text{ cm}^2$  para un receptor que se encuentra a 1.25 m del origen sobre el eje óptico.

- Segundo elemento óptico

El segundo elemento óptico del Fresnel, es un espejo plano de primera superficie con geometría circular y de 75 cm de diámetro, ubicado a 1.5 m del primer elemento óptico. La función de este espejo es redireccionar la radiación del primer elemento óptico y ubicar el foco a un receptor que se encuentra a  $2/3$  de su distancia original. Con el segundo elemento óptico es posible invertir la posición del dispositivo a evaluar e instalar una mayor cantidad de equipos de instrumentación, control y acondicionamiento, para la correcta caracterización de la muestra sin generar sombreado parcial sobre el primer elemento óptico.

#### 3.1.2 Sistema de seguimiento solar

El sistema tipo Fresnel está montado sobre un seguidor solar de dos ejes de movimiento. Consta de actuadores, el primero se refiere a un actuador lineal del fabricante Joyce-Dayton, que permite mover el mecanismo en un ángulo de elevación y el segundo se trata de un motor de corriente directa acoplado a una transmisión “sin-fin corona” (conocida como slew-drive en inglés), que precisa la posición azimutal deseada.

El sistema FRESNEL cuenta con un sistema de control conformado dos gabinetes principales en donde se encuentran configurados los dispositivos electrónicos que permiten la operación

automática o manual de las distintas variantes del sistema. El primer equipo de control consta de un gabinete de la marca FESTO el cual permite operar los actuadores neumáticos para enfocar y desenfocar los anillos del primer elemento óptico, el segundo se trata del sistema de control de seguimiento solar el cual realiza el cálculo de la posición solar mediante algoritmos que envían señales de comando a los actuadores de los ejes de acimut y elevación de la estructura de seguimiento.

### 3.2 Sistema de control SCADA

El proyecto cuenta con un sistema de supervisión y control del funcionamiento, así como puesta en marcha para la adquisición de datos y la aplicación de mejoras en la automatización de los procesos.

Las funciones de operación, control y medición en el Sistema de Evaluación tipo Fresnel reflectivo de no imágenes para generadores eléctricos con concentración solar están integradas en los por 5 sistemas de control, que se presentaran más adelante. La información o datos que se generan en los 5 sistemas retroalimentan a un sistema del otro, por lo que es necesario que se encuentren integrados dentro de una misma plataforma (Labview) como un sistema SCADA.

- Sistema de seguimiento solar (Labview)

La configuración del sistema de control se basa en un controlador principal que realiza el cálculo de la posición solar mediante algoritmos que envían señales de comando a los actuadores de los ejes de acimut y elevación. Se utiliza un dispositivo de visión (WebCam) para llevar a cabo el monitoreo del error de seguimiento a través del análisis de imágenes tomadas de manera continua en la proyección del sistema óptico (Control Lazo Cerrado).

- Sistema de desorientación de espejos individuales (Robotis)

El FRESNEL cuenta con 1800 espejos que redireccionan la radiación solar hacia la cámara porta muestras, de los cuales solo 40 de ellos tienen movimiento independiente, cada uno de estos espejos está montado sobre un servomotor modelo DYNAMIXEL-AX-12a que hace rotar el espejo sobre un solo eje, dejando limitado el movimiento del espejo a dos posiciones de orientación y desorientación.

- Sistema de orientación/desorientación de arreglos de espejos (FESTO)

Los espejos restantes se encuentran distribuidos en 16 semianillos cada uno de ellos acoplados a un actuador lineal neumático en el centro y a un eje de rotación en los extremos. Al accionar el actuador este eleva el semianillo haciéndolo rotar sobre el eje y posicionándolo sobre un plano horizontal común entre todos los arreglos de espejos, en esta posición se focalizan todos los espejos que sostiene este semianillo.

- Sistema de focalización/desfocalización del porta muestra (FESTO)

En el porta muestras se ubican las celdas fotovoltaicas a caracterizar, estas deben ser protegidas de la intemperie y su desempeño es afectado por el incremento de la temperatura, por lo que es

necesario regular el tiempo de exposición durante su caracterización. La cámara porta muestras se monta sobre un actuador lineal eléctrico también llamado mini carro, el cual desplaza la cámara ya sea para ubicarla en el foco del concentrador o para retirarla de este.

- Sistema de adquisición de datos (Labview)

El sistema de adquisición de datos se encarga de procesar y visualizar en tiempo real todos los parámetros de la celda fotovoltaica a evaluar como son corriente, voltaje y temperatura de esta, así como otros parámetros de control tales como la irradiancia solar directa que se obtiene mediante un pirheliómetro, el espectro de radiación en la muestra que se obtiene mediante un espectroradiómetro y cámaras CCD o termográficas que pueden ser agregadas si el experimento lo demanda.

### 3.3 Integración de la primera óptica del Sistema



*Figura 4. Montaje del primer elemento óptico (ensamblaje de espejos con adhesivos en la unión de tuerca y sujeción con el espejo)*

El dispositivo (PEO) concentra la radiación solar mediante la superposición de imágenes reflejadas de los espejos planos cuadrados de 5cm de lado, teniendo una distribución de flujo de radiación uniforme máxima de 25 cm<sup>2</sup>, en el receptor. Para evaluar cualquier dispositivo que requiera una distribución homogénea de flujo radiativo para un óptimo desempeño, el FRESNEL permitirá variar la intensidad de flujo radiativo sin modificar la uniformidad de este al desenfocar uno a uno los elementos que componen su óptica primaria.

Debido a que un experimento de medición de flujos de concentración solar requiere de una inversión considerable tanto en recursos técnicos como en tiempo de implementación, es necesario el realizar previamente un experimento de simulación numérica mediante trazado de rayos, que anticipe de manera cualitativa y cuantitativa los resultados esperados antes de llevar a cabo la confirmación experimental de los mismos.

### 3.4 Caracterización óptica del concentrador

Una superficie reflectante puede presentar desviaciones con respecto a su forma ideal, lo que ocasiona que los rayos de luz incidentes sobre el receptor no se reflejen de la manera correcta a la distancia focal de diseño y de distribuyan de manera uniforme. Sin embargo, estos rayos pueden terminar fuera del área del receptor dependiendo de la magnitud de su error, lo que ocasiona grandes pérdidas de energía en el sistema y modificaciones de la distribución de flujo radiativo.

Para asegurar una eficiencia considerable en el sistema, es necesario ejecutar evaluaciones de las distribuciones de la radiación incidente en el receptor, así como el estudio de la obtención de flujos uniformes a diferentes niveles de concentración solar.

Existen diversos errores que contribuyen de distinta manera a modificar la calidad de concentración en el sistema. En particular, es el error geométrico o de desviación el cual determina en mayor proporción la fracción de los rayos solares incidentes que se enfocan en el receptor.



*Figura 5. Flujo radiativo uniforme consecuente de la superposición de imágenes reflejadas del primer elemento óptico.*

La imperfección en la manufactura de los elementos ópticos es un factor que se debe considerar en el diseño y evaluación de sistemas de concentración. Por lo general, la forma de las superficies

de concentración solar se desvía de las curvas de diseño ideales, lo que provoca errores o desviaciones a la ley de reflexión especular, debido a la rugosidad en superficies que producen dispersión.

El error de canteo, o desviaciones con respecto a las direcciones nominales contribuyen aún más a estos errores. Además de las superficies en sí mismas pueden ajustarse a la ley de reflexión especular, debido a la rugosidad de la superficie producen dispersión de luz [Peña Cruz, 2015].

Por otro lado, la función de cada uno de los espejos planos montados sobre rotulas de precisión es captar la radiación solar incidente sobre el plano de los espejos y proyectarla hacia un punto focal en el área del receptor. Para que esta situación se presente, es necesario que el vector normal al plano del espejo bisecte el ángulo formado entre el vector de incidencia solar ( $\mathcal{R}$  incidente) y el vector de proyección ( $\mathcal{R}$  reflejado), el cual va desde el centro del plano del espejo al punto deseado de incidencia. (ver figura 6)

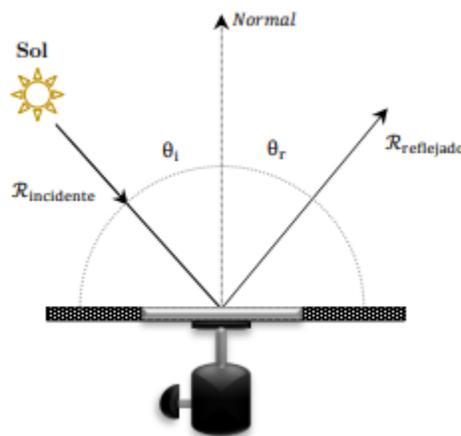


Figura 6. Esquema de método de alineación de espejos del concentrador Fresnel.

### 3.4.1 Metodología de Alineación del concentrador FRESNEL con un Laser Leica

Laser Leica

La palabra láser es un acrónimo de las palabras inglesas: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, es decir, amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación.

Realmente representa el nombre de un dispositivo cuántico, que sirve para generar ondas electromagnéticas de la gama óptica. Tiene un antecedente inmediato en el acrónimo máser, correspondiente a Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, con el que, en 1950, Townes, Gordon y Zeigev designaron el primer oscilador en la gama milimétrica construido por ellos.

El láser proporciona una forma de emisión de radiación luminosa de características especiales. La radiación láser es monocromática (una sola longitud de onda), posee una gran direccionalidad

(escasa divergencia) y puede concentrar un elevado número de fotones en fase en áreas muy pequeñas. Estas características han permitido una gran diversidad de aplicaciones en el campo de la tecnología actual y, en concreto, en la medicina.

Esta metodología de alineación consiste en montar un perfil con una medida equivalente a la distancia que hay desde el centro del porta muestras (eje focal) a el ultimo anillo de soporte de los espejos, de tal manera que se cubra toda la distancia radial de la distribución de los espejos del concentrador.

Este soporte contendrá montado el Laser Leica que, por medio de un péndulo emite un rayo y punto de luz que garantiza que este haz de luz sea perpendicular al plano de cada uno de los espejos. Esto permitirá deducir el rayo incidente y cantar el espejo de tal manera que se direcciona el haz de luz reflejado sobre el receptor en un punto focal dado. Un sistema de movimiento angular con centro en el eje focal permitirá colocar el Laser en cada uno de los espejos distribuidos en los anillos del concentrador.

Mediante este método se obtiene el flujo radiativo uniforme sobre el receptor consecuente de la correcta alineación del primero elemento óptico del sistema.

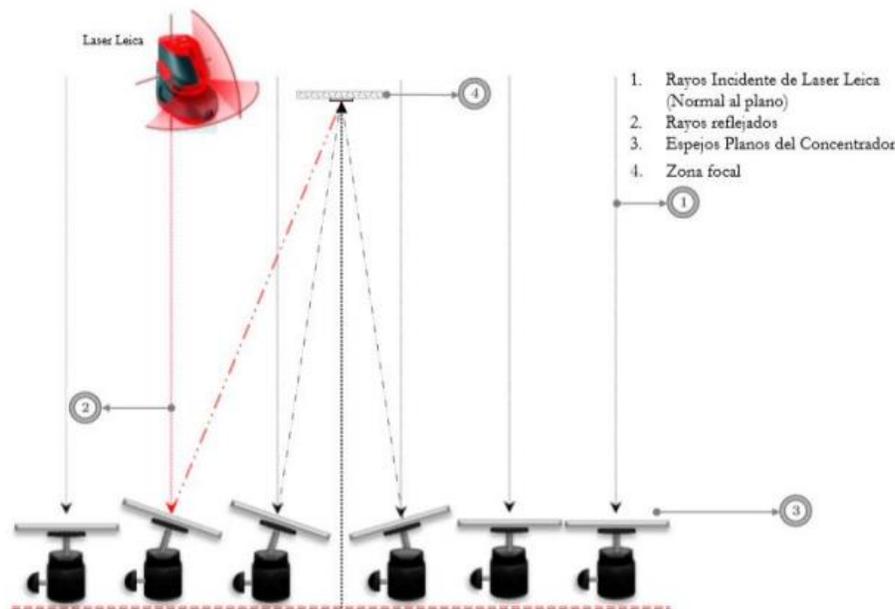


Figura 7. Metodología de alineación de los espejos del concentrador Fresnel.

La implementación de esta metodología de alineación representó un reto debido a una situación puntual que se observó haciendo una primera aproximación del apuntamiento del láser hacia el centro del espejo. La particularidad de este problema recae en que, al desplazar el centro de giro del espejo mediante la rótula de precisión, el vector normal (punto de referencia) que forma el haz del láser se ve desplazado también por este movimiento, lo que implicaría tener un desplazamiento de la proyección del haz de luz sobre el target. Debido a esto se optó por desarrollar una metodología alterna mediante el desarrollo de un colimador de luz puntual.

### 3.4.2 Metodología de alineación mediante Colimador de luz

#### Fuentes de Luz ideales

Existen dos fuentes de luz ideales: el frente de onda plano, y la fuente de luz puntual. Aunque en la realidad es imposible obtener este tipo de fuentes, se han desarrollado elementos que permiten aproximar las fuentes de luz a las fuentes ideales.

Una **fente de luz puntual** se caracteriza por que todos los rayos salen del mismo punto. Para este tipo de fuentes se asume que la densidad de radiación es igual en todas direcciones del espacio, dicho de otro modo, se considera como una onda esférica.

Si se interpone un objeto entre una fuente de luz puntual y una pantalla, este proyectará una sombra, esto debido a que los rayos son divergentes, y la sombra será de mayor tamaño cuanto más cerca se encuentre el objeto de la fuente. (Ver Figura 8)

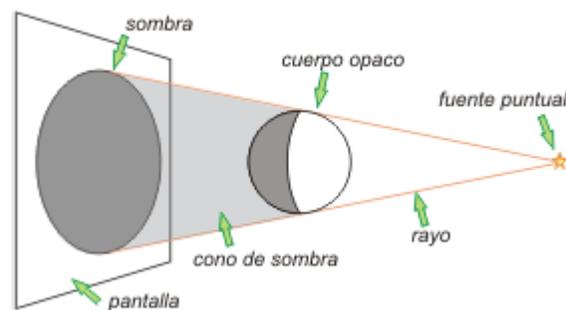


Figura 8 Proyección de la sombra de un objeto iluminado por una fuente puntual.

Los bordes de la sombra son nítidos y bien definidos. En fotografía a las fuentes de luz que proyectan sombras con los bordes definidos se les llama luz dura. Sucede cuando la luz viene de un área pequeña. En este caso un punto. Por ejemplo, la iluminación directa del Sol, o el flash de una cámara fotográfica. Por contra, una luz blanda proyecta sombras con los bordes difuminados o apenas proyecta sombra. Se da cuando la fuente de luz es extensa. Es lo que vemos en un día nublado, o al usar luz indirecta.

A medida que nos alejamos de la fuente esa esfera tendrá un radio mayor y por tanto tendrá que cubrir mayor superficie. Por eso la luz se verá más débil mientras más nos alejamos, en concreto pierde potencia con el cuadrado del radio.

Normalmente en la práctica, si usamos una fuente puntual podemos observar que los bordes se encuentran bien definidos, es decir podríamos asumir que la sombra está enfocada a cualquier distancia. Además, la sombra siempre es mayor que el objeto y su tamaño varía con la distancia entre este y la fuente y finalmente que la potencia de la luz varía con la distancia a la fuente y con el ángulo, efecto de viñeteo.

Una **frente de onda plano** se refiere a una fuente que emite rayos en una única dirección, todos de la misma potencia y todos paralelos entre sí. A este tipo de fuentes de luz paralela se les conoce también como **frente de luz colimada**.

Este tipo de fuentes se caracteriza por tener una densidad de luz uniforme, por lo que al radiar en una única dirección se supone que no existe atenuación con la distancia. En la realidad las fuentes de luz más cercanas a este tipo de fuente son los láser.

Como los rayos no convergen ni divergen, si se coloca un objeto a la mitad del recorrido, la sombra proyectada será del mismo tamaño que el objeto sin importar la distancia a la que este se encuentre de la fuente y por lo tanto también tendrán bordes bien definidos.

Con un haz de luz colimado podemos asumir que los bordes son nítidos y la imagen que se proyecta se encuentra enfocada, la sombra siempre es igual al tamaño del objeto independientemente de la distancia a la fuente o pantalla y por último la potencia de la luz es uniforme en toda la superficie que se ilumina y apenas varía con la distancia a la fuente.

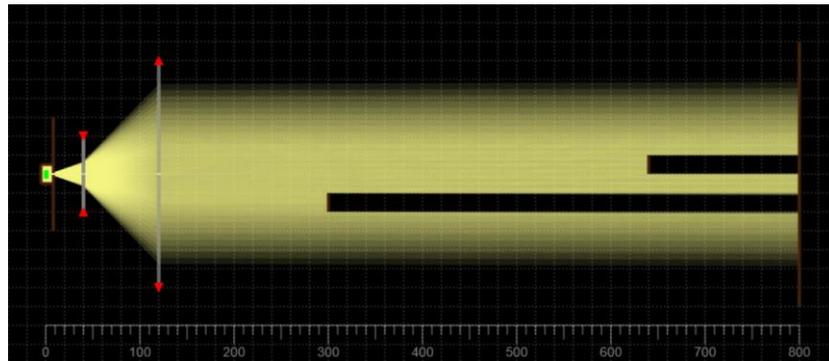


Figura 9. Proyección de la sombra de un objeto iluminado por una fuente colimada.

### Principio de funcionamiento de un colimador

En la realidad, las fuentes de luz no son puntuales, su superficie radiante no es homogénea y poseen un cierto tamaño por lo que se les conoce como **frente de luz extensa**. La fuente de luz extensa no es un punto, es una superficie. Por lo tanto, el resto de los puntos de la superficie radiante están "desenfocados" y eso produce un haz cuyos rayos no son paralelos. La consecuencia es que el haz no enfoca las imágenes y tiende a abrirse con la distancia. El primer paso para colimar una fuente extensa es volverla todo lo puntual que podamos. Eso lo conseguimos interponiendo una superficie con una pequeña apertura llamada **pinhole**. Aquí hay dos variables, el diámetro de la apertura, y la separación a la fuente. Mientras menor el orificio, más puntual será la fuente de luz y mejor el resultado -más coherente-. Pero menos luz dejará pasar, y más se dispersará la que pase.

Se añade un lente biconvexo (un tipo de lente convergente), que sirven para combinar los efectos de los lentes plano-convexos (permiten conseguir ese frente de onda plano que se vería a una distancia infinita, a la salida de su cara plana), en sus dos caras de entrada y salida. Estas permiten

concentrar la energía que reciben de nuevo en el foco de estas en lugar de permitir que se propague como un frente de onda plano. De esta manera, se permite la proyección de imágenes a una distancia finita en pantallas fotosensibles u otros elementos de captación de la energía.

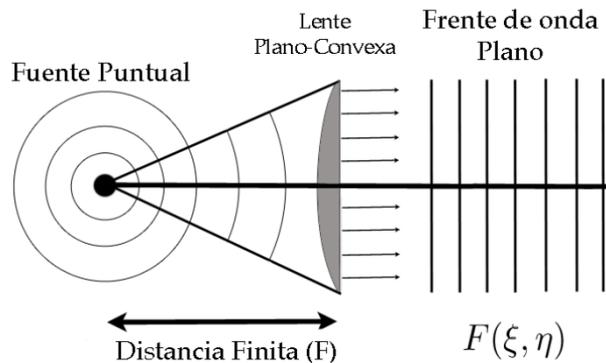


Figura 10. Principio de operación de un colimador de luz a partir de una fuente de luz puntual aproximada.

Se podría decir que la lente biconvexa revierte el efecto de transformación de Fourier de la cara de entrada al atravesar la energía la cara de salida, provocando la proyección de la imagen de la fuente. Es decir, la cara de salida de la lente biconvexa está realizando una transformada de Fourier de nuevo sobre el frente de onda plano que la atraviesa, el cual es consecuencia de la transformación del frente de onda esférico de entrada.

El lente convergente, con la apertura en su foco, sirve para crear un haz de luz paralelo, pasando solo los rayos filtrados. Al colocar el lente, es importante tomar en cuenta el tamaño de la fuente y la distancia focal.

No existen lentes perfectas y dichas imperfecciones tienden a ser más intensas cuanto más se aleje del eje óptico del sistema. Las lentes asféricas (cuya curva no forma parte de una esfera, pero tiene forma similar a una parte de ésta) sirven para reducir en gran cantidad las aberraciones, por lo que no es conveniente aprovechar al máximo los bordes de los lentes utilizados. Es preferible utilizar un diafragma, por lo que el ancho del haz de luz será lo que éste le permita.

Un rayo de luz colimado tiene rayos de luz paralelos extremos. Así, podemos definir la colimación como el proceso de convertir la luz difusa en un haz de luz con un alto número de rayos paralelos. Un rayo de luz colimado es un rayo (normalmente un rayo láser) con una divergencia de rayo bajo, de modo que el radio del rayo no sufre cambios significativos dentro de distancias de propagación moderadas. El objetivo de la colimación es hacer que el eje óptico de cada lente o espejo coincida con el rayo central del sistema, debe crear un punto pequeño y muy visible donde el haz no debe salirse del eje o transformarse en un parche difuso de luz. Estos dispositivos estrechan un haz de luz. El estrechamiento de un haz de luz puede tener dos significados. La primera es organizar el haz de luz en una dirección determinada. La segunda consiste en reducir la sección espacial de un haz para que sea más pequeña.

### Propuesta de metodología alineación de los espejos

Se sugiere como metodología de alineación utilizar un colimador ya que es un instrumento que está diseñado para que los rayos al pasar por un lente sean paralelos, de forma que el radio o área de la fuente de luz no sufre cambios a diferentes distancias de propagación.

El colimador de luz es colocado mediante un perfil de aluminio, que debe tener una medida superior a la distancia que hay desde el centro del sistema hasta el último semicírculo de soporte de espejos, de tal manera que se cubra toda la distancia radial de la distribución del PEO. El ya mencionado perfil, tendrá como base un eje giratorio postrado sobre la estructura más alta del FRESNEL (estructura para sujetar el portamuestras). Esto, con la finalidad de que al accionar la fuente de luz y los rayos pasen a través del colimador, se pueda tener una imagen reflejada con la misma área de los espejos del PEO, y poder situar cada una de las imágenes reflejadas de todos los espejos en un mismo punto. Con la ejecución de esta metodología de debe lograr obtener una caracterización óptima de la óptica del concentrador.

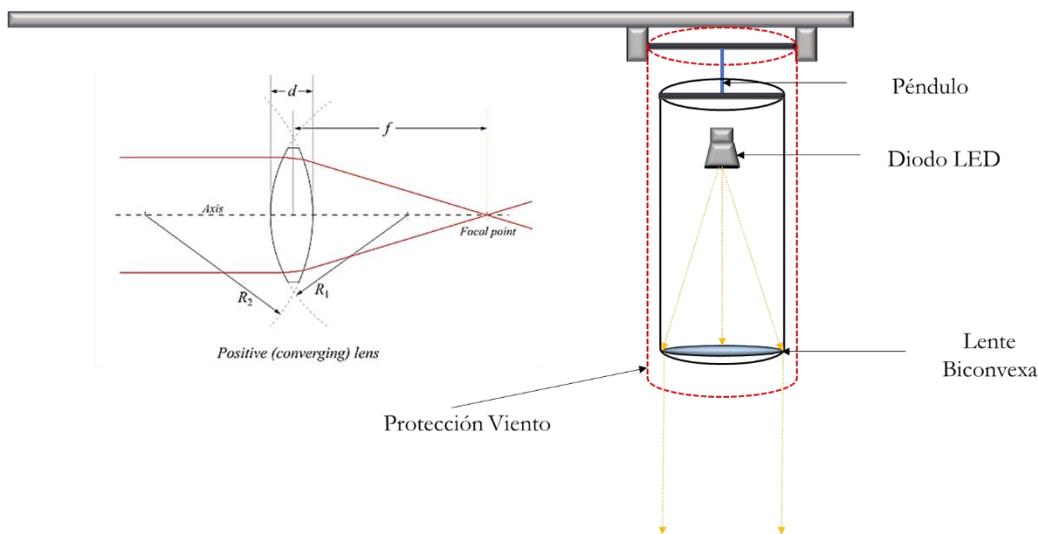


Figura 11. Esquema de principio de colimación mediante lente biconvexa.

### 3.5 Simulación de la óptica del sistema

Debido a que un experimento de medición de flujos de concentración solar requiere de una inversión considerable tanto en recursos técnicos como en tiempo de implementación, es común realizar previamente un experimento de simulación numérica mediante trazado de rayos que anticipe de manera cualitativa y cuantitativa los resultados esperados antes de llevar a cabo la confirmación experimental de los mismos.

Los softwares de trazado de Rayos son una herramienta que permiten predecir de manera aproximada, el comportamiento de un sistema óptico sometido a una radiación con un cierto ángulo de incidencia.

Una de las herramientas de simulación numérica de experimentos de concentración solar más empleadas en la actualidad, y de la que se hace uso en el desarrollo del proyecto, son los softwares SolTrace y Tonatiuh.

La metodología utilizada para realizar el trazado de rayos numérico, el cual requiere de un diseño óptico característico, es desarrollada mediante un análisis gráfico en el cual se representan las superficies de reflexión a las cuales se aplica la ley de reflexión para realizar su diseño óptico.

### 3.5.1 Trazado de rayos SolTrace

Este es una herramienta de software desarrollada en el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) para modelar sistemas de energía solar de concentración (CSP) y analizar su rendimiento óptico. Aunque es ideal para aplicaciones solares, el código también se puede utilizar para modelar y caracterizar muchos sistemas ópticos generales.

El código utiliza la metodología de trazado de rayos Monte-Carlo. El usuario selecciona un número determinado de rayos a trazar. Cada rayo se rastrea a través del sistema mientras encuentra varias interacciones ópticas. Algunas de estas interacciones son de naturaleza probabilística (p. Ej., Selección del ángulo solar a partir de la distribución de la intensidad angular del sol) mientras que otras son deterministas (p. Ej., Cálculo de la intersección del rayo con una superficie descrita analíticamente y la redirección resultante). Debido a que replica las interacciones de fotones reales, el código puede proporcionar r precisión aumenta con el número de rayos trazados, pero un mayor número de rayos significa más tiempo de procesamiento y resultados precisos para sistemas complejos que no se pueden modelar de otra manera.

SolTrace se puede utilizar para modelar colectores cilindro-parabólicos, sistemas de lentes Fresnel lineales, geometrías de torres de energía y sistemas ópticos de enfoque puntual (platos y hornos solares). Muestra datos como diagramas de dispersión y mapas de flujo, y puede guardar datos para procesarlos con otro software. También puede modelar geometrías ópticas como una serie de etapas compuestas por cualquier número de elementos ópticos que poseen atributos que incluyen forma, contorno y calidad óptica. Las etapas pueden ser físicas o virtuales para permitir una contabilidad más sencilla de la energía y el flujo en todo el sistema. Se proporciona un lenguaje de secuencias de comandos para permitir al usuario crear ejecuciones paramétricas y funcionalidad adicional más allá de las capacidades centrales de trazado de rayos.

#### 3.5.1.1 Simulación SolTrace

Para poder iniciar con la simulación en SolTrace como primer paso es necesario crear una hoja de cálculos en Excel con todos los datos necesarios, por ejemplo, en este caso fue necesario el agregar el número de espejos, el diámetro de cada uno de los semicírculos y así como también hacer el cálculo de las coordenadas para los espejos, para este poder agregarlo a la simulación en SolTrace y poder obtener el resultado.

Ya teniendo la hoja de cálculo en Excel, procedemos con agregar dichos datos a la simulación donde empezamos a seleccionar los parámetros de la forma del sol o sun shape. (figura 12)

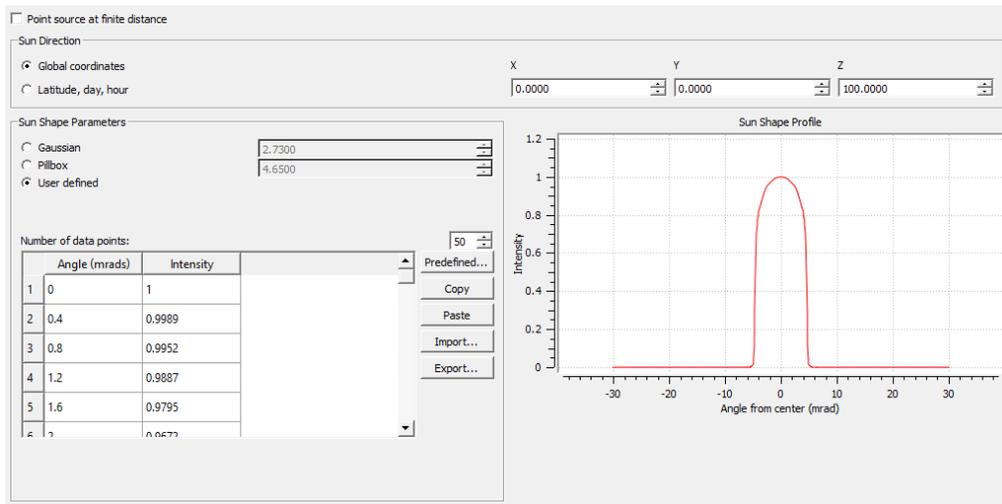


Figura 12. Sun shape simulación soltrace

Ya seleccionado el sun shape, se agregaron las dos ópticas con las que se trabajaría en la simulación, un espejo y el receptor, asignándoles las propiedades necesarias para que funcionaran en el sistema, simulando que fuera ideal con un error de 0 mrad. (figura 13,14)

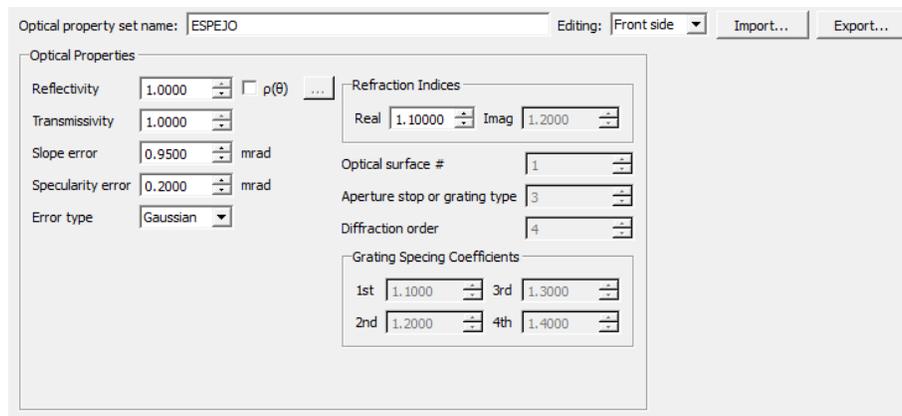


Figura 13. Propiedades ópticas del espejo

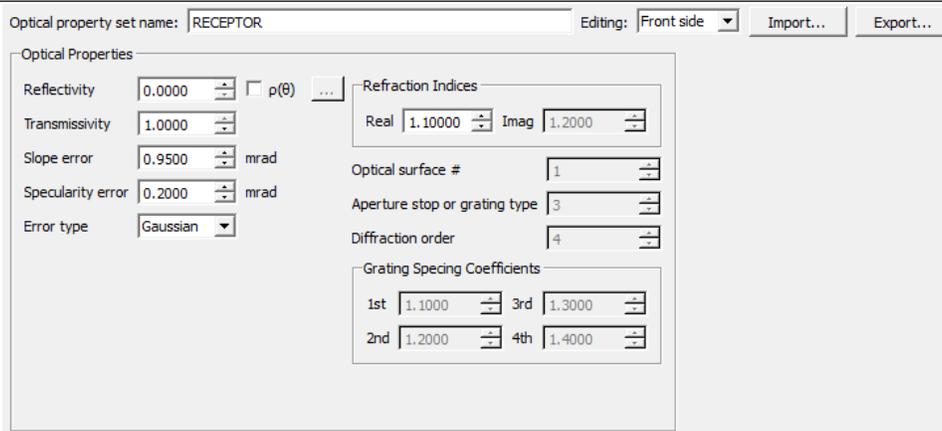


Figura 14. propiedades ópticas del receptor.

Stage Properties		Global Coordinates						Element Editing					
Name: ESPEJOS		X	Y	Z									
<input type="checkbox"/> Virtual stage		Origin	0.000000	0.000000	0.000000								
<input checked="" type="checkbox"/> Multiple hits per ray		Aim point	0.000000	0.000000	1.000000								
<input type="checkbox"/> Trace through		Z rotation	0.000000	deg									
		Clipboard actions:		Copy	Paste								
En.	X-Coord.	Y-Coord.	Z-Coord.	X-AimPt.	Y-AimPt.	Z-AimPt.	Z-Rot.	Aperture	Surface	Interaction			
1	0.597111	0.0588103	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
2	0.588471	0.117054	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
3	0.574164	0.174171	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
4	0.554328	0.22961	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
5	0.529153	0.282838	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
6	0.498882	0.333342	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
7	0.463806	0.380636	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
8	0.424264	0.424264	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
9	0.380636	0.463806	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
10	0.333342	0.498882	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
11	0.282838	0.529153	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
12	0.22961	0.554328	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
13	0.174171	0.574164	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
14	0.117054	0.588471	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
15	0.0588103	0.597111	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		
16	3.67545e-17	0.6	0	0	0	3.11555	0	r-0.05,0.05,0,0,0,0,0	f-0,0,0,0,0,0,0	Reflection	ESPE		

Figura 15. propiedades del apartado espejo para system stage

El tercer paso es System Stage, aquí es donde agregamos todos los datos ya capturados en la hoja de Excel de cada uno de los 1748 espejos, como las coordenadas en X, Y, Z, así como el tipo de apertura, tipo de interacción y óptica. Separándolo en dos secciones, espejo y receptor (figura 15 y 16)

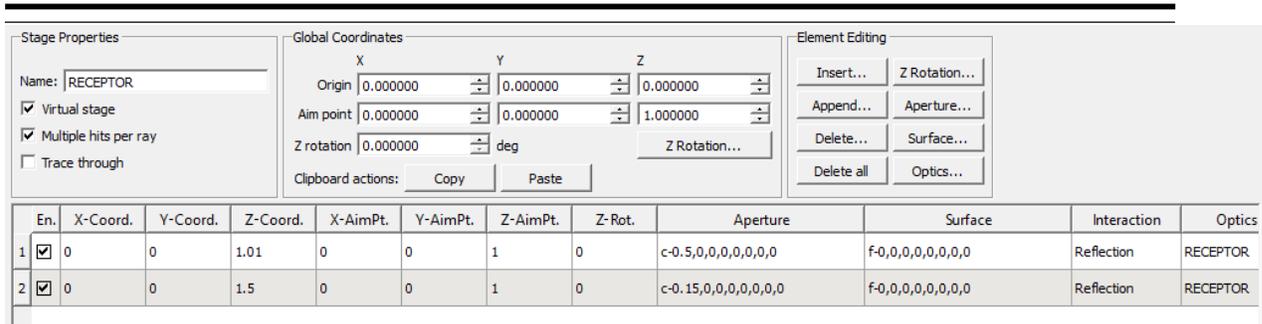


Figura 16. Propiedades del apartado receptor para system stage.

Para finalizar y poder que la simulación comience a dar resultado, es necesario agregar un numero de rayos que serán los que incidirán o intersectaran en la simulación, entre mayor número de rayos será más acertado el resultado, la desventaja es que entre mayor número de rayos más tarda en ser procesado y muchas veces llega a trabar el programa y es necesario volver iniciar, en este caso solo agregamos un pequeño número de rayos solo significativos para ver como reaccionaria la simulación. (figura 17)

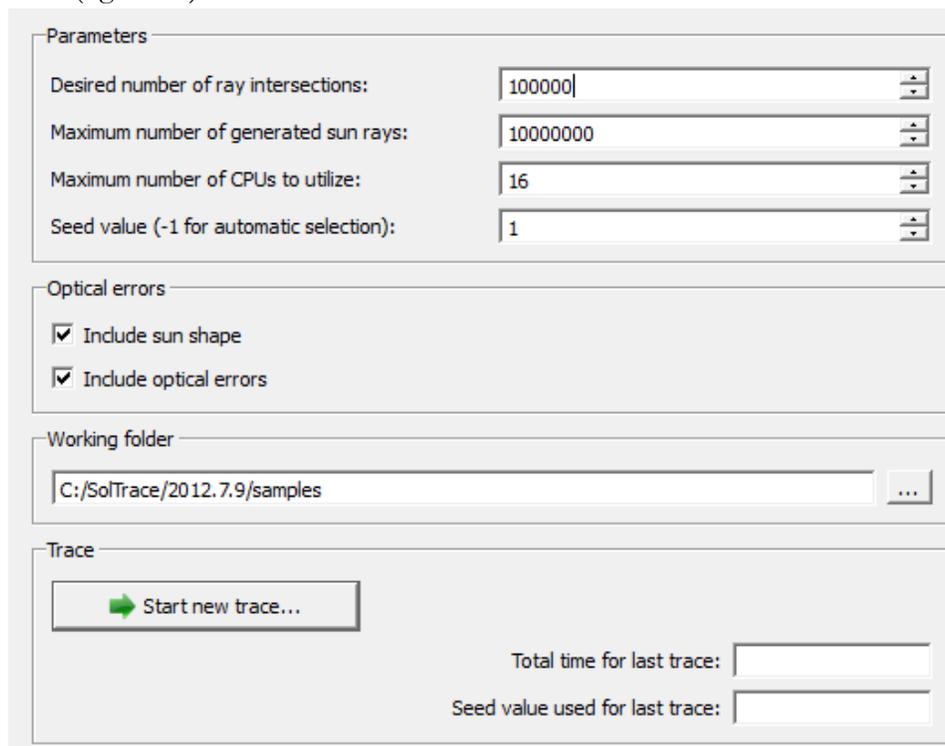


Figura 17. Parámetros para el numero de intersecciones de rayos

Soltrace da dos tipos de resultados, intersection y flux maps, en intersections se muestra un resultado general por surface dando el número de rayos que inciden en cada uno de los espejos, obteniendo también potencia por rayos, numero de rayos graficados, el poder de cada rayo. (figura 18)

En flux maps te da un resultado más extenso como flujo máximo, flujo mínimo, promedio, uniformidad, y centroide. Te da la opción de visualizar tu resultado con el contorno o la

superficie, en este último podrás darte cuenta si tu resultado de flujo de intensidad se muestra como tipo gaussiana ya sea los espejos o del receptor. (figura 19)

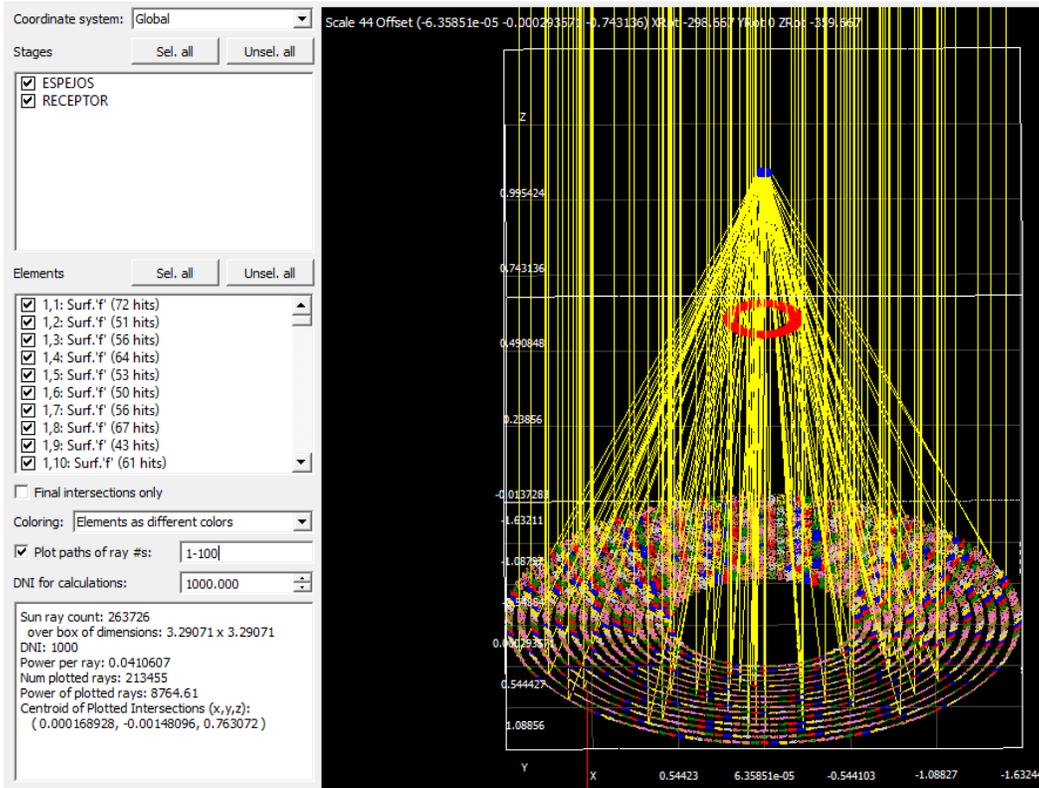


Figura 18. Resultado de intersecciones.

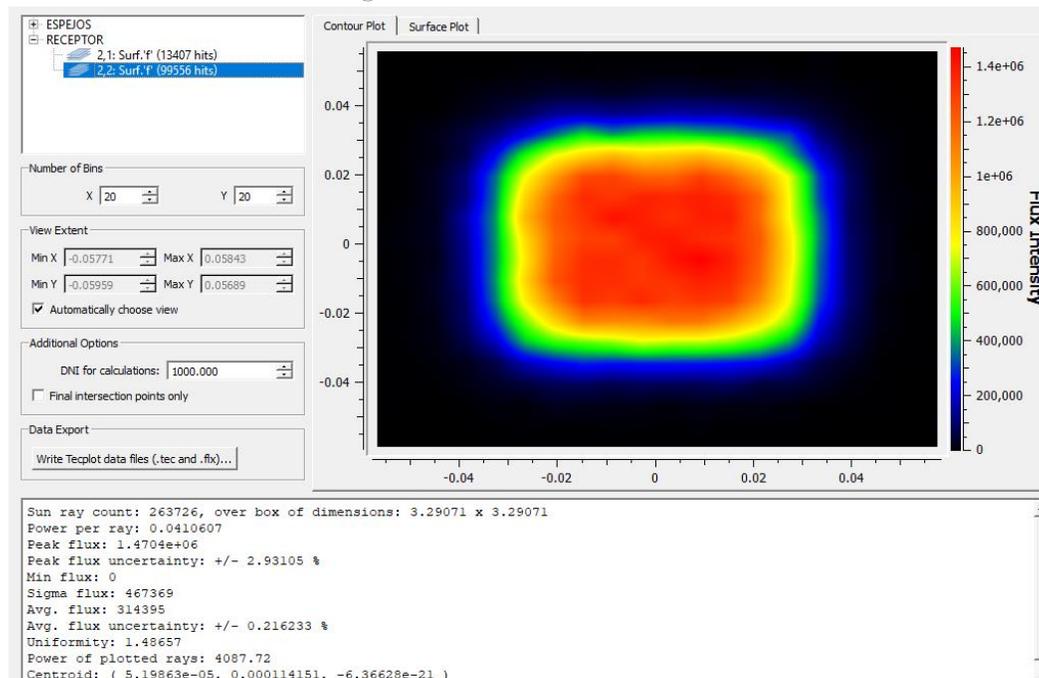


Figura 19. Resultado de flux maps

### 3.5.2 Trazado de rayos Tonatiuh

Tonatiuh es una de las herramientas de software de código abierto (OpenSource) de trazado de rayos, enfocado en sistemas de energía de concentración solar, desarrollado por el departamento de Energía Solar Térmica del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) en conjunto con la Universidad de Texas en Brownsville, el cual utiliza el algoritmo computacional de MonteCarlo para realizar las simulaciones del comportamiento óptico de las superficies de los sistemas de concentración solar cuando se lleva a cabo una interacción con una fuente de rayos de luz simulada.

Tonatiuh es un programa de simulación del comportamiento óptico-energético de sistemas solares de concentración. Tiene la intención de avanzar en el estado de la técnica de las herramientas de simulación para el diseño y análisis de sistemas de concentración solar, y de hacer esas herramientas disponibles gratuitamente para cualquier persona interesada en el uso y la mejora de ellos.

Algunos de los objetivos de diseño más relevantes de Tonatiuh son los siguientes:

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

Dicho software utiliza el algoritmo computacional de Monte Carlo para simular el comportamiento óptico de un sistema solar de concentración, lanzando rayos desde una fuente solar simulada y observando las interacciones entre estos rayos y las superficies del sistema. Como en todos los procesos de simulación que usan éste, la precisión en los resultados obtenidos depende del número de sucesos ensayados. Así, en Tonatiuh, la precisión en los resultados aumenta conforme lo hace el número de rayos que se procesan [López Álvarez, 2016].

#### 3.5.2.1 Simulación Tonatiuh

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

- Distribución energética y la forma solar

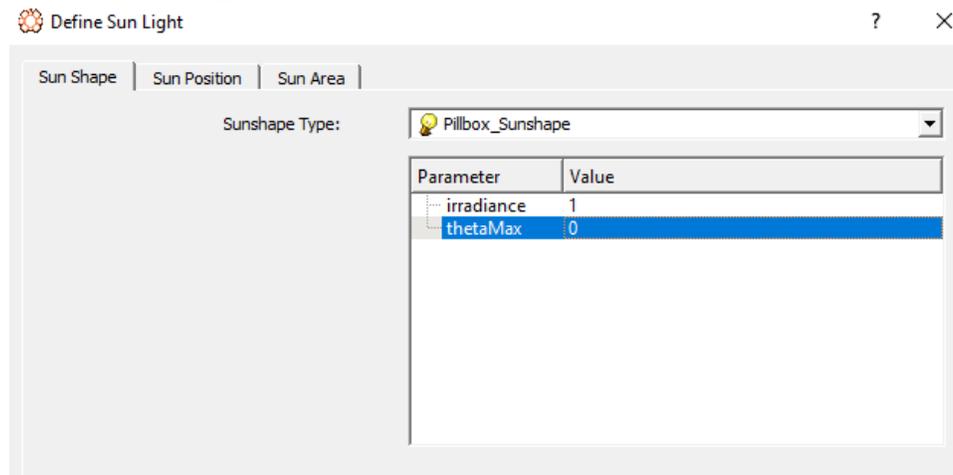


Figura 20. Modelo de formas de sol (Pillbox)

Tonatiuh te permite trabajar con dos modelos de forma del sol (Pillbox y Buie). Para la simulación del proyecto se seleccionó el modelo de Pillbox.

Ya establecido el modelo, se le asigna un valor de irradiancia y de radio angular del disco solar, cuyos valores fueron 1 kW/m<sup>2</sup> y 0 rad respectivamente.

Se le otorga la posición aparente del Sol para el instante concreto en el que se van a realizar los cálculos respecto un observador situado en el centro de coordenadas de referencia

- Geometría

Los componentes que forman el sistema se insertan como nodos, nombrados “rootnode” en Tonatiuh. Cada componente del sistema está asociado a uno diferente, que tendrá unas coordenadas determinadas para situarlo en el espacio. El “rootnode” puede cambiar de nombre una vez creado.

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

Cada nodo tiene una pestaña en la que se deben definir sus características, tales como la posición y rotación del nodo respecto al sistema de referencia, estando la posición en metros y la rotación en radianes.

En función del tipo de geometría escogida, se abre una pestaña en las que meter las características de dicha geometría. Después se debe especificar las características físicas de las superficies que

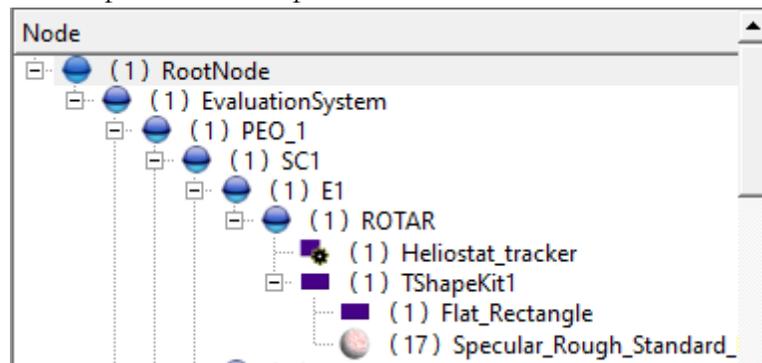


Figura 21. Ventana de códigos del programa (información de los nodos)

componen esta geometría. El software dispone de la opción “Material”, donde se puede seleccionar las funciones para definir las características físicas de las superficies.

Dentro del software se puede encontrar otro tipo de nodo llamado “TrackerNode”, que es un tipo de nodo rastreador, el cual cambia los parámetros de posición de los componentes de acuerdo con un haz de luz de incidencia, cuando la posición de este haz cambia, el trackernode modifica la posición del componente de tal forma que se mantenga la posición de referencia de redireccionamiento del haz. Es utilizado dentro de la modelación para simular el sistema de seguimiento.

Los nodos generados con todas sus propiedades, se pueden observar en una ventana de códigos a la derecha de la pantalla del programa, donde se puede ver toda la información de cada uno de los nodos de la simulación.

Dentro de la simulación creada se generaron nodos para el PEO, con una posición de rotación específica para cada espejo para la formación de los anillos, la posición de traslación asignada sirve para ubicar los espejos en el radio establecido por cada anillo. Se generó un sistema de seguimiento y un punto de enfoque para que el trazado de rayos apuntara al SEO.

Al igual que para el PEO, se generaron nodos para el SEO y el receptor con las características específicas de posición, material y dimensionamiento.

Para el PEO se seleccionó una forma rectangular “Flat\_rectangular”, especificando la base y la altura de cada uno de los espejos (5 cm o 0.005 unidades). En el SEO, al tratarse de una superficie geométrica circular se indicó que su forma sería “Flat\_disk”. Como ambos elementos se tratan de espejos o superficies reflectantes que pueden presentar irregularidades, se indica que el material es “Specular\_Rough\_Standard\_Material”. Se le asignó el valor de 1, considerando un sistema utópico.

- Error óptico

Una cualidad importante Tonatiuh es la posibilidad que tiene de ingresar errores ópticos, a través de una propiedad llamada sigma\_slope. Dicha variable determina la desviación típica estándar,

Parameter	Value
reflectivity	1
sigmaSlope	2
sigmaSpecu...	0
distribution	NORMAL
mAmbient...	0.2 0.2 0.2
mDiffuseCo...	0.80000001 0.80000001 0.80000001
mSpecularC...	0 0 0
mEmissiveC...	0 0 0
mShininess	0.2
mTranspare...	0

Figura 22. Ejemplo de ventana para ingresar los parámetros y valores de cada uno de los nodos (en este caso, características del material del PEO)

como resultado de una suma de diferentes factores que componen el error óptico. En el criterio mencionado no se toma en consideración errores de otra índole, por lo que dentro de los errores ópticos solo se consideran los errores locales como lo son la deformación debida a estructura soporte, desviación respecto a la geometría ideal, ondulación superficial, los errores por falta de especularidad y los de seguimiento.

En la simulación desarrollada para el proyecto se hizo el análisis del funcionamiento del sistema ingresando errores ópticos para hacer una comparación teórica con la eficiencia del sistema de manera ideal.

- Análisis de flujo en el receptor (Surface URL)

La simulación del sistema en el software Tonatiuh se desarrolla, principalmente, para el estudio del análisis de flujo en el receptor, que es el objeto de estudio de este proyecto. Para ello se implementa la simulación con cierto número de rayos que arroja resultados cualitativos tales como la distribución del flujo incidente, potencia total, flujo mínimo, flujo promedio, flujo máximo, coordenadas máximas de flujo, así como el error y la uniformidad del análisis de flujo de la simulación corrida.

Es importante destacar que después de corrida la simulación, si se desea, se puede realizar la interpretación del comportamiento simulado del sistema exportando un “mapa de fotones” para la superficie o superficies que se desean analizar en forma de archivo en código binario o base de datos SQL.

Total Power:	3.49176
Minimum Flux:	0
Average Flux:	349.176
Maximum Flux:	1348.5
Maximum Flux Coordinates:	-0.013 ; 0.009
Error:	0.000914886
Uniformity:	1.27289

Figura 23. Información arrojada por el software tras ejecutar el análisis del flujo.

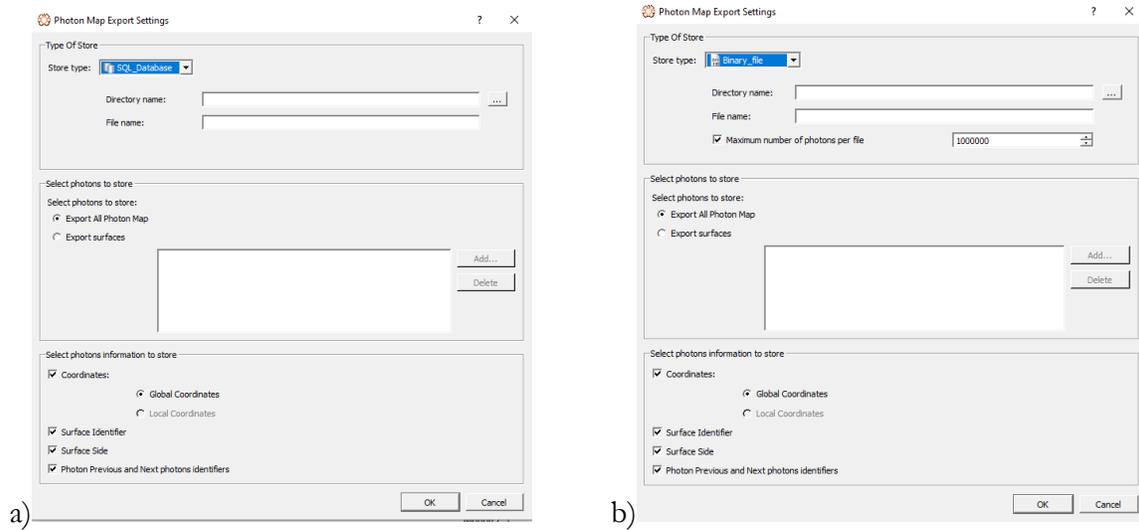


Figura 24. Opciones para la interpretación de la simulación mediante a) base de datos SQL y b) código binario

Una vez guardados los resultados de la simulación, se necesita un programa matemático o haber programado una herramienta externa para analizar el resultado. Se crean archivos .txt y .dat donde aparece toda la información de simulación corrida, y mediante un software externo, se consigue descifrar para su lectura y posterior manejo en operaciones tales como el cálculo de energía o distribución del flujo radiante en una superficie determinada, entre otras.

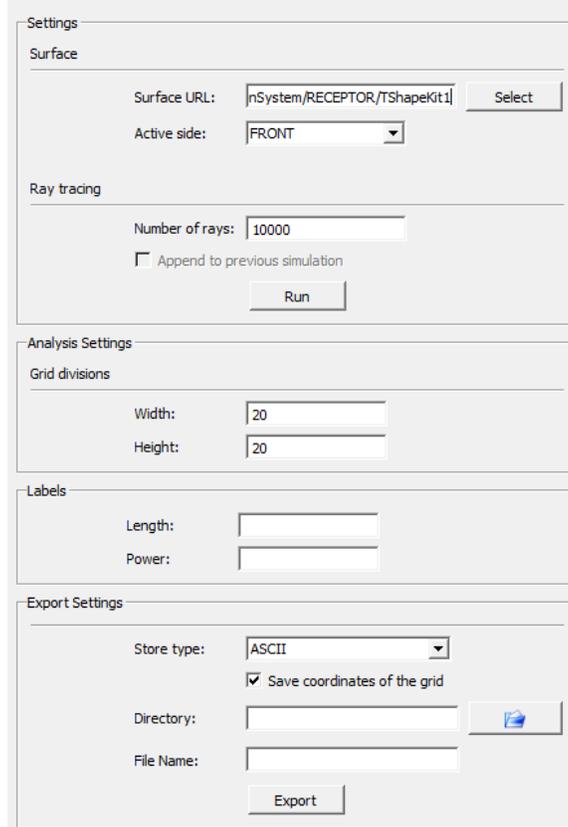


Figura 25. Ventana de configuración para la exportación de los datos resultantes de la simulación

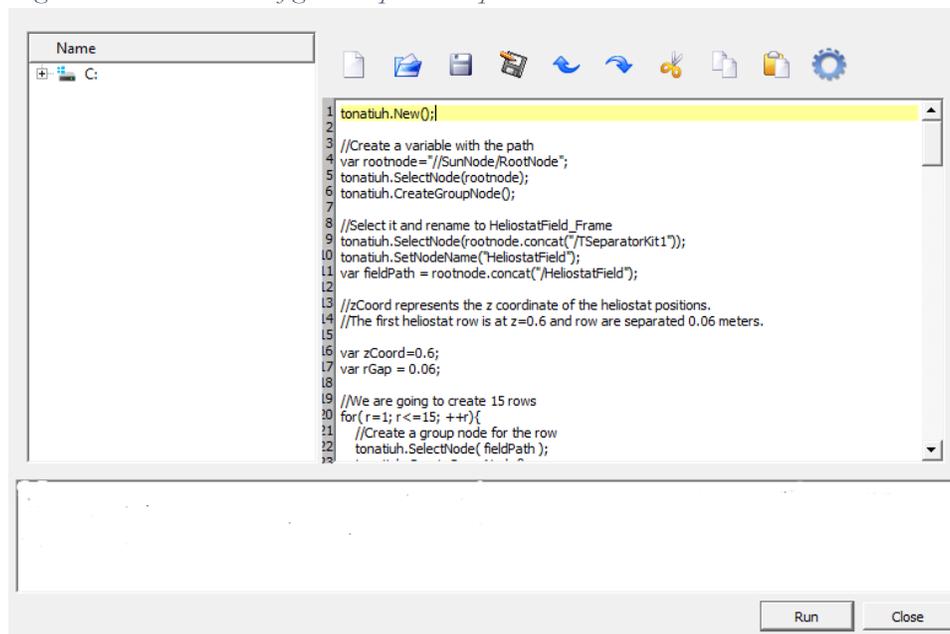


Figura 26. Ventana para crear, ingresar o editar un script. se abre mediante la opción de "automation" en la barra de herramientas.

Otro valioso recurso que proporciona el software Tonatiuh, es que tiene la capacidad de diseñar y ejecutar las simulaciones utilizando el script.

En las figuras 8 y 9 se muestra los resultados teóricos obtenidos a partir de la simulación, en Tonatiuh, considerando que el sistema y sus elementos son utópicos y sin considerar errores en el sistema.

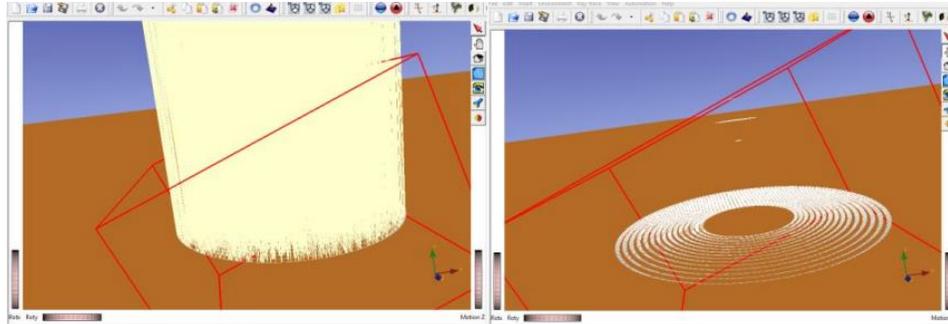


Figura 27. Simulación en Tonatiuh aplicando 1'000,000 rayos.

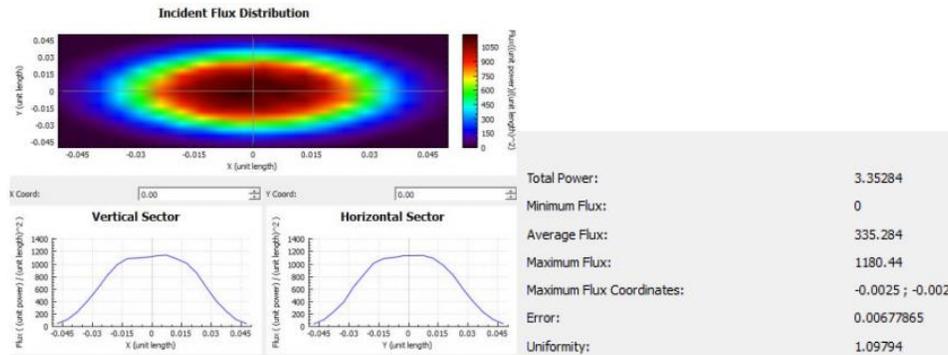


Figura 28. Análisis de flujo de radiación de la simulación en Tonatiuh aplicando 1'000,000 rayos.

### 3.6 Estructuración del Sistema Fresnel

Como se menciona anteriormente, el sistema está diseñado para contar con aproximadamente 1800 espejos de los que consta el primer elemento óptico (PEO) del equipo; los cuales se encuentran dispuestos en 15 arreglos circulares distribuidos físicamente como lo muestra la Tabla 1 y que en conjunto suman un área efectiva de captación de alrededor de 4.3 m<sup>2</sup>.

Tabla 1. Tabla de distribución de espejos.

No. Arreglo Circular	Semi-Círculo Norte	Semi-Círculo Sur	No. Espejos Diseño Original	No. Espejos Prototipo	Diferencia No. De Espejos
0	0	0	40	0	40
1	31	31	64	62	2
2	34	32	72	66	6
3	39	40	80	79	1
4	42	42	84	84	0
5	46	46	92	92	0

6	50	50	100	100	0
7	54	53	108	107	1
8	58	58	116	116	0
9	62	62	124	124	0
10	64	64	132	128	4
11	68	68	140	136	4
12	72	72	148	144	4
13	78	78	156	156	0
14	80	80	164	160	4
15	82	82	168	164	4
Total	860	858	1748	1718	70

### 3.6 Funcionamiento y mecanización de las variantes del sistema en conjunto



Figura 29. Sistema tipo Fresnel de no imagen para la caracterización de celdas solares de alta eficiencia.

Para regular el flujo radiativo que incide sobre la celda fotovoltaica sin comprometer la distribución uniforme de este, el FRESNEL utiliza la atenuación por desenfoque de espejos, mediante la cual la radiación solar incidente en uno o más espejos es reflejada fuera del SOE, por lo que no es redirigida al receptor. El FRESNEL controla la intensidad del flujo radiativo mediante la orientación de sus espejos individualmente para el arreglo 0 y colectivamente para los demás arreglos. La orientación individual de espejos se lleva a cabo mediante 40 servomotores; cada servomotor está acoplado solo a un espejo del arreglo 0 y puede orientarse individualmente o como parte de una subrutina en conjunto con los demás servomotores, esto permite variar la intensidad radiativa reflejada por espejo en un rango de 0 a 40.

Para la orientación colectiva de espejos el FRESNEL divide sus arreglos a la mitad en semianillos y los rota sobre un eje común, Los semianillos se unen al eje mediante dos chumaceras en sus extremos, un actuador lineal ubicado al centro del semianillo y anclado a la estructura del

FRESNEL controla el ángulo de rotación; los espejos montados sobre el plano perpendicular al eje óptico estarán entonces orientados mientras que los arreglos rotados están en posición de atenuación.

El número menor de espejos acoplados a un actuador es de 32 y el mayor es de 166. La combinación de rutinas de control para la orientación individual en conjunto con la colectiva permite variar la intensidad de flujo radiativo de 1-1300 soles.

### Sistema de Porta muestras

Para reducir los efectos de la intemperie y la alta temperatura en las celdas fotovoltaicas durante su caracterización, el FRESNEL cuenta con una cámara porta muestras, en ella se coloca la celda fotovoltaica a evaluar. Tiene la función de proteger la celda de la degradación de sus materiales por la combinación de oxígeno y alta temperatura, manteniéndola aislada del exterior. Para evitar la oxidación de los materiales que componen la celda se extrae el oxígeno mediante la generación de vacío previo al experimento por medio de una bomba y después instalarla de vuelta en el equipo.

La cámara incluye una ventana Kodial que permite la incidencia de la radiación a la muestra, esta ventana es transparente en todas las longitudes de onda del espectro de radiación solar, los pasamuros permiten instrumentar las celdas fotovoltaicas, censar corriente, voltaje y temperatura. La cámara también cuenta con una carcasa cónica de aluminio que sirve de guía para posicionarla en el foco mediante cuatro canales que se acoplan a un anillo central. Así es posible retirarla y volver a colocarla sin perder referencia o que esta se mueva durante la operación del equipo por causas externas.

Para evitar el incremento de temperatura en la muestra que afecta negativamente el desempeño de las celdas fotovoltaicas, así como realizar pruebas de envejecimiento prematuro de los materiales que las componen o encapsulan, el FRESNEL cuenta con un actuador lineal eléctrico que retira a la cámara porta muestras del foco a una velocidad de 1.3 m/s.



Figura 30. Cámara porta muestras y carcasa guía cónica.



*Figura 31. Cámara porta muestras y carcasa guía cónica.*

**CAPITULO 4. Resultados**

**4.1 Modelado y simulación de trazado de rayos**

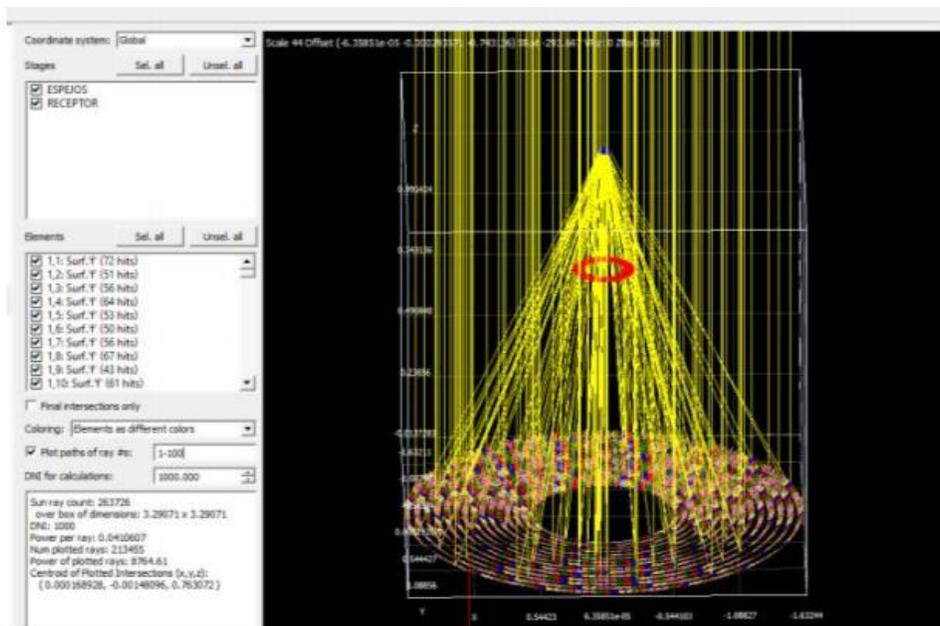
**4.1.1 SolTrace**

Al utilizar este tipo de softwares como herramientas para el modelado y simulación, obtienes muchos beneficios, debido a que el proyecto desarrollado es a grado experimental, el software te permite obtener una imagen ya plasmada del funcionamiento y comportamiento de este, que gracias a esto, a este tipo de simulaciones puedes concluir si tu proyecto está siendo funcional y/o factible, ya que al ser simulado con datos reales llegas a obtener un grado de exactitud muy elevado ya sea ideal o no ideal con un numero de errores que al momento de armado o creación de piezas puede suceder.

El programa SolTrace es de muy fácil manejo ya que trabajas de la mano con la herramienta Excel, que aquí es donde ingresas formulas y todos los datos necesarios para poder realizar correctamente la simulación.

Se realizan simulaciones suponiendo que el proyecto es ideal con cero error óptico, y se hacen simulaciones más apegadas a la realidad, con 1,2 y 3 mrad de error. Estos errores son muy comunes y gracias a estas pruebas puedes obtener el valor de las pérdidas de energía obtenidas por estos pequeños errores de óptica.

En las figuras 32, 33 y 34 se muestra los resultados teóricos obtenidos a partir de la simulación, en SolTrace, considerando que el sistema y sus dispositivos son utópicos.



*Figura 32. simulacion en soltrace aplicando 10,000 rayos, visualizando los rayos del 1-100*

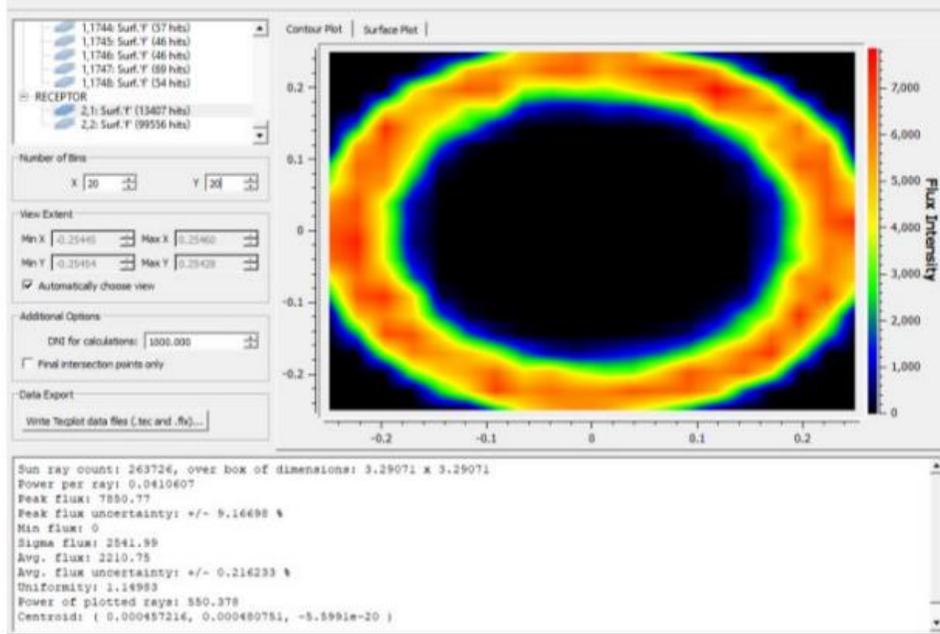


Figura 33. Spot del primer receptor

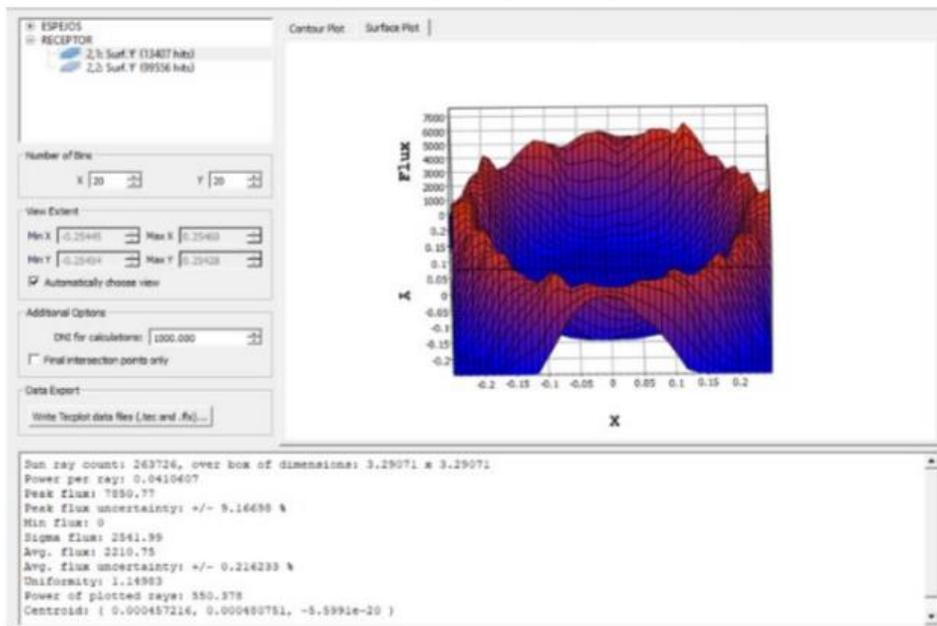


Figura 34. surface del primer receptor, mostrando el total de rayos captados, promedio de energía captada, potencia, etc.

● RESULTADOS CON ERRORES OPTICOS

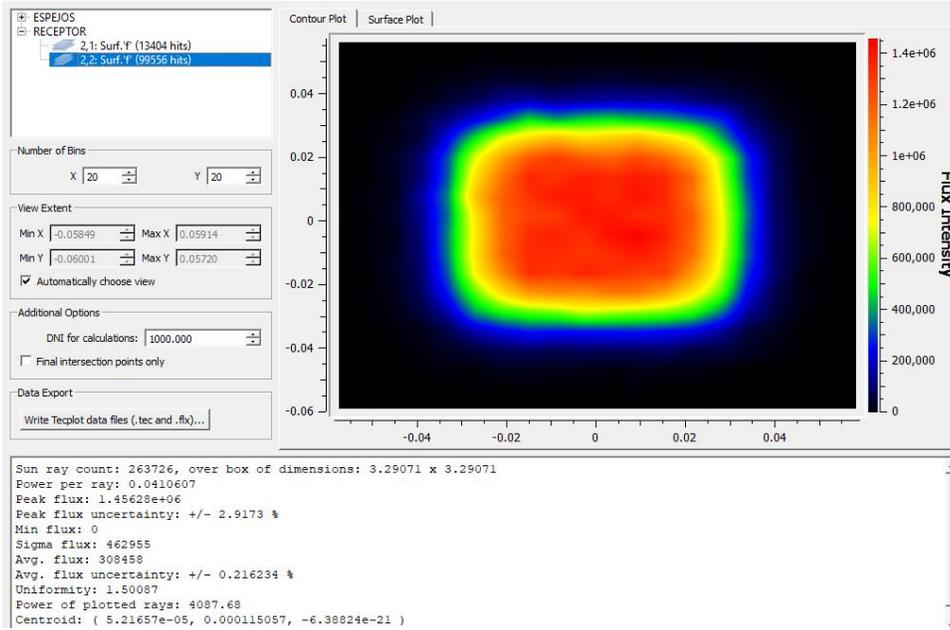


Figura 35. Simulación error óptico de 1 mrad contour plot de receptor

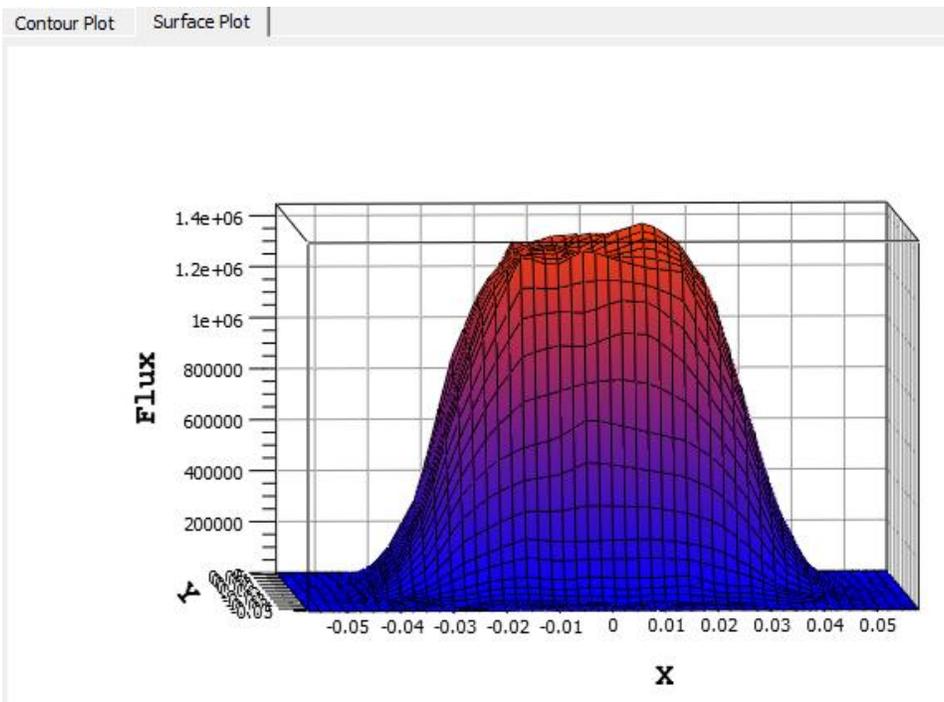


Figura 36. Simulación error óptico de 1 mrad Surface plot de receptor

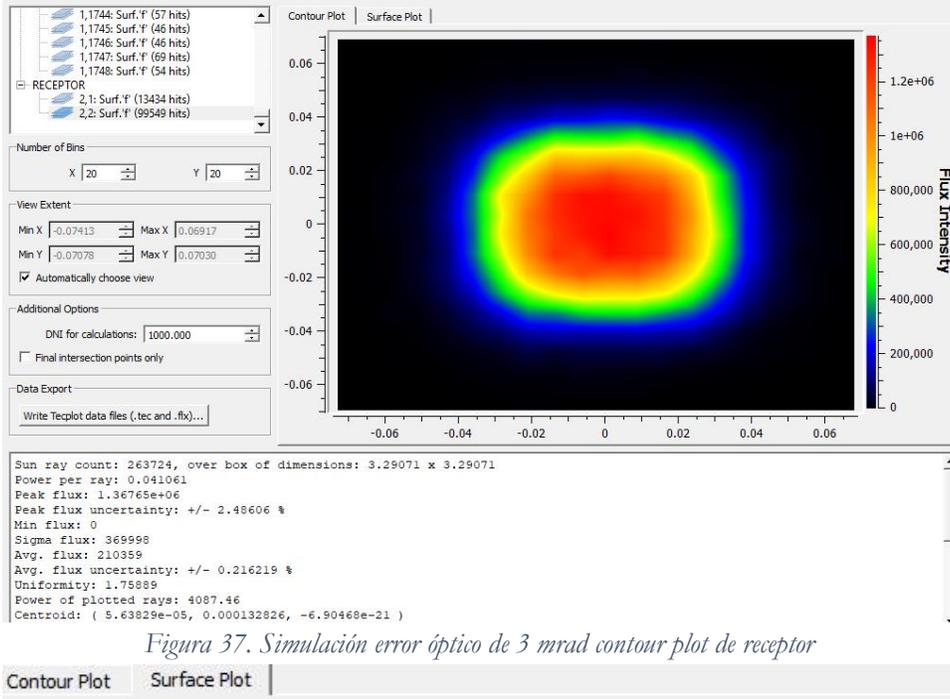


Figura 37. Simulación error óptico de 3 mrad contour plot de receptor

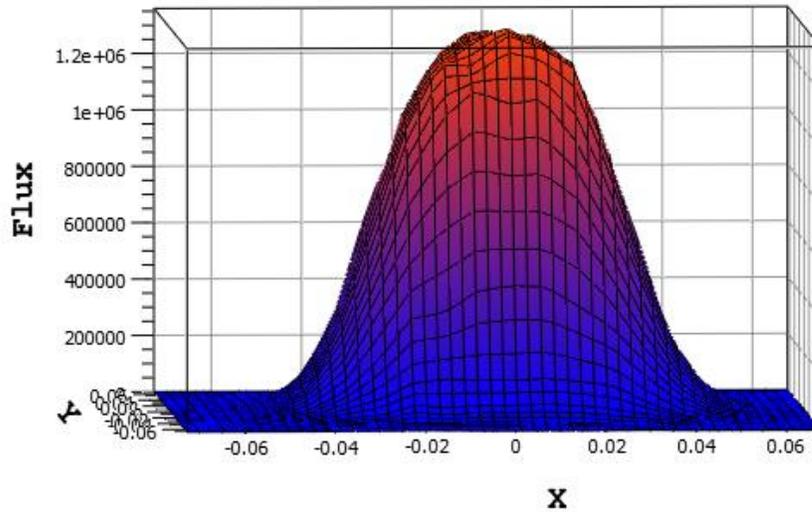


Figura 38. Simulación error óptico de 2 mrad Surface plot de receptor

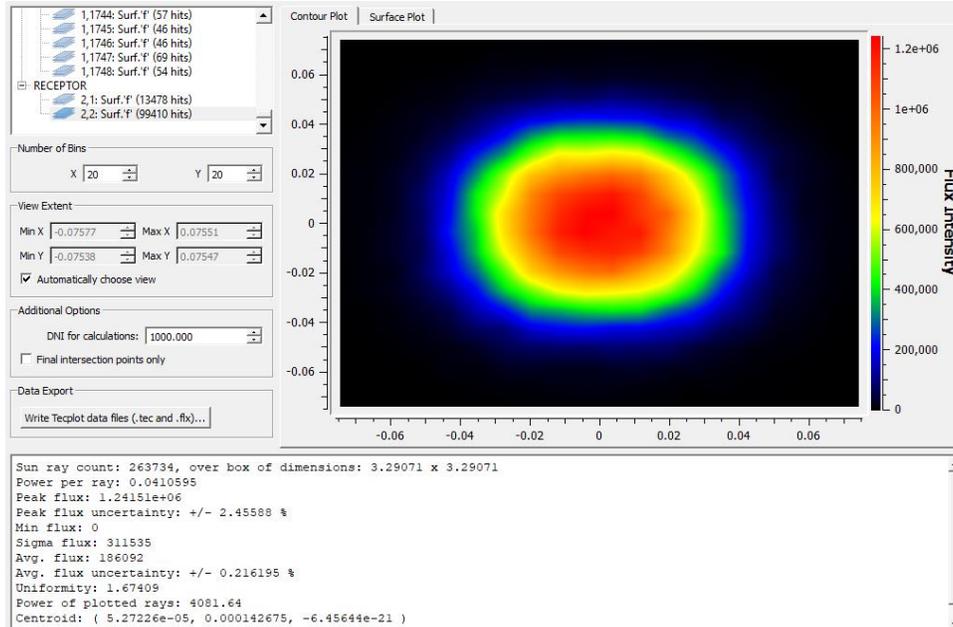


Figura 39. Simulación error óptico de 3 mrad contour plot de receptor

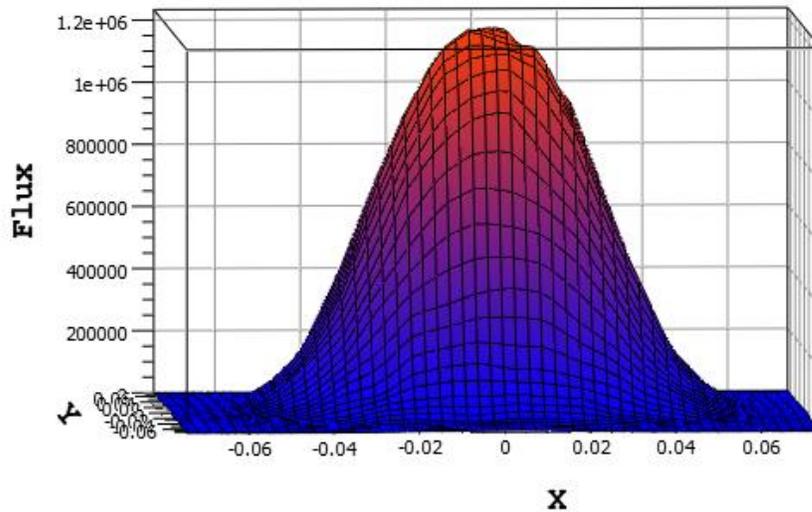
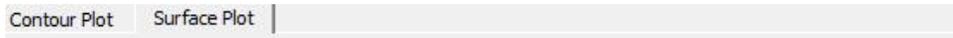


Figura 40. Simulación error óptico 3 mrad Surface plot de receptor

### 4.1.2 Tonatiuh

Las simulaciones virtuales sirven para dar una aproximación o estimación para el estudio del comportamiento de una situación en específico. Se realizan a base de modelos y dependiendo del software y las especificaciones introducidas en la modelación, es el grado de exactitud que se obtendrá.

Tonatiuh provee a los usuarios una herramienta relativamente fácil de implementar y que no requiere una gran inversión de tiempo para la obtención de resultados. Este programa ha servido como rutina de referencia en la estimación teórica del flujo radiante de muchos trabajos de investigación en la actualidad.

Este software nos ayuda a simular el comportamiento óptico de un sistema solar de concentración, lanzando rayos desde una fuente solar simulada y observando las interacciones entre estos rayos y las superficies del sistema.

Específicamente en este proyecto, Tonatiuh contribuyó al desarrollo una base teórica sólida que haga más sencilla la simulación óptica del sistema FRESNEL.

Uno de los beneficios más destacados de las simulaciones en Tonatiuh es que muestra una arquitectura de software limpio y flexible, ya que presenta gráficamente el sistema y de esta forma permita al usuario adaptar, ampliar, aumentar y modificar sus características con facilidad.

La interpretación de los datos arrojados por la simulación, se puede lograr de manera independiente del software, así como generar un código fuente y ejecutarlo en los diversos programas existentes, con ninguna o pequeñas variaciones de su propio código fuente.

A continuación, se muestran figuras, con los resultados obtenidos a través del modelado del sistema cambiando algunas propiedades, para estudiar el comportamiento que el Sistema FRESNEL reflectivo de no imagen tendrá, en el proceso de caracterización de celdas de alta eficiencia. El comportamiento del sistema en el modelado da margen de comparación para verificar que el éste tenga un buen rendimiento.

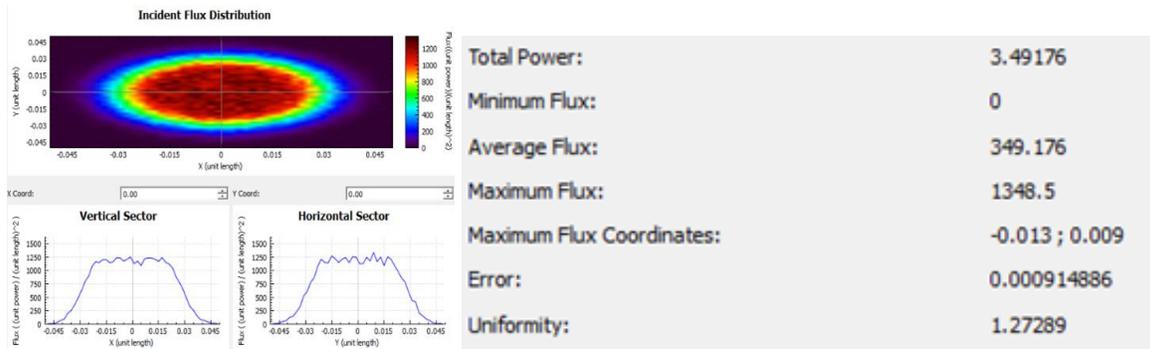


Figura 41. simulación ideal teórica (reflectividad 1, error 0)

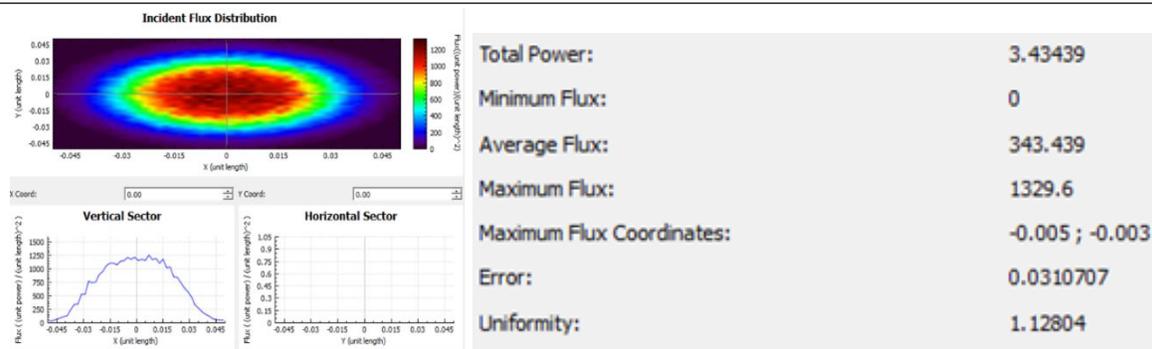


Figura 42. Simulación teórica (reflectividad 1, error 2 mrad)

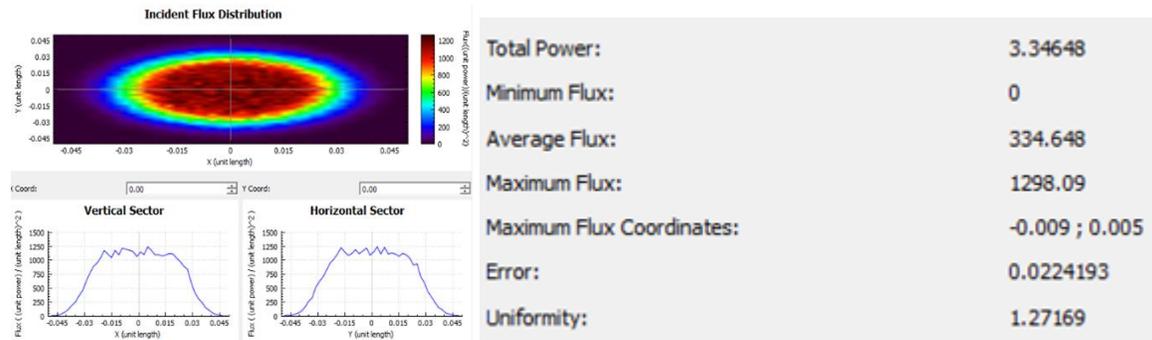


Figura 43. Simulación ideal experimental (reflectividad 1, error 0)

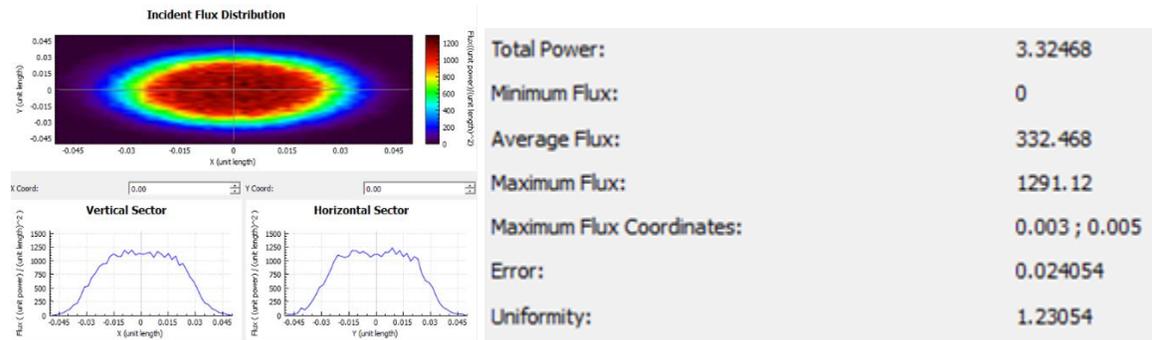


Figura 44. Simulación experimental (reflectividad 1, error 2 mrad)

## 4.2 Pruebas de caracterización en la óptica del concentrador

La metodología de alineación mediante la implementación de un colimador de haz de luz se desarrolló, desde su diseño, fabricación y puesta en operación.

- Diseño y fabricación

El colimador de luz fue pensando y fabricado a base de materiales sencillos y de bajo costo, entre ellos, tubo PVC 40x4", lente biconvexa de 3 pulgadas de diámetro lo que representaría un área de iluminación superior a los 25 cm<sup>2</sup> del área de los espejos, fuente de diodo LED, entre otros



*Figura 45. Pruebas de distancia focal colimador.*

materiales. También se utilizaron herramientas complementarias que ayudaron el sistema a desarrollar la función necesaria, tales como un motor a pasos.

El funcionamiento de esta herramienta está basado en el comportamiento de la propagación de las ondas de luz y los elementos ópticos que componen el sistema de colimación de luz.

A partir de la fuente de luz y un lente biconvexo, se creó el elemento principal de esta metodología de alineación, el colimador de luz. A través de un tubo con terminación en embudo se colocó el lente ya mencionado. Se tomó en consideración la distancia entre el PEO y el lente para obtener la distancia focal (28 cm aproximadamente) y de esta forma conocer de manera aproximada el punto en que se debe posicionar la fuente de luz.

Se situó el colimador en una posición estratégica, mediante un perfil de aluminio, con una medida superior a la distancia que hay desde el centro del sistema hasta el último semicírculo de soporte de espejos, y de esta forma cubrir toda la distancia radial de la distribución del PEO.

Un extremo del perfil se ajustó sobre el centro del sistema, colocado sobre un rodamiento el cual permitiría realizar el movimiento radial del colimador con el objetivo de colocarlo sobre cada uno de los espejos situados sobre los semicírculos en distintas distancias radiales.

La altura dada, tiene la finalidad de que el colimador quede pendiendo del perfil y formar un péndulo para asegurar que el haz de luz colimado llegue de forma normal a los espejos del PEO. Acto seguido de encender la fuente de luz y que los rayos pasen a través del colimador, se debe tener una imagen reflejada con la misma área de dichos espejos, y poder situar cada una de las imágenes reflejadas de todos los espejos en un mismo punto sobre una pantalla ubicada sobre la distancia del segundo elemento óptico (SOE).

Al efectuar la primera prueba, se pudo notar que el viento fue un factor que intervino en el resultado esperado, ya que, a pesar de formar un péndulo con el colimador, el viento hacía inestable el haz de luz colimado por lo que resultó imposible realizar el canteo.



*Figura 46. probando metodología colimador.*

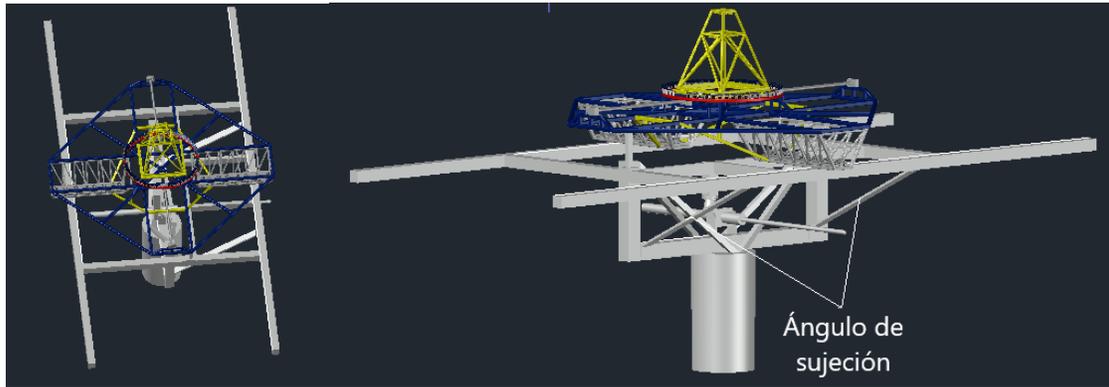
Ante el factor viento, se dio como solución agregarle al colimador un tubo PVC que cubriera en su totalidad la estructura y disminuir la inestabilidad del haz de luz colimado.

Posteriormente, se agregó a esta metodología un motor a pasos de corriente directa controlado por medio de un interfaz de comunicación serial entre PC y Arduino Mega 2560 R3, para tener más exactitud y menos movimiento en el sistema al momento de cambiar la posición del colimador, variando la distancia desde el eje central hasta el semicírculo en el que se estaba trabajando

A pesar de corregir los errores más notables, se ejecutaron varias pruebas de día/noche y la metodología de alineación mediante el colimador de luz seguía siendo inexacta, por lo que se llegó a la conclusión de que factores externos y fuera del alcance de corrección estaban ocasionando la falta de precisión presente. Al tener un frente de onda plano que atraviesa una apertura de longitud cercana a la longitud de onda del frente entrante, provoca a la salida de la apertura un patrón de interferencia o de difracción. Dicho patrón de interferencia puede verse como un nuevo foco, ya que se genera un frente de onda esférico a la salida de la apertura. Es decir, se está provocando a la entrada de la apertura una transformada de Fourier de la energía entrante, la cual se propaga por el sistema óptico y se proyecta en la lente. Esto quiere decir que, los haces de luz colimada tienen tendencia a interferir consigo misma con cualquier obstáculo, por pequeño que sea, originando los fenómenos de difracción, y fue este fenómeno uno de los causantes del fallo de esta metodología.

Otro factor para considerar es la deformación de la estructura. Los semicírculos que sirven como soporte de los espejos del PEO al ser manipulados para su ensamblaje sufrieron deformaciones, y al realizarse las pruebas se percibió que estos semicírculos no tenían el mismo radio en todos los puntos. En consecuencia, el haz de luz colimada no estaba posicionado de igual forma en estos soportes, lo que daba como resultado un canteo deficiente.

### 4.3 Campaña de montaje del concentrador Fresnel en el seguidor solar



*Figura 47. Ángulos de sujeción para el anclaje del fresnel al sistema de seguimiento.*

Debido al gran tamaño y peso que conforma el sistema Fresnel fue necesario realizar el ensamblado de las piezas de manera independiente. Una vez terminado de unir todas las todas las piezas que lo conforman, fue necesaria la ayuda de ocho personas para el manejo y traslado de todo el sistema al seguidor solar y poder fijarlo a él.

Se diseñaron ángulos para que estos sirvieran como soporte para realizar diversas maniobras al sistema sin que este tuviera tanto movimiento y evitar accidentes. Estos ángulos se aprovecharon para fijar el sistema de seguimiento y adaptar e instalar correctamente un nuevo actuador en la estructura, como se menciona más adelante.

### 4.4 Adaptación del actuador lineal en el sistema de seguimiento de elevación del seguidor solar.

Después de ser instalado el sistema Fresnel en el seguidor solar, se realizaron varias pruebas de elevación donde no se detectaron anomalías en el comportamiento del sistema de seguimiento. El actuador lineal anteriormente instalado en el seguidor era para otro sistema, este no tuvo la suficiente potencia y fuerza para poder elevar el sistema Fresnel, por lo cual fue necesario cambiar de actuador lineal a uno con mayor potencia. A su vez, se diseñaron un par de placas nuevas para el ensamble de un seguidor más robusto.



*Figura 48. acoplamiento actuador lineal en seguidor.*

---

## CAPITULO 5. Conclusiones y Recomendaciones

El desarrollo del presente proyecto surge a partir de identificar a la energía solar fotovoltaica de concentración como una muy buena alternativa a los sistemas fotovoltaicos convencionales, ya que tienen una creciente popularidad en el mercado.

A pesar de ya ser muy comunes, los sistemas fotovoltaicos siguen teniendo elevados costos, incluso utilizando tecnología de concentración fotovoltaica y celdas de alta eficiencia, representan una inversión alta, por lo que es importante profundizar más en la investigación de dicha tecnología con el fin de que esta llegue a representar competencia en el mercado actual.

Un aspecto importante en la utilización de tecnología fotovoltaica concentrada, es la implementación de sistemas ópticos de concentración de alta calidad y a un menor precio para lograr satisfacer la demanda energética, al mismo tiempo abaratar los equipos y reducir el área de ocupación de los dispositivos.

En el presente proyecto se desarrolló un sistema tipo Fresnel de no imagen que ayuda a realizar la caracterización de celdas solares de alta eficiencia y de esta forma contribuir al estudio de dichas celdas para analizar su comportamiento con diferentes concentraciones por lo que este sistema propuesto da pauta al avance en investigaciones relacionadas con la tecnología fotovoltaica de concentración.

En México, este tipo de tecnología está en etapa de investigación lo cual no permite poner en funcionamiento plantas de generación a gran escala, por lo tanto, es que se debe poner especial atención a esta problemática implementando sistemas y llevando a cabo investigación pertinente en el ámbito de la energía solar fotovoltaica para alcanzar un estado de desarrollo que permita posicionar a México como un referente en el estudio y desarrollo de sistemas de energía fotovoltaica concentrada.

---

---

---

## **CAPITULO 6. Competencias Desarrolladas y/o Aplicadas**

Durante el periodo de tiempo de la realización de residencia profesional, en la Plataforma solar de Hermosillo, donde se desarrolló el proyecto descrito en el presente informe técnico, se implementaron y pusieron en prácticas diversas competencias necesarias para llevar a cabo las tareas impuestas, a su vez se adquirieron nuevas habilidades.

De dicha estancia se obtuvo aprendizaje y formación profesional para el desarrollo en el campo de trabajo. Lo antes mencionado, no solo abarca aptitudes teóricas, sino también definen el pensamiento estratégico, el carácter, los valores y el manejo adecuado de las situaciones problemáticas que pudiesen presentarse. La combinación de destreza y capacidad en desempeñar una función de forma competente y transversal en el tiempo, son generalmente definidas en el ámbito profesional.

Dentro de las competencias básicas, destaca el compromiso ético, adaptarse a diferentes situaciones, generar nuevas ideas, facultad crítica y autocrítica, así como comunicación eficaz oral y escrita.

Entre las competencias genéricas están la capacidad de gestión, análisis y síntesis de información, habilidad para organizar y planificar actividades, la toma de decisiones para la solución de problemas, la capacidad de trabajar en un equipo interdisciplinar y de forma autónoma, así como ser autodidacta además de tener iniciativa.

Las competencias específicas implementadas son el diseño y gestión de proyectos, fabricación, instalación y montaje de estructuras y equipos mecánicos. Por otro lado, es necesario la realización de cálculos, valoraciones y mediciones técnicas, ajustar proyectos y diseños al marco de especificaciones. También se requiere el aprendizaje de teorías y métodos, así como identificar, clasificar y describir el funcionamiento de sistemas y de componentes mediante el uso de métodos analíticos y de técnicas de modelización. Es preciso aplicar eficientemente los principios matemáticos y científicos, métodos cuantitativos, herramientas como softwares de trazado de rayos y notaciones en el análisis y la resolución de problemas de ingeniería.

Es importante resaltar que la estancia en la PSH, permitió reafirmar los conocimientos adquiridos en la carrera de Ing. En energías renovables de forma gradual, a lo largo del proceso educativo. Como se menciona anteriormente, se desarrollaron nuevas competencias, gracias a las se pudo colaborar en el proyecto con satisfacción.

---

---

---

**Bibliografía y Referencias**

1. Marthoz Angulo Calderon. (2018). DESARROLLO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE CONCENTRACION PARA APLICACIONES DE COGENERACION. Aguascalientes, Aguascalientes, México.: Centro de Investigacion de Optica A.C (CIO).
  2. Héctor Iván González Camarillo. (2018). Estudio de comportamiento de celdas fotovoltaicas de alta eficiencia sometidas a distribuciones de flujos radiativos homogéneos. Temixco, Morelos: Instituto de Energías Renovables (UNAM).
  3. Mokri , A., & Emziane, M. (2011). Concentrator potovoltaic technologies and marjet: a critical review. Wold Renewable Energy Congress. Sweden: Photovoltaic Technology (PV)
  4. Chong, K.-K., Yew, T.-K., Wong, C.-W., Tan, M.-H., Tan, W.-C., Lim, B.-H., & Lai, A.-C. (2017). Prototype of dense-array concentrator photovoltaic system using nonimaging dish concentrators and cross compound parabolic concentrator. *Energy Procedia*, 131-136
  5. Ju X., Xu C., Liao Z., Du X., Wei G., Wang Z., Yang Y. (2017). A review of concentrated photovoltaic-thermal (CPVT) hybrid solar systems with waste heat recovery (WHR). *Science Bulletin*, Volume 62, Issue 20, Pages 1388-1426.
  6. Kalogirou S. (2004). Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 30, Issue 3, Pages 231-295.
  7. Ning Xu N., Ji J, Sun W., Huang W., Li J., Jin Z., (2016). Numerical simulation and experimental validation of a high concentration photovoltaic/thermal module based on pointfocus Fresnel lens, *Applied Energy*, Volume 168, Pages 269-281
  8. Kemmoku, Y., Sakakibara, T., Hiramatsu, M., Miyazaki, Y., & Egami, T. (2003). Field test of a concetrator photovoltaic system with flat Fresnel lens. 3rd World Conference onPhotovoltaic Energy Conversion, 2003.
  9. Ryu K., Rhee J., Park L., Kim J., (2006). Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system, *Solar Energy*, Volume 80, Issue 12, Pages 1580-1587
  10. José Antonio López Álvarez. (2016). Validación de modelos simplificados para el cálculo de distribución de flujo en plantas termosolares de receptor central. Escuela Técnica Superior de Ingeniería - Dep. Ingeniería Energética: Universidad de Sevilla
  11. Manuel Ignacio Peña Cruz. (MAYO 2015). CARACTERIZACION OPTICA DE CONCENTRADORES SOLARES. MEXICO, D.F: UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Energía - Solar fototerminca.
-