

**ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO CONCENTRADOR LINEAL FRESNEL
MEDIANTE SIMULACIÓN DE DESEMPEÑO ÓPTICO PARA LA ELABORACIÓN
DE LA PROPUESTA DE MEJORA**

**DANIEL MORENO VALENCIA
SANTIAGO MORALES ANAYA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
BUCARAMANGA
2022 - I**

**ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO CONCENTRADOR LINEAL FRESNEL
MEDIANTE SIMULACIÓN DE DESEMPEÑO ÓPTICO PARA LA ELABORACIÓN
DE LA PROPUESTA DE MEJORA**

**DANIEL MORENO VALENCIA
SANTIAGO MORALES ANAYA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero en Energía

Director: PhD Yecid Alfonso Muñoz Maldonado

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
BUCARAMANGA
2022 - I**

Nota de aceptación:

Firma del Director

Firma del Calificador

Firma del Calificador

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a mi familia que siempre me dieron la fuerza para hacer este sueño posible, y a los Docentes que siempre dieron todo su esfuerzo para enseñarnos a construir un gran futuro basado en el conocimiento.

Daniel Moreno Valencia

Estoy agradecido con el proceso de aprendizaje tan valioso que me brindaron los Docentes, al director y al co-director por su tiempo y esfuerzo, a mi familia que siempre me acompañó para hacer este sueño posible.

Santiago Morales Anaya

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. RESUMEN..... | 12 |
| 2. INTRODUCCIÓN..... | 14 |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 16 |
| 4. JUSTIFICACIÓN..... | 17 |
| 5. ALCANCES Y LIMITES..... | 18 |
| 6. MARCO REFERENCIAL..... | 19 |
| 6.1. MARCO CONCEPTUAL..... | 19 |
| 6.2. ANTECEDENTES..... | 24 |
| 6.3. MARCO LEGAL..... | 26 |
| 7. OBJETIVOS..... | 29 |
| 7.1. OBJETIVO GENERAL..... | 29 |
| 7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 29 |
| 8. METODOLOGÍA..... | 30 |
| 8.1. FASE 1. CONSOLIDACION DE INFORMACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS..... | 30 |
| 8.2. FASE 2. MODELADO DEL SISTEMA LFC Y DESARROLLO DE SIMULACIONES EN SOLTRACE, TONATIUH Y MATLAB..... | 31 |
| 8.3. FASE 3. ANÁLISIS TRAZADO DE RAYOS DE MONTECARLO Y SU EFICIENCIA ÓPTICA..... | 31 |
| 8.4. FASE 4. PROPUESTA FINAL DE MEJORA DE LA EFICIENCIA OPTICA..... | 32 |
| 9. DESARROLLO DE TRABAJO DE GRADO..... | 34 |
| 9.1. CONDICIONES INICIALES DEL PROTOTIPO LFC..... | 34 |
| 9.2. SELECCIÓN DEL NUEVO SISTEMA DE REFLEXIÓN SECUNDARIO..... | 40 |
| 9.3. SISTEMA DE REFLEXIÓN SECUNDARIO NUEVO..... | 44 |
| 9.4. SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS A VARIAR DEL SISTEMA DE REFLEXIÓN PRIMARIO..... | 47 |
| 9.5. ANÁLISIS DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA..... | 52 |
| 9.6. SIMULACIÓN DEL SISTEMA LFC EN TONATIUH..... | 59 |
| 9.7. SIMULACIÓN SOFTWARE SOLTRACE..... | 72 |
| 10. RESULTADOS..... | 79 |
| 10.1. EJEMPLO DE CÁLCULO EFICIENCIA EN TONATIUH Y SOLTRACE..... | 79 |
| 10.2. RESULTADOS PARA ENCONTRAR EL PUNTO MÁXIMO DE EFICIENCIA..... | 80 |
| 10.3. RESULTADOS DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN CON UNA REFLECTANCIA DE 0.712..... | 81 |
| 10.4. RESULTADOS DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN CON UNA REFLECTANCIA DE 0.92..... | 85 |
| 10.5. COMPARACIÓN POR SOFTWARE DEL SISTEMA INICIAL Y PROPUESTO..... | 88 |
| 10.6. PROPUESTA DE MEJORA GEOMÉTRICA EN EL SISTEMA LINEAL FRESNEL..... | 91 |
| 11. CONCLUSIONES..... | 94 |

12. RECOMENDACIONES95

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Tipos de radiación..... | 19 |
| Figura 2. Metodología de trabajo utilizada. | 33 |
| Figura 3. Esquema Básico Colector Fresnel..... | 34 |
| Figura 4. Elementos del sistema LFC. | 35 |
| Figura 5. Colector Fresnel en condiciones iniciales. | 37 |
| Figura 6. Detalle de dimensiones..... | 39 |
| Figura 7. Sistema reflexión secundario. | 40 |
| Figura 8. Reflector secundario SPSC. | 41 |
| Figura 9. Concentrador de diseño adaptativo (ADC). | 41 |
| Figura 10. Concentrador parabólico compuesto (CPC). | 42 |
| Figura 11. Formas optimizadas de reflector secundario. | 42 |
| Figura 12. Eficiencia óptica en función del ángulo de perfil. | 43 |
| Figura 13. Sección transversal de receptor con cavidad CPC. Modelo Novatec Solar. | 46 |
| Figura 14. Imagen renderizada del reflector secundario. | 46 |
| Figura 15. Imagen renderizada del sistema LFC. | 46 |
| Figura 16. Relación entre la eficacia óptica y la anchura del espejo..... | 48 |
| Figura 17. Eficiencia del LFC variando el ancho de los espejos. | 48 |
| Figura 18. Métodos adoptados en el modelado óptico y térmico de colectores solares LFRs. | 49 |
| Figura 19. El reflector Fresnel lineal examinado. | 52 |
| Figura 20. Ángulo de incidencia transversal y longitudinal para LFC..... | 54 |
| Figura 21. Resultados de la eficiencia óptica simulación en Matlab. | 59 |
| Figura 22. Tipos de nodos en Tonatiuh. Leyes de Caracterización de Colectores Solares tipo Fresnel. | 60 |
| Figura 23. Seguidor solar..... | 61 |
| Figura 24. Selección de la geometría..... | 62 |
| Figura 25. Selección del material. | 62 |
| Figura 26. Selección de la geometría secundaria. | 63 |
| Figura 27. Características del rootnode. | 63 |
| Figura 28. Características del SurfaceNode..... | 64 |
| Figura 29. Selección de material para reflector secundario. | 64 |
| Figura 30. Selección de forma y material para tubo absorbedor..... | 65 |
| Figura 31. Definición de parámetros solares..... | 65 |
| Figura 32. Ubicación geográfica de las UTS. | 66 |
| Figura 33. Opciones del trazador de rayos en Tonatiuh. | 67 |
| Figura 34. Arranque de simulación. | 68 |
| Figura 35. Simulación a las 7:00 am..... | 69 |
| Figura 36. Simulación a las 4 pm..... | 69 |
| Figura 37. Análisis de la simulación. | 70 |
| Figura 38. Obtención del flujo promedio. | 71 |
| Figura 39. Interfaz de ejecución inicial SOLTRACE..... | 72 |

| | |
|--|-----|
| Figura 40. Importación de archivos a SOLTRACE | 73 |
| Figura 41. Función “Geometry” SOLTRACE | 73 |
| Figura 42. Propiedades ópticas..... | 74 |
| Figura 43. Posición solar SOLTRACE. | 75 |
| Figura 44. Elementos a simular..... | 75 |
| Figura 45. Ajuste de parámetros de trazado de rayos y simulación SOLTRACE.. | 76 |
| Figura 46. Trazado de rayos en proceso de simulación SOLTRACE. | 77 |
| Figura 47. Análisis de intensidad de flujo de rayos en SOLTRACE. | 77 |
| Figura 48. Mapa intensidad flujo tubo absorbedor 1 SOLTRACE..... | 78 |
| Figura 49. Eficiencia óptica con largo 1 m constante y variación de los anchos de 0.08 a 0.2 m. | 81 |
| Figura 50. Comportamiento de la eficiencia óptica de Tonatiuh de los escenarios planteados con reflectividad 0.712..... | 82 |
| Figura 51. Comportamiento de la eficiencia óptica de Soltrace de los escenarios planteados con reflectividad 0.712..... | 83 |
| Figura 52. Comportamiento de la eficiencia óptica de Matlab de los escenarios planteados con reflectividad 0.712..... | 83 |
| Figura 53. Simulación Tonatiuh Aumento en la Eficiencia Óptica por el aumento de la Reflectancia de 0,712 a 0,92..... | 86 |
| Figura 54. Simulación Soltrace - Aumento en la Eficiencia Optica por el aumento de la Reflectancia de 0,712 a 0,92..... | 87 |
| Figura 55. Simulación MATLAB - Aumento en la Eficiencia Optica por el aumento de la Reflectancia de 0,712 a 0,92..... | 88 |
| Figura 56. Comparación por Software del Modelo base con condiciones iniciales vs modelo base con Sistema de reflexión Tipo CPC..... | 89 |
| Figura 57. Comparación de la eficiencia del modelo base con el modelo propuesto. | 90 |
| Figura 58. Vista Isométrica del reflector secundario diseñado con el largo de 1.8 m. | 92 |
| Figura 59. Vista Frontal del sistema reflector primario con sus dimensiones mejoradas..... | 92 |
| Figura 60. Vista lateral del sistema reflector primario con sus nuevas dimensiones. | 93 |
| Figura 61. Vista isométrica del sistema de reflexión secundario tipo CPC. | 102 |
| Figura 62. Implosión del sistema de reflexión secundario tipo CPC. | 103 |
| Figura 63. Tapa Superior del sistema de reflexión secundario tipo CPC. | 104 |
| Figura 64. Lamina de vidrio del sistema de reflexión secundario tipo CPC. | 105 |
| Figura 65. Tubería del sistema de reflexión secundario tipo CPC. | 106 |
| Figura 66. Dimensiones del sistema reflector primario. | 107 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1 . Tecnología de captación solar térmica..... | 20 |
| Tabla 2 . Elementos y Descripción CFL. | 35 |
| Tabla 2 . Elementos y Descripción CFL. (Continuación)..... | 36 |
| Tabla 3 . Parámetros iniciales del sistema de reflexión primario. | 38 |
| Tabla 4 . Características ópticas del componente reflector | 38 |
| Tabla 5 . Parámetros iniciales del sistema de reflexión secundario..... | 39 |
| Tabla 6 . Propiedades de los materiales seleccionados. | 45 |
| Tabla 7 . Escenario de simulación con reflectancia 0.712. | 51 |
| Tabla 8 . Escenario de simulación con reflectancia 0.92. | 51 |
| Tabla 9 . Parámetros de entrada simulación de MATLAB. | 58 |
| Tabla 10 . Datos de posición del sol. | 66 |
| Tabla 11 . Simulación Tonatiuh para un ancho de 0.1 metros y largo 1 metro con reflectancia de 0.712. Parte 1 | 79 |
| Tabla 12 . Simulación Tonatiuh para un ancho de 0.1 metros y largo 1 metro con reflectancia de 0.712. Parte 2 | 80 |
| Tabla 13 . Resultados del escenario de simulación con reflectancia de 0.712. | 81 |
| Tabla 14 . Resultados del escenario de simulación con reflectancia de 0.712. | 85 |
| Tabla 15 . Comparación de diferentes modelo analizados. | 89 |
| Tabla 16 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1 m y reflectancia 0.712..... | 108 |
| Tabla 17 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1 m y reflectancia 0.92..... | 109 |
| Tabla 18 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.712..... | 110 |
| Tabla 19 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.92..... | 111 |
| Tabla 20 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.712..... | 112 |
| Tabla 21 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.92..... | 113 |
| Tabla 22 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1 m y reflectancia 0.712..... | 114 |
| Tabla 23 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1 m y reflectancia 0.92..... | 115 |
| Tabla 24 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.712..... | 116 |
| Tabla 25 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.92..... | 117 |
| Tabla 26 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.92..... | 118 |
| Tabla 27 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.712..... | 119 |

Tabla 28 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1 m y reflectancia 0.712..... 120

Tabla 29 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1 m y reflectancia 0.92..... 121

Tabla 30 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.712..... 122

Tabla 31 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.92..... 123

Tabla 32 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.712..... 124

Tabla 33 . Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.92..... 125

LISTA DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| Anexo A. Código de la simulación de MATLAB. | 101 |
| Anexo B. Planos del diseño geométrico final propuesto. | 102 |
| Anexo C. Flujo promedio de las simulaciones en TONATIUH, SOLTRACE Y MATLAB. | 108 |

1. RESUMEN

En el trabajo presente se desarrolló una propuesta de mejora geométrica para el prototipo Concentrador Lineal Fresnel (LFC) el cual fue desarrollado por el grupo de investigación GISEAC de las Unidades Tecnológicas de Santander con el fin de aumentar su eficiencia óptica. Este modelo propuesto es el resultado de un análisis óptico basado en una simulación numérica en MATLAB y en el método MCRT, por medio de la aplicación de softwares como Sol trace y Tonatiuh, que utiliza una combinación de trazado de rayos y técnica de Monte Carlo. En estos softwares se evaluó la influencia de la variación de parámetros geométricos y ópticos del sistema reflector primario y secundario en la energía solar captada en el receptor y en su eficiencia óptica. Para mejorar su eficiencia óptica, se seleccionó primero un diseño de un sistema de reflexión secundario mediante el concepto de tecnología apropiada, tomando como referencia la geometría y materiales de un prototipo CPC con el fin de reemplazarlo por el modelo trapezoidal del modelo base inicial. El modelo, corresponde a una geometría tipo CPC y es validado mediante pruebas simuladas por el software Tonatiuh, Soltrace y Matlab comparado con el modelo inicial aumenta un 24% al 25% según los resultados de Soltrace y Tonatiuh. Segundo se propuso un cambio en el sistema reflector primario variando el ancho, longitud y separación entre espejos, se evalúan distintas alternativas de variaciones de la longitud del espejo entre 1 metro y 1.8 metros y para el ancho del espejo entre 0.08 metros y 0.12 metros. También se simuló con las mismas condiciones anteriores pero esta vez variando la reflectancia de 0.712 a 0.92 con un vidrio blanco de alta transparencia con un grosor de 4mm. Como resultado, se escogió un modelo conformado por el concentrador de reflexión secundario tipo CPC y se aumentó el ancho de los espejos a 0.12 metros y 1.8 de longitud con una reflectancia de 0.92 y un grosor de 4mm, mejorando la eficiencia óptica un 49% según Soltrace, 48% según Tonatiuh y un 37% según Matlab con respecto al modelo base.

Palabras Claves: Análisis Óptico, SolTrace, Tonatiuh, Sistema de reflexión secundario, reflectancia.

ABSTRACT

In the present work, a geometrical improvement proposal was developed for the Linear Fresnel Concentrator (LFC) prototype, which was developed by the GISEAC research group of the Technological Units of Santander in order to increase its optical efficiency. This proposed model is the result of an optical analysis based on a numerical simulation in MATLAB and the MCRT method, through the application of software such as Sol trace and Tonatiuh, which uses a combination of ray tracing and Monte Carlo technique. The influence of the variation of geometrical and optical parameters of the primary and secondary reflector system on the solar energy captured in the receiver and on its optical efficiency was evaluated in these softwares. To improve its optical efficiency, a secondary reflector system design was first selected using the appropriate technology concept, taking as a reference the geometry and materials of a CPC prototype in order to replace it with the trapezoidal model of the initial base model. The model corresponds to a CPC type geometry and is validated by simulated tests by Tonatiuh, Soltrace and Matlab software compared to the initial model increases 24% to 25% according to the results of Soltrace and Tonatiuh. Secondly, a change in the primary reflector system was proposed by varying the width, length and separation between mirrors, different alternatives are evaluated for mirror length variations between 1 meter and 1.8 meters and for mirror width between 0.08 meters and 0.12 meters. It was also simulated with the same conditions as above but this time varying the reflectance from 0.712 to 0.92 with a high transparency white glass with a thickness of 4mm. As a result, a model consisting of the CPC type secondary reflection concentrator was chosen and the width of the mirrors was increased to 0.12 meters and 1.8 meters in length with a reflectance of 0.92 and a thickness of 4mm, improving the optical efficiency by 49% according to Soltrace, 48% according to Tonatiuh and 37% according to Matlab with respect to the base model.

Keywords: Optical analysis, SolTrace, Tonatiuh, Secondary reflection system, reflectance.

2. INTRODUCCIÓN

La cuestión energética se considera hoy uno de los retos más difíciles del mundo. En efecto, el agotamiento de los recursos energéticos convencionales, contaminantes y no renovables (petróleo, carbón, gas natural, etc.), asociado a un tremendo crecimiento del consumo energético a escala mundial, está conduciendo, de muy diversas maneras, a una situación insostenible, es decir, a un crecimiento peligroso e incontrolable de los desequilibrios de los ecosistemas. Las Energías Renovables aparecen como una opción alternativa real, ya que son inagotables en nuestra escala de tiempo, no contaminantes y se distribuyen de forma natural por todo el mundo. Entre todas las energías renovables, la Energía Solar aparece como una de las posibilidades más interesantes debido a su gran potencial y versatilidad, que se refleja en un gran abanico de posibles aplicaciones: agua caliente sanitaria, calor de proceso industrial, desalinización, refrigeración solar, producción de electricidad térmica y fotovoltaica, etc. [1]

Una de las tecnologías que está teniendo más importancia cada vez más es la energía solar por concentración (Concentrating Solar Power, CSP), por las prestaciones que presenta en cuanto a estabilidad y almacenaje. Las tecnologías CSP concentran la luz del sol en un receptor con la finalidad de transferir energía a un fluido, que después puede ser transformada en electricidad [2]. De esta manera se puede generar vapor que alimenta una turbina y generar electricidad. Las tecnologías de energía solar concentrada pueden generar alrededor del 7% de la demanda mundial de electricidad para el año 2030 y pueden llegar al 25% para el año 2050 [3].

El uso de concentradores solares ha despegado en la última década debido al rápido desarrollo de diferentes tecnologías. El concentrador lineal Fresnel (LFC), es una de las tecnologías emergentes de CSP que tiene un gran potencial para la producción térmica de bajo costo [4], [5], [6]. Su concepto es simple y fácil, está formado por espejos reflectantes planos o ligeramente curvados dispuestos en aletas paralelas que se inclinan por rotación para iluminar un sistema receptor fijo colocado en el plano focal, donde estos espejos son más económicos que otro tipo de concentradores solares. Además, la tecnología LFRs (Reflectores lineales Fresnel) es amigable con el medio ambiente, donde el uso de agua como fluido de trabajo en lugar de aceite térmico para evitar el riesgo de contaminación, la degradación del aceite y el riesgo de incendio [7]. Sin embargo, los concentradores Fresnel lineales tienen menor eficiencia óptica y térmica que los colectores cilindro-parabólicos, por lo tanto, esta tecnología con su baja eficiencia se convierte en un desafío porque afecta el desempeño térmico y la estabilidad de operación de la planta solar [8].

Esta tecnología en Colombia tiene poco desarrollo debido los pocos estudios de investigación llevados a cabo, Las Unidades Tecnológicas de Santander guiado por el Docente Brayan Eduardo Tarazona Romero y el Grupo de Investigación, desarrollaron un prototipo que es un sistema artesanal desarrollado bajo una metodología de concepto de tecnología apropiada, es decir, con atención especial en el fácil manejo, un bajo costo y la minimización de impactos sobre el medio ambiente [9] que cuenta con sistema de medición de datos (presión, temperatura, caudal), sistema de bombeo y seguimiento solar para su análisis experimental, pero que carece de análisis ópticos que demuestren el efecto de la geometría del sistema reflector primario y secundario en la eficiencia óptica y de sus propiedades ópticas, que será tomado como base para el desarrollo de este estudio.

El análisis óptico de todos los reflectores solares de concentración es un problema importante porque nunca es fácil predecir la cantidad y la calidad del flujo de calor que cae sobre el sistema receptor. Existen tres métodos de análisis óptico: simulación numérica [10], dinámica de fluidos computacional (CFD modeling) [11] y el trazado de rayos de Montecarlo (MCRT) [12]. Este trabajo, muestra un análisis óptico basado en una simulación numérica en MATLAB y en el método MCRT, por medio de la aplicación de softwares como Sol trace y Tonatiuh, que utiliza una combinación de trazado de rayos y técnica de Monte Carlo para evaluar la influencia de la variación de parámetros geométricos y ópticos del sistema reflector primario y secundario en la energía solar captada en el receptor y en su eficiencia óptica. A su vez se evalúan varias alternativas de cambios geométricos con el fin de plantear un diseño geométrico optimizado que mejore la eficiencia óptica del prototipo actual.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La radiación solar es aprovechada en diversas aplicaciones de las energías renovables ya que se transmite a través de ondas a partir de su superficie en todo el espacio, siendo captada por dispositivos térmicos denominados “colectores solares”. Actualmente existen tres categorías de colectores solares, cuya diferencia radica en la temperatura de trabajo: sistemas 1D ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$), 2D (de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) y 3D ($< 500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Al interior de esta clasificación, destacan los sistemas de concentración solar de media temperatura 2D con dos tecnologías: colector cilíndrico parabólico (PTC) y colector lineal Fresnel (LFC). [13]

Entre todas las tecnologías CSP, la más utilizada hasta ahora es el concentrador PTC, los sistemas PTC son centralizados y tienen amplia aplicación a nivel global, con costos altos de inversión y porcentajes altos de eficiencia [14]. El LFC, en ventaja con los sistemas PTC, tiene características de fácil modularidad, construcción, manutención y costo, lo cual lo convierte en una tecnología con potencial para su aplicación y desarrollo. [15]

LFC es un sistema que carece de investigación aplicada a nivel nacional (Colombia), y tiene un alto potencial de aplicación en áreas con alta radiación solar. Por ello, en 2019, el profesor Brayan Eduardo Tarazona de la UTS dimensionó, construyó y evaluó el prototipo artesanal LFC en Bucaramanga para el desarrollo de su propuesta de trabajo de grado. Su propuesta de trabajo de investigación que es modelo base para el desarrollo del presente proyecto de investigación se centró en sistemas desalinización solar indirectos bajo la aplicación de tecnologías emergentes y tecnología apropiada. [16]

Ahora, en el ámbito de desarrollo de la tesis de grado, debido a la baja eficiencia del proceso de calentamiento de agua del prototipo LFC y, a la falta de análisis óptico que evalúe el comportamiento del sistema basado en la geometría del LFC para evaluar el rendimiento óptico del sistema en condiciones meteorológicas, evidencian la necesidad de desarrollar un estudio del comportamiento óptico del prototipo dimensionado y construido bajo el concepto de tecnología apropiada aplicando una serie de simulaciones estáticas con el fin de evaluar y proponer mejoras de diseño geométrico en el reflector primario que incurran en un aumento en la eficiencia actual del sistema. A su vez, debido a que el prototipo de sistema LFC carece de un sistema de reflexión secundario adecuado surge la necesidad de dimensionar y validar un sistema de reflexión secundario aplicado al prototipo LFC existente; con el fin de mejorar el rendimiento del dispositivo.

En base a lo anterior, surge la siguiente pregunta problema: ¿Cómo mejorar los parámetros de diseño geométricos del prototipo de colector lineal Fresnel desarrollado por el Grupo GISEAC de las Unidades Tecnológicas de Santander para generar un aumento en el rendimiento óptico?

4. JUSTIFICACIÓN

El rendimiento óptico de un colector de energía solar de concentración (CSP) es fundamental para la eficiencia global del sistema. La pérdida de eficiencia óptica de una tecnología CSP suele representar la mayor pérdida de eficiencia de todo el sistema, lo que hace que el componente óptico sea fundamental para el rendimiento global del sistema [17]. La principal desventaja del LFC es que la eficiencia óptica es menor que la de los PTC debido a las propiedades geométricas de LFC. Este problema se debe a que el receptor es fijo, por lo que las pérdidas por el coseno del ángulo de reflexión por la mañana y la tarde son muy altas [18] Debido a esto, se convierte en un requisito fundamental estudiar las propiedades geométricas, ya que debe determinarse cuales de estas son importantes para aumentar el rendimiento óptico del prototipo.

Con el propósito de darle solución a esta cuestión en nuestro caso de estudio, Se aplicó un modelo de simulación numérica con MATLAB y se desarrollaron modelos de simulación de trazado de rayos en software como SolTrace y Tonatiuh que analizan el rendimiento óptico en donde se variaron varios aspectos de la geometría y ópticos tanto del campo de reflectores primarios como de los reflectores secundarios para comprender como el cambio de estas variables afecta el rendimiento óptico y luego se evaluaron unas alternativas de mejora geométrica y óptica con el fin de proponer un diseño óptico - analítico optimizado que mejore la eficiencia óptica del prototipo actual manteniendo el concepto de tecnología apropiada. Además, el modelado en Soltrace y Tonatiuh se utilizó para confirmar los resultados numéricos obtenidos en MATLAB.

Consecuentemente, el desarrollo de la propuesta incurriría adicionalmente, en la integración de un tercer ente académico; las Unidades Tecnológicas de Santander y el Grupo de Investigación en sistemas de energía, automatización y control – GISEAC, quienes desarrollaron el prototipo producto del análisis. Es así, que, una vez desarrollado el trabajo, se espera obtener información que permita mejorar el rendimiento óptico del prototipo LFC, el cual es un subsistema que integraría finalmente un modelo a escala real de un desalinizador solar indirecto por concentración.

5. ALCANCES Y LIMITES.

El sistema LFC estudiado en el presente trabajo, no es un sistema a gran escala o nivel industrial, es un prototipo desarrollado en la UTS por El Docente Brayan Eduardo Tarazona su proyecto de investigación se centró en sistemas desalinización solar indirectos bajo la aplicación de tecnologías emergentes y tecnología apropiada por eso sus dimensiones no son comparables con un sistema industrial debido a que dificulta la aplicabilidad de sus objetivos. Las variaciones en las dimensiones descritas en el presente documento se adecuan al cumplimiento de los requisitos de fácil transporte, condiciones económicas y costos, el uso de materiales adecuados en cuanto a su disponibilidad local y de bajo costo. Por eso no se toman valores de variaciones de los espejos en el sistema primario de una gran dimensión o tamaño. Lo esencial y primordial del prototipo LFC es mejorar su eficiencia manteniendo el concepto de tecnología apropiada.

6. MARCO REFERENCIAL

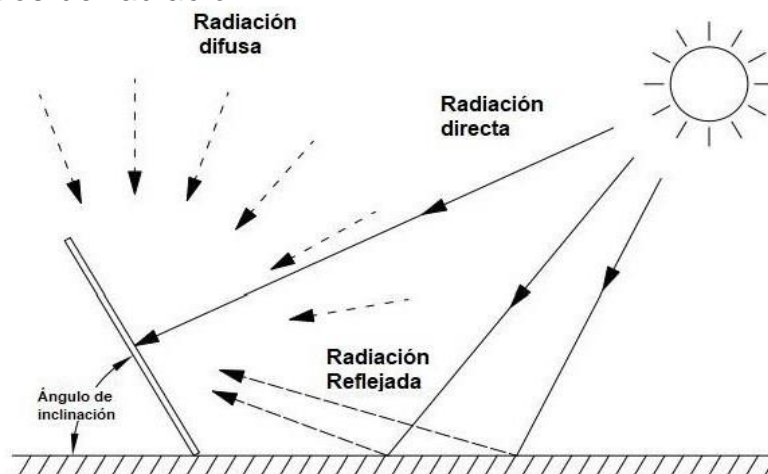
6.1. MARCO CONCEPTUAL

6.1.1. Radiación Solar. Es la cantidad de energía emitida por el sol que irradia en todas direcciones el espacio e impacta directamente sobre la atmósfera terrestre. La radiación solar atraviesa las capas de la atmósfera y hace contacto con la tierra con una intensidad de radiación solar que varía en base a factores como: altura solar, condiciones atmosféricas y la altura sobre el nivel del mar [19].

La radiación solar se puede clasificar de la siguiente manera (Ver Figura 1):

- Radiación solar directa: atraviesa directamente las capas de la atmósfera terrestre sin ser afectada.
- Radiación solar difusa: se dispersa debido a la afectación de las capas de la atmósfera terrestre.
- Radiación de albedo: es producto de la reflexión en el suelo terrestre.
- Radiación solar global: es la sumatoria de la radiación solar difusa y directa.

Figura 1. Tipos de radiación.



Fuente: Tomado de [20]

6.1.2. Energía termosolar. La energía termosolar es un tipo de energía limpia, la cual consiste en el aprovechamiento de la radiación solar, para ser transformada en energía térmica, para que a su vez contribuya en la producción de vapor y

electricidad, entre otras aplicaciones. Dicha transformación de energía se produce mediante sistemas de concentración solar, que a través de paneles o espejos concentran la energía solar, de manera lineal o puntual, para transferir el calor al fluido caloportador, para así completar la transformación de la energía solar, y pueda ser usada en diversas aplicaciones [21]

6.1.3. Sistemas captación solar térmicos. Las tecnologías de captación solar térmicas aprovechan la radiación solar y la convierten en calor, siendo útil en diversas aplicaciones como: calentamiento de aire o agua, sistemas de refrigeración, para generar electricidad, entre otras. Estas tecnologías se clasifican en base a los niveles de temperatura alcanzados en: sistemas de baja temperatura (1D) con rango de hasta 100 ° C, sistemas de mediatemperatura (2D) con rangos de operación de hasta 50 ° C y sistemas de alta temperatura (3D) que superan temperaturas de trabajo de 1000 °C [22].

A continuación, se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los tipos de tecnología de aprovechamiento solar térmico, con las principales características como: la tecnología aplicada, el tipo de radiación que aprovecha y los niveles de temperatura de trabajo que alcanzan los sistemas en operación.

Tabla 1. Tecnología de captación solar térmica.

| Tipo de aprovechamiento de radiación | Temperatura de trabajo | Tipo de radiación aprovechada | Tecnología |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------|--|
| Captación solar | 1D | Directa y Difusa | Placa Plana Tubos de Vacío Termosifón |
| | 2D | Directa | Colector cilíndrico parabólico (PTC) y |
| Concentración solar | 3D | | Colector lineal Fresnel (LFC) Torre solar Plato Parabólico |

Fuente: Tomado de [16]

6.1.4. Concentradores solares. Los concentradores solares son equipos de tecnología termosolar, basados en un sistema mediante el cual se aprovecha la

energía proveniente de la radiación solar para ser transformada en energía térmica, la cual se transfiere a un fluido caloportador, que puede ser agua, aire o aceite térmico, el cual atraviesa el campo de concentración de rayos solares, para posteriormente elevar la temperatura del fluido y de esta manera utilizar dicha energía en forma de vapor, en distintas aplicaciones industriales y residenciales. Dicho proceso es posible gracias a la reflexión de los rayos solares sobre sólidos reflectantes, los cuales guían la dirección de los rayos hacia el punto o línea de concentración térmica, en donde circula el fluido caloportador [23].

Para alcanzar un rendimiento óptimo en el sistema de concentración solar es importante disponer de un buen sistema de seguimiento solar, conocido como tracking, que permita garantizar la mayor cantidad de radiación a lo largo del día, permitiendo así una correcta disposición del sistema de reflexión de acuerdo a la posición del sol [23].

6.1.5. Concentrador lineal Fresnel (LFC). Consiste en un sistema de concentración solar de foco lineal, capaz de aprovechar la energía solar proveniente de los rayos solares, con el fin de transformar dicha energía en calor, para que ésta sea transferida a un fluido caloportador, que circula a través del tubo absorbedor, el cual se encuentra ubicado a lo largo de la línea de concentración solar, aumentando la temperatura del fluido, para que de esta manera el vapor generado, pueda ser utilizado en posteriores procesos industriales de generación de electricidad, y distintos procesos donde el calor y el vapor sean necesarios. El LFC consta principalmente de un sistema de reflexión primario, un sistema de reflexión secundario, un tubo absorbedor, y un sistema de seguimiento solar (tracking) [24]

6.1.5.1. Sistema de reflexión primario. El sistema de reflexión primario tiene como objetivo reflejar los rayos solares hacia el tubo absorbedor, y consta de una serie de filas de espejos planos o ligeramente curvos, los cuales se encuentran conectados a un sistema de seguimiento solar, que permite que dichos espejos giren de acuerdo a la posición del sol, para de esta manera garantizar el aprovechamiento máximo de la radiación solar a lo largo del día [25]

6.1.5.2. Sistema de reflexión secundario. El sistema de reflexión secundario, consta de un tubo absorbedor, por el que circula el fluido caloportador, al cual se transfiere la energía térmica proveniente de los rayos solares, y también está compuesto por un reflector secundario, el cual posee una cavidad con características geométricas y reflectivas que permiten que los rayos solares que no inciden directamente sobre el tubo absorbedor, sean redirigidos hacia dicho tubo, para de esta manera aprovechar el porcentaje máximo de los rayos solares reflejados por el sistema de reflexión primario, y garantizar un mejor rendimiento en el sistema. Adicionalmente a esto el sistema de reflexión secundario consta de un material aislante térmico, ubicado en las paredes del reflector secundario y una lámina de vidrio ubicada en la parte inferior del reflector, para de esta manera disminuir las pérdidas de calor en el sistema [25].

6.1.6. Seguimiento solar. El sistema de seguimiento solar permite direccionar o reflejar los rayos solares durante todo el día maximizando su aprovechamiento. El sol está en movimiento constante durante el día, por tal motivo es indispensable que cada espejo siga su trayectoria. Los sistemas de seguimiento solar, pueden construirse por medio de la aplicación de motores individuales para cada espejo o por medio de un solo motor conectado a un mecanismo que gira todos los espejos del sistema [26].

6.1.7. Método de trazado de rayos de Montecarlo – MCRT. Es un método matemático basado en probabilidades, es ampliamente empleado en diversos campos como los fenómenos radiactivos en los campos de energía renovables y en procesamiento de imágenes. El método consiste en lanzar una cantidad específica de rayos (fotones) desde una fuente de luz (Por ejemplo, rayos solares), donde cada partícula transporta una cantidad determinada de energía, posteriormente traza el recorrido del rayo. Adicionalmente, el método MCRT se adapta a formas geométricas complejas [27]. Actualmente, existe gran variedad de herramientas computacionales que facilitan el desarrollo de la simulación MCRT, existen aproximadamente 36 aplicaciones diferentes para analizar CSP, destacando herramientas de acceso abierto como SolTrace y Tonatiuh [28].

6.1.8. Tonatiuh. Corresponde a un programa desarrollado en el lenguaje de programación C++, para la simulación óptico - energética de sistemas de concentración solar, utilizando como base, la combinación del trazado de rayos, con el método de Monte Carlo, permitiendo de esta manera la simulación del comportamiento óptico, para el diseño y análisis de distintos sistemas termosolares. Este programa tiene como característica, su desarrollo por medio de código abierto, por lo cual su código fuente se encuentra a disposición de los usuarios, además de una serie de recursos vía internet, para resolución de dudas y contribución de los usuarios al desarrollo del programa [29]. Para el desarrollo de la simulación, Tonatiuh usa como base el método de Monte Carlo para la simulación óptica de los respectivos sistemas de concentración solar, partiendo de una fuente solar simulada, la cual proporciona los rayos necesarios para evaluar el comportamiento de éstos, con los diferentes elementos reflectantes y sus respectivas geometrías, obteniendo mayor precisión al aumentar el número de rayos simulados [30]

6.1.9. Soltrace. Sol Trace es un software desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) basado en el método de trazado de rayos de monte Carlo (MCRT), empleado para el análisis óptico y diseño geométrico de sistemas de concentración solar. El código desarrollado por NREL para la construcción de la herramienta, permite seleccionar el número de rayos que se desea trazar. Cada uno de los rayos se monitorea a través del sistema mientras se encuentra con varias iteraciones ópticas. El código se escribo en C ++, es rápido y aprovecha el procesador del equipo en el que se analiza. Permite modelar todo tipo de concentradores solares, muestra diagramas de dispersión y mapas de flujo, guarda datos para procesarlos con otros programas. Adicionalmente, permite modelar

geometrías ópticas como etapas compuestas por cualquier número de elementos ópticos con atributos de forma, contorno y calidad óptica [31].

6.1.10. MATLAB. Se puede decir que MATLAB es un lenguaje de programación de alto nivel que permite hacer cálculos, visualizar resultados y desarrollar algoritmos utilizando notación matemática. El nombre de MATLAB proviene de Matrix Laboratorio. Fue creado originalmente como una interfaz para librerías de rutinas de Fortran como EISPACK y LINPACK, las cuales son considerados como el estado de las artes para resolver problemas de álgebra matricial.

Los datos básicos son arreglos, como vectores y matrices, no necesitándose declaración de variables ni solicitar memoria. Esta es la principal característica de MATLAB es un lenguaje de programación, que permite manipular vectores o matrices como simples variable. Hoy día, no se limita solo a resolver problemas numéricos sino que ofrece una gran cantidad de herramientas que permiten vincularse con otros programas, hacer adquisición de datos, control en tiempo real, hacer procesamiento simbólico y mucho más [32].

6.1.11. Eficiencia óptica. Energía solar absorbida por el receptor y la energía solar que incide en los reflectores es la eficiencia óptica. [33]

6.1.12. Energía. En la actualidad existen muchos conceptos de energía, debido a que esta tiene varios tipos, como por ejemplo la energía solar, la energía cinética, la energía mecánica etc. Pero en un concepto en general, la energía es la capacidad que tiene una fuerza para generar una acción o un trabajo. Toda fuerza que realiza un trabajo sobre un objeto, provocará un cambio de energía en él (ENSA, 2016). [34]

6.1.13. Elevación. La altura solar, también llamada elevación solar, es la distancia angular vertical que hay entre un cuerpo celeste, (como lo puede ser el sol o la luna), y el horizonte local del observador. Este es un ángulo que varía entre 0° y 90° . La altura solar es el complemento del ángulo cenital [35].

6.1.14. Azimut. El azimut es un ángulo el cual forma el norte y un cuerpo celeste (sol o luna). Este ángulo es medido en sentido de rotación de las agujas del reloj, alrededor del horizonte del observador. El ángulo azimut es el que señala de donde proviene la luz del sol, por ejemplo, cuando el sol se halla al norte, tiene un azimut de 0° , cuando se halla al este, tiene un azimut de 90° , cuando se halla al sur tiene un azimut de 180° y cuando se halla al oeste, su azimut es de 270° [35].

6.1.15. Reflectancia. La reflectancia es la capacidad que tiene un cuerpo de reflejar la luz solar, por lo tanto, la reflectancia es la relación entre la potencia electromagnética que incide con respecto a la potencia que es reflejada por una interfase. Matemáticamente se le conoce como coeficiente de reflexión, se expresa

en porcentaje y esta mide la relación entre la luz reflejada por una superficie (comúnmente espejos) y la luz incidente sobre ella (luz solar) [35].

6.1.16. Tecnología apropiada. El concepto de tecnología apropiada, hace referencia al diseño e implementación de sistemas, por medio del uso de materiales y recursos que posean características favorables, en cuanto a su disponibilidad local, bajo costo y que contribuyan a la preservación del medio ambiente, y que de igual manera garanticen un eficiente funcionamiento del sistema [36].

6.2. ANTECEDENTES

[37] Un análisis numérico bidimensional de las pérdidas por convección y radiación en un receptor de cavidad trapezoidal invertida con múltiples tubos y escudo de vidrio. El estudio se realizó variando las dimensiones del receptor, la temperatura de funcionamiento y las condiciones ambientales. En el diseño óptimo propuesto en la investigación, las pérdidas de calor por convección y radiación fueron un 12,76% y un 54% menor, respectivamente. Además, las pérdidas por radiación del escudo de vidrio resultaron ser las más significativas en comparación con otras pérdidas para todas las geometrías consideradas en el estudio.

[38] Un modelo para el análisis óptico de un LFC con seguimiento del acimut solar. Los resultados obtenidos del modelo analítico se compararon con el software de trazado de rayos SolTrace. Según el modelo, la eficiencia total del colector lineal de Fresnel es del 61% y es mayor que la del colector cilindro-parabólico que opera en condiciones similares. Además, se observó que la altura del receptor afecta al sombreado y al bloqueo entre las filas de espejos, ya que al aumentar la altura, el sombreado y el bloqueo también aumentan. Asimismo, la anchura del receptor influyó significativamente en la pérdida de calor.

[39] Un método de diseño para calcular la eficiencia de los elementos del espejo mediante el trazado de rayos y el estudio geométrico. Se realizaron simulaciones variando la anchura del espejo y la altura del receptor utilizando un LFC con ocho filas de espejos. Se encontró que los espejos más cercanos a la línea central del colector tenían una mayor eficiencia que las filas exteriores en incidencia normal. Además, por la mañana las filas del lado Este tenían un mejor rendimiento que las filas del Oeste, sin embargo, se observó lo contrario 16 para las horas posteriores al mediodía solar, es decir, la eficiencia del lado Oeste era mayor que la del lado Este durante la segunda mitad del día.

[40] Un enfoque analítico denominado First OPTIC. El modelo era básicamente un lote de código MATLAB. Los resultados se validaron comparándolos con el programa de trazado de rayos SolTrace, previamente verificado. El estudio se centró en el cálculo del modificador del ángulo de incidencia (IAM) y sugirió que

dividir el IAM en longitudinal y transversal puede proporcionar resultados con una precisión razonable.

[41] Desarrollado expresiones analíticas para los modificadores del ángulo de incidencia de un reflector lineal de Fresnel para las direcciones longitudinal y transversal. Se crea una fórmula simple y precisa para todos los rangos de ángulos solares posibles para espejos planos. Las ecuaciones desarrolladas se comprueban con datos bibliográficos de otros estudios y de colectores comerciales. Se comprueba que las ecuaciones desarrolladas conducen a resultados precisos con desviaciones medias de hasta el 5%. Además, las tendencias de las curvas del modificador del ángulo de incidencia son las mismas entre el modelo y los datos de la literatura. Se sugiere que las expresiones analíticas desarrolladas pueden utilizarse para el cálculo rápido del rendimiento óptico de un reflector lineal de Fresnel, así como para la optimización de la geometría del colector.

[42] Un LFR con un concentrador parabólico compuesto (CPC) como reflector secundario en el absorbedor tubular. Utilizaron el método de trazado de rayos de Montecarlo y el método de volumen finito para su simulación. Encontraron la máxima eficiencia óptica, mientras que el rendimiento térmico anual fue superior al 46% para una ubicación con una latitud de 35°.

[43] Un LFR cuya función objetivo era la máxima eficiencia óptica y las variables de optimización eran la anchura del reflector primario, la distancia entre los reflectores primarios y la distancia focal como parámetros de optimización. Ma y Chang (2018) sugirieron el reflector titulado (o ajustado) para concentrar toda la irradiación solar incidente en el absorbedor. Esta idea reduce las pérdidas ópticas finales del colector y es capaz de mejorar el rendimiento hasta un 50%.

Dos años más tarde, la revista Solar Energy, realiza una publicación de un nuevo método adaptativo para optimizar el reflector secundario de los colectores lineales de Fresnel, realizado por Guangdong Zhu, en el Laboratorio Nacional de Energías Renovables, mediante el cual se busca optimizar el perfil del reflector secundario, de manera que éste refleje la máxima cantidad de energía al absorbedor, y finalmente dicho método fue aplicado a un complejo industrial de concentradores lineales Fresnel, con lo cual se obtuvo como resultado una capacidad de más del 90% en redirección de la potencia al absorbedor [44].

Finalmente, en junio del presente año la revista internacional Renewable Energy, realiza la publicación de un proyecto de diseño de un colector lineal Fresnel con un reflector secundario parabólico compuesto (CPC), realizado por Wang et al., en el cual se realiza una simulación mediante el método de trazado de rayos, con el fin de optimizar el reflector secundario CPC, estableciendo un modelo matemático de dicho reflector, para determinar el ángulo de media aceptación y la relación de truncamiento, con el fin de evaluar el rendimiento óptico geométrico obtenido [45].

[46] Una simulación de un prototipo de colector solar lineal de Fresnel con un número variable de franjas de espejo. Se ha estudiado la eficiencia global del diseño optimizado [14]. Evaluaron un LFSC con 10, 15 y 20 espejos. Los investigadores encontraron que aumentar la cantidad de espejos afecta directamente el tiempo necesario para alcanzar la temperatura estancada. Sin embargo, la eficiencia general del colector disminuye con el aumento de la superficie reflectante. El estudio muestra que el número óptimo de espejos debe estar en el rango de 10-15 con un ancho de espejo óptimo entre 10 y 12 cm.

Un trabajo sobre un LFC construido por el Docente Brayan Eduardo Tarazona Romero de las UTS en la ciudad de Bucaramanga aplicado para sistemas desalinización solar indirectos bajo la aplicación de tecnologías emergentes y tecnología apropiada , este trabajo desarrollado tiene como objetivo simular un prototipo artesanal de concentrador lineal Fresnel (LFC) a través de la aplicación de los softwares Sol Trace y Tonatiuh con el fin de identificar y analizar los atributos ópticos del modelo. Se variaron parámetros de cantidad de rayos de 10000000 y 5000000 para cada simulación, así como el valor de radiación solar directa (DNI) de 600 W/m² a 350 W/m². Estas simulaciones fueron comparadas posteriormente con el valor de eficiencia óptico real del sistema experimental. Finalmente, los resultados obtenidos evidenciaron una relación directa entre los valores de eficiencia óptica y el DNI y cantidad de espejos o área de reflexión [16].

6.3. MARCO LEGAL

El uso de las fuentes no convencionales de energía (FNCE) en Colombia se ha convertido en una alternativa que cada vez tiene más aplicaciones, ya que son energías inagotables y son amigables con el medio ambiente. En el mundo se han puesto alerta tras el agotamiento de estas fuentes que proveen energía, pero Colombia es un país rico en energías renovables, como lo son principalmente las hidroeléctricas, debido al potencial hídrico que hay en el país y la energía solar, debido a que Colombia está ubicada en una posición geográfica bastante importante que es la zona ecuatorial, donde se tienen uno de los niveles de radiación solar más altos del planeta [47].

En las estadísticas de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) evidencian que, de las iniciativas radicadas, el 88.3% tienen que ver con energía solar, en donde 9 de cada 10 propuestas para generar energía, se usaran paneles solares. La UPME y el Ministerio de Minas y Energía estiman que, para antes de 2030, cerca del 10% del consumo energético en Colombia va a provenir de proyectos solares o fotovoltaicos [48]. La energía solar es uno de los tipos de energía renovable o limpia, que se produce a través del sol debido a su radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta), y de esta se puede generar electricidad y calor. Mediante la energía solar se puede generar electricidad a través

de la energía fotovoltaica, o a través del calor por medio de un termosolar. Esto se obtiene a través de paneles solares y espejos.

La electricidad para producirse de estas dos formas sería, por ejemplo, a través de los espejos, se proporciona el calor a través del sol, se aprovechan los espejos de manera que los rayos del sol se concentran en un receptor que puede alcanzar temperaturas de hasta 1.000 °C, este calor se utiliza para calentar un fluido que genera vapor, como el agua, y finalmente ese vapor puede mover una turbina y se produce electricidad. La otra forma de producirse electricidad es a través de paneles solares fotovoltaicos. Los paneles fotovoltaicos están formados por grupos de células o celdas solares que transforman la luz (fotones) en energía eléctrica (electrones). El obtener este tipo de energías a través de la energía solar tiene muchos beneficios, los cuales pueden ser [48]:

El sol es una fuente de energía muy limpia y no pone en peligro ni incrementa el calentamiento global, debido a que no produce gases de efecto invernadero, ni subproductos peligrosos para el medio ambiente.

Se produce una energía que resulta más económica, a comparación de la que se adquiere a través de la red.

Está disponible en todo el mundo, por lo cual se convierte en la mejor forma de proveer electricidad a lugares aislados, donde el costo de instalar líneas de distribución es bastante alto.

- Contribuye al desarrollo sostenible
- Genera bastante empleo en las zonas donde se instala
- Reduce el uso de energía a través de los combustibles fósiles
- Reduce las importaciones energéticas

6.3.1. Ley 1715 de 2014. La ley 1715 de 2014, es la ley por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético Nacional. La energía solar se considera como una fuente no convencional de energía, el gobierno nacional a través del ministerio de Minas y Energía y ministerio de vivienda y ambiente, fomentaron el aprovechamiento del recurso solar en proyectos de urbanización municipal o distrital, en edificaciones, en los sectores industriales, comerciales y residenciales.

El ministerio de Minas y Energía también directamente o a través de las entidades que designen para este fin de la generación de energía, reglamentará las condiciones de participación de energía solar como fuente de generación distribuida, estableciendo la reglamentación técnica y de calidad a cumplir por las instalaciones que utilicen la energía solar, así como también los requisitos de

conexión, mecanismos de entrega de excedentes y normas de seguridad para las instalaciones.

El gobierno nacional, considerará la viabilidad de desarrollar la energía solar como una fuente de autogeneración de los estratos 1, 2 y 3, como alternativa de subsidio existente, para el consumo de electricidad de estos usuarios.

Por último, un numeral adicionado por el artículo 12 de la ley 2099 de 2021, menciona que el gobierno nacional fomentara la autogeneración fotovoltaica en edificaciones oficiales, especialmente dedicadas a la prestación de servicios educativos y de salud [49].

6.3.2. Ley 2099 de 2021. Por medio de la ley 2099 de 2021, se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones como algunos arreglos de la ley 1715 de 2014. El 10 de julio de 2021, el congreso de la República expidió esta ley, con la finalidad de promover la utilización de las fuentes no convencionales de energía en el país y de incentivar el uso eficiente de los recursos energéticos. En esta ley se declaran la utilidad pública y de interés social a las actividades de promoción y desarrollo de fuentes no convencionales de energía y además crea el fondo de energías no convencionales y gestión eficiente de la energía (FENOGE), con la finalidad de promover, ejecutar y financiar planes y proyectos de fuentes no convencionales de energía (FNCE) [50].

7. OBJETIVOS

7.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de mejora geométrica para el prototipo Captador lineal Fresnel LFC con el fin de aumentar su eficiencia óptica basada en análisis ópticos aplicando los softwares Sol trace, Tonatiuh y Matlab.

7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los parámetros y variables del diseño geométrico que afectan directamente la eficiencia óptica.
- Seleccionar las mejores condiciones geométricas permitan incrementar la eficiencia óptica, a partir del análisis simulaciones efectuadas en los softwares Sol trace, Tonatiuh y Matlab.
- Generar una propuesta de mejora geométrica del prototipo de colector lineal Fresnel mediante el software SolidWorks con base en los análisis desarrollados con el fin presentar el diseño más adecuado para aumentar la eficiencia óptica del modelo.

8. METODOLOGÍA

La metodología de investigación a utilizar para el desarrollo del presente trabajo es de tipo Descriptiva y Experimental. Descriptiva porque permitió la recopilación de información específica determinando de esta manera la relación de las características geométricas y materiales de los modelos de reflexión secundario con el rendimiento total del sistema de concentración lineal Fresnel y experimental basado en la modificación de parámetros geométricos de diseño sometidas a un estudio, bajo condiciones controladas con el fin de optimizar la eficiencia del dispositivo estudiado, con un enfoque cuantitativo, ahondando en el análisis basado en la recolecciones de datos y el uso de herramientas matemáticas, estadísticas e informáticas para medirlo [51]. Para cumplir con los objetivos trazados se proyectaron cuatro etapas.

8.1. FASE 1. CONSOLIDACION DE INFORMACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS.

En esta primera fase, se realiza la consulta bibliográfica relacionada con artículos referentes a los efectos de los parámetros geométricos y ópticos de un LFC sobre la eficiencia óptica, relacionada con expresiones analíticas para los modificadores de ángulos de incidencia para las direcciones longitudinal y transversal para el cálculo del rendimiento óptico, relacionada con modelos propuestos de sistemas de reflexión secundario de concentradores lineales Fresnel, con el fin de apoyarnos en dichas investigaciones para posteriormente seleccionar el modelo adecuado para el prototipo artesanal de concentrador lineal Fresnel.

- Revisión bibliográfica de artículos con simulaciones de variación paramétrica para saber cuáles son las variables más significativas que al modificar pueden generar un modelo más eficiente.
- Revisión bibliográfica de modelos de reflexión secundario existentes para analizar las propiedades geométricas y las formas más eficientes.
- Definición del modelo de simulaciones a realizar indicando los parámetros geométricos del sistema de reflexión primario que serán sometidos a variaciones en las simulaciones.
- Identificación de los requerimientos de diseño básico y suministro de información de los softwares sol trace y Tonatiuh.

- Determinación del modelo matemático a implementar en MATLAB para detallar las expresiones analíticas para los modificadores de ángulos de incidencia para las direcciones longitudinal y transversal en una fórmula precisa para el cálculo del rendimiento óptico.

8.2. FASE 2. MODELADO DEL SISTEMA LFC Y DESARROLLO DE SIMULACIONES EN SOLTRACE, TONATIUH Y MATLAB

En esta fase, se selecciona el diseño geométrico del sistema de reflexión secundario tomado como referencia, en los softwares Soltrace-Tonatiuh se modela el sistema LFC, se deben introducir los parámetros necesarios dados a los softwares de simulación como orientación, dimensiones, material, y a su vez, programar las ecuaciones de la eficiencia óptica en Matlab modelada por los parámetros geométricos. Estas simulaciones se harán de la manera que han sido planificadas, con la variación de parámetros geométricos como el largo y el ancho del espejo, el cambio en la geometría del concentrador secundario, con el objetivo de analizar su comportamiento.

- Selección el sistema de reflexión secundario, con sus características geométricas más adecuadas para implementar en el prototipo existente.
- Modelamiento del sistema colector lineal Fresnel con el nuevo sistema de reflexión secundario en los softwares de simulación estática Soltrace – Tonatiuh.
- Programación las expresiones analíticas que modelan el sistema de colector lineal Fresnel en el lenguaje de programación Matlab (Simulación numérica).
- Ejecución de las diferentes simulaciones estáticas establecidas en los softwares Soltrace – Tonatiuh y la simulación numérica en Matlab.

8.3. FASE 3. ANÁLISIS TRAZADO DE RAYOS DE MONTECARLO Y SU EFICIENCIA ÓPTICA

En esta fase, se quiere analizar la cantidad de energía de los rayos solares reflejada en los espejos e interceptada por el receptor para establecer la eficiencia óptica, por eso, se estudian las simulaciones obtenidas de la fase anterior, para observar su eficiencia en torno a las distintas condiciones presentadas e identificar las mejores condiciones geométricas y ópticas para lograr una ganancia en la eficiencia óptica.

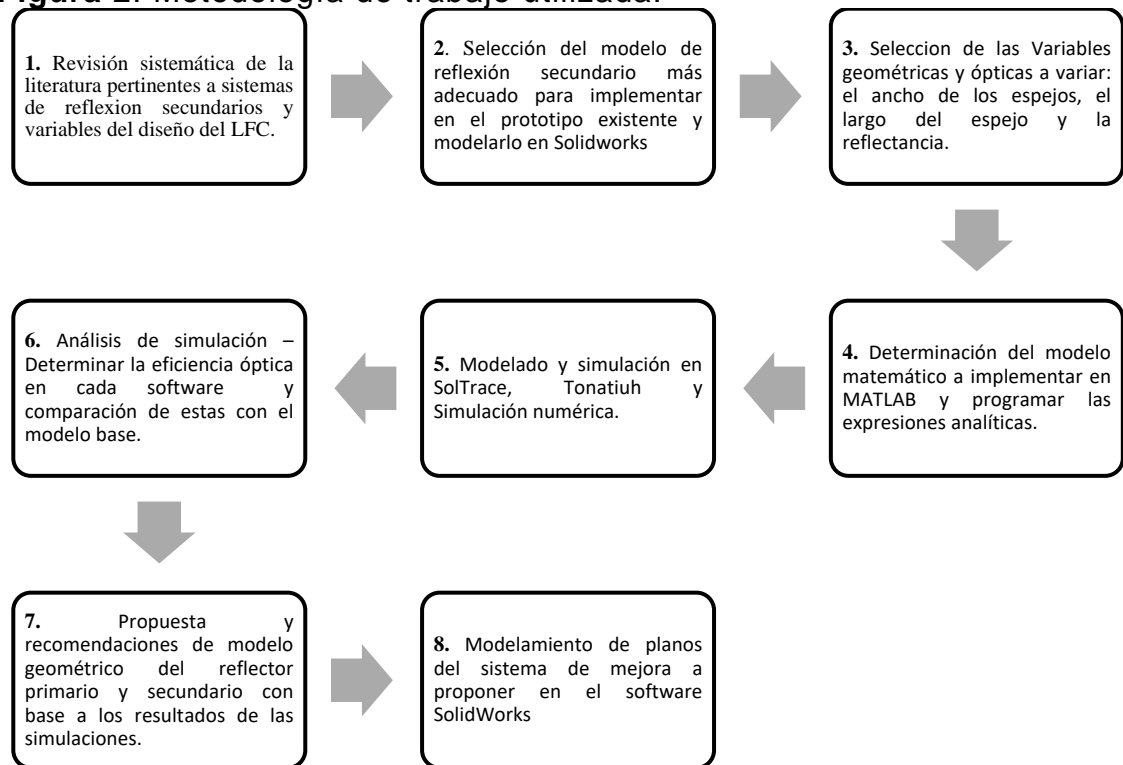
- Ejecución del estudio de la relación de la energía solar absorbida por el receptor y la energía solar que incide sobre los reflectores para determinar la eficiencia de cada simulación.
- Elaboración de la Figura de comportamiento de la eficiencia óptica en función del largo del espejo y el ancho con base en las simulaciones desarrolladas.
- Análisis de la Figura del comportamiento de la eficiencia óptica destacando las mejores condiciones geométricas para lograr el aumento de la eficiencia.
- Planteamiento de posibles parámetros para mejora geométrica del prototipo de colector lineal Fresnel actual.

8.4. FASE 4. PROPUESTA FINAL DE MEJORA DE LA EFICIENCIA OPTICA

En esta fase, se realiza las comparaciones del sistema LFC con los parámetros simulados y la eficiencia actual para escoger la mejor condición de medidas en el largo y ancho del espejo y reflectancia que genere un mejor aumento en la eficiencia óptica y representar esta propuesta de mejora geométrica en un render y sus planos correspondientes en el software SolidWorks.

- Comparación de la eficiencia con los nuevos parámetros geométricos óptimos seleccionados con la eficiencia óptica de las condiciones iniciales del sistema.
- Modelamiento de planos del sistema de mejora a proponer en el software SolidWorks.
- Presentación de la propuesta de mejora geométrica y óptica para el aumento de la eficiencia óptica.

Figura 2. Metodología de trabajo utilizada.



Fuente. Elaboración propia.

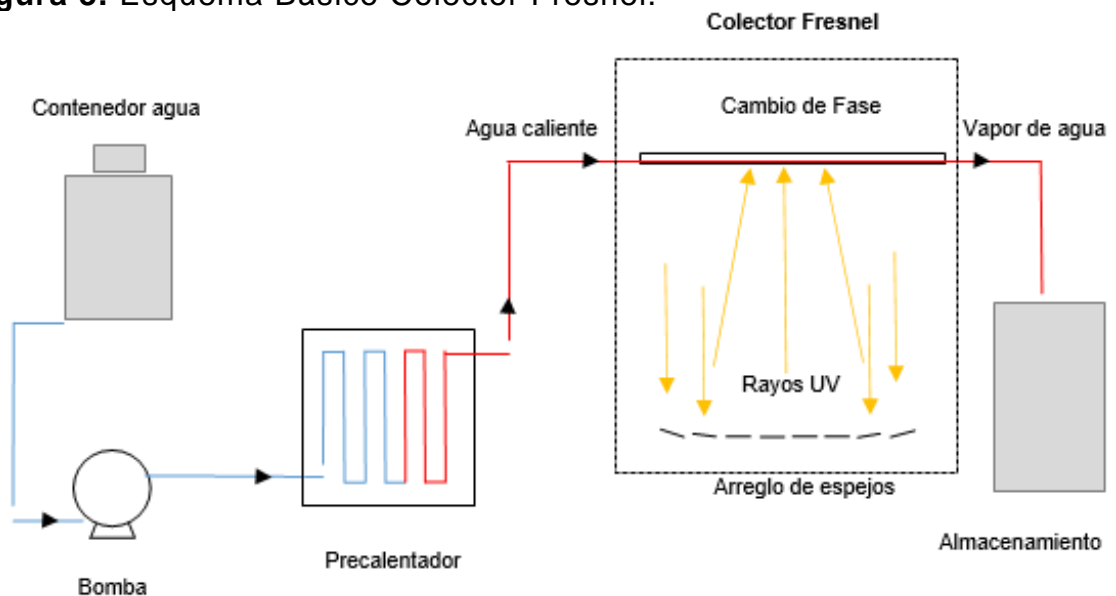
9. DESARROLLO DE TRABAJO DE GRADO

9.1. CONDICIONES INICIALES DEL PROTOTIPO LFC

El prototipo de colector Lineal Fresnel a investigar en este trabajo, fue diseñado y construido por el Docente Investigador Brayan Eduardo Tarazona Romero adscrito al Grupo de Investigación en sistemas de control, automatización y control GISEAC de las Unidades Tecnológicas de Santander, en el marco de su desarrollo de Tesis Doctoral en la UPV-EHU, de España. [16]

9.1.1. Esquema de funcionamiento colector Fresnel lineal. Para identificar el funcionamiento del sistema se basó en una búsqueda por varias fuentes dentro de las cuales destacaron autores previamente mencionados como: [52] en su tesis de grado titulada, “*Concentrador solar tipo Fresnel lineal para producir vapor de agua*”, [53] en su trabajo llamado, “*Modelación y simulación del comportamiento térmico de un receptor solar de media temperatura tipo Fresnel de geometría trapezoidal*”, quienes plantean la idea aplicativa del colector Fresnel y por lo cual se termina deduciendo un esquema que represente al sistema de la siguiente manera:

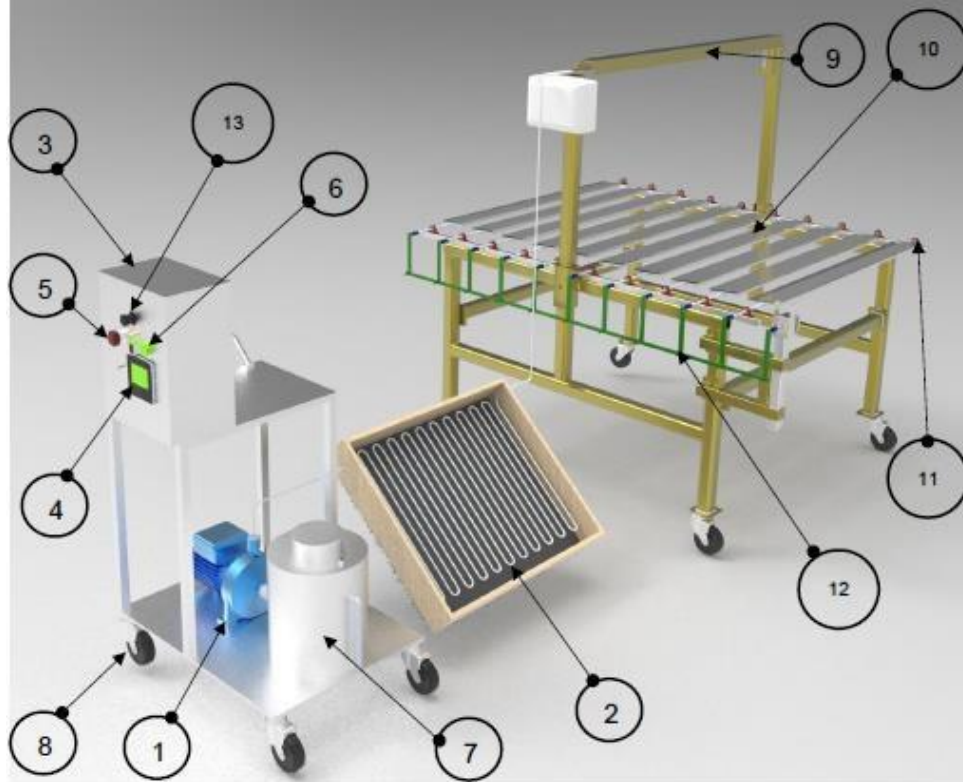
Figura 3. Esquema Básico Colector Fresnel.



Fuente. Tomado de [54]

9.1.2. Componentes del sistema LFC

Figura 4. Elementos del sistema LFC.



Fuente. Tomado de [54]

Tabla 2. Elementos y Descripción CFL.

| Número del elemento | Nombre elemento | Cantidad | Descripción |
|---------------------|--------------------|----------|---|
| 1 | Bomba CPM158 | 1 | Bomba centrífuga de ¼ HP, monofásica |
| 2 | Espira Solar | 1 | Precalentador |
| 3 | Tablero de Control | 1 | Contiene los elementos de control, encendido y parada de emergencia |

Tabla 3. Elementos y Descripción CFL. (Continuación)

| Número del elemento | Nombre elemento | Cantidad | Descripción |
|----------------------------|----------------------------------|-----------------|--|
| 4 | PLC | 1 | Controla el funcionamiento y procesa los datos del Colector |
| 5 | Parada de Emergencia | 1 | Sistema de apagado forzado |
| 6 | Luz Indicadora de Encendido | 1 | Señalización lumínica del encendido del equipo |
| 7 | Tanque de Almacenamiento | 1 | Contenedor del líquido |
| 8 | Llantas | 8 | Pieza para el traslado o movimiento del equipo |
| 9 | Estructura del Colector Fresnel | 1 | Armazón en acero inoxidable |
| 10 | Espejos y Base Porta-espejo | 10 | Elementos de reflexión solar |
| 11 | Sistema de movimiento de Espejos | 1 | Elementos que permiten el movimiento de los espejos |
| 12 | Sistema de Seguimiento Solar | 1 | Elementos que guían a los espejos respecto a la posición del sol |
| 13 | Interruptor ON/OFF | 1 | Permite el encendido y apagado del equipo |

Fuente: Tomado de [54]

El prototipo construido se basa en cuatro componentes principales [16]:

- Bases reflectores o espejos
- Tubos receptores
- Cavity Trapezoidal. Sirve como segundo reflector- Lámina Galvanizada Calibre 20, Longitud 1.2 m, altura 0.035 m y 0.12 m de ancho. Incluye vidrio transparente para reducir pérdidas de transferencia de calor (Ver Figura 13)
- Sistema precalentamiento (Serpentín – Suministra temperaturas a la entrada del colector en un rango de 30 a 60°C- Diámetro 0.00635 m, 18 tubos en paralelo, Aluminio)

9.1.3. Dimensiones y parámetros del sistema LFC. Se muestran a continuación, las características ópticas y geométricas iniciales más importantes del colector Fresnel, clasificadas conforme al sistema de reflexión primario y secundario, sobre las cuales parte el proyecto, algunos de estos parámetros y características serán modificados durante el desarrollo del mismo todo esto con el fin de evidenciar los cambios realizados a través del presente proyecto. Por lo cual observamos a continuación una imagen real del colector Fresnel, tomada al inicio del proyecto

Figura 5. Colector Fresnel en condiciones iniciales.



Fuente. Tomado de [16]

9.1.3.1. Sistema de reflexión primario. Por medio de la siguiente Tabla 4 y Tabla 5 se presentan, parámetros y características importantes de las condiciones iniciales del prototipo LFC, referentes al sistema de reflexión primario, el cual corresponde a la columna de espejos planos orientados de manera paralela a la cavidad receptor.

Tabla 4. Parámetros iniciales del sistema de reflexión primario.

| Parámetro | Descripción |
|-------------------------------|--------------------|
| Longitud focal del Sistema | 0.75 metros |
| Área del Espejo | 0.1 m ² |
| Numero de espejos | 10 espejos |
| Separación de los espejos | 0.15 metros |
| Longitud total de los espejos | 1.5 metros |

Fuente. Tomado de [54]

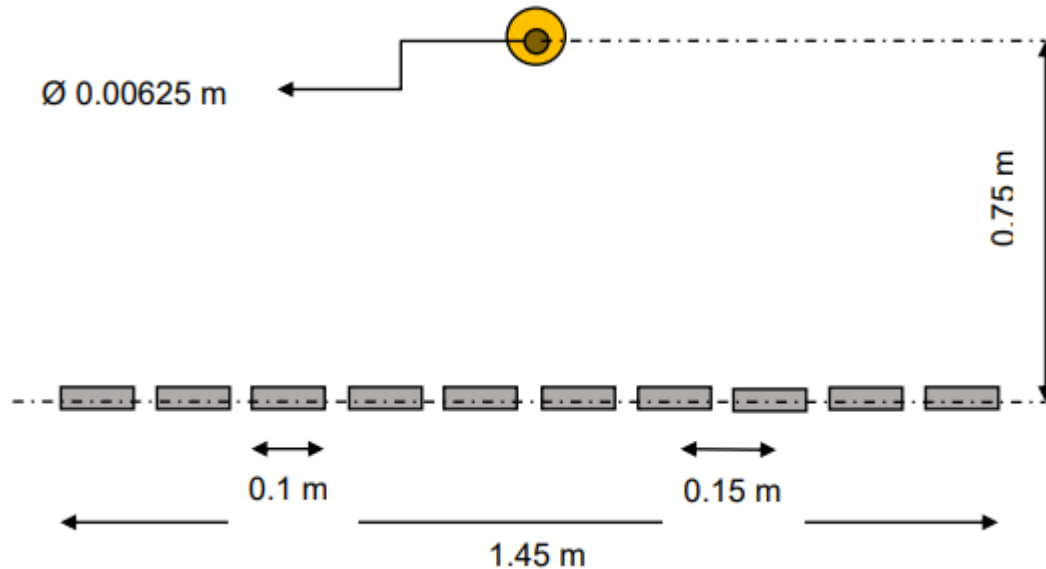
Tabla 5. Características ópticas del componente reflector

| Propiedad | Dimensión |
|--|-----------|
| Factor de absorción de los tubos de cobre (α) | 0.8 |
| Factor reflectancia del espejo reflectante (ρ_m) | 0.712 |
| Emisividad del tubo absorbente (ϵ_{Ab}) | 0.12 |
| Coeficiente de absorción de la superficie selectiva Adecuada | 0.93 |

Fuente. Tomado de [16]

Lo anterior se representa mejor en la siguiente figura:

Figura 6. Detalle de dimensiones.



Fuente. Tomado de [54]

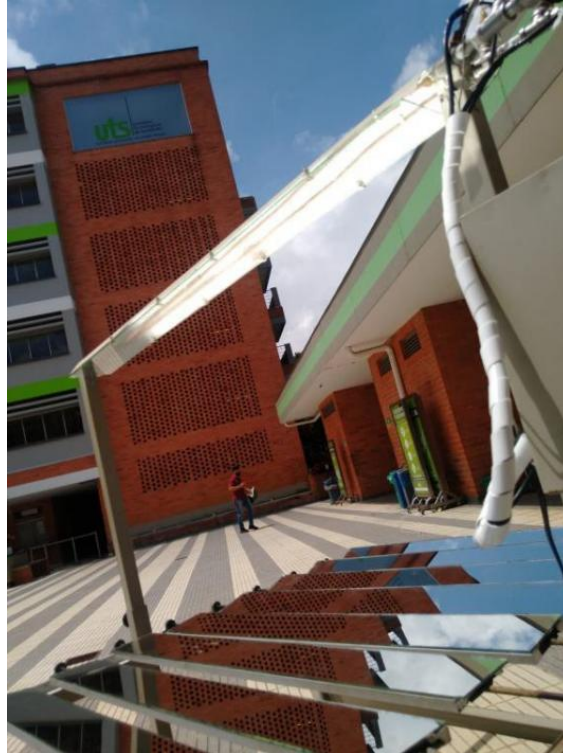
9.1.3.2. Sistema de reflexión secundaria. A continuación, se presenta en la siguiente tabla, los parámetros más relevantes del sistema de reflexión secundaria implementado inicialmente en el prototipo LFC, lo cual hace referencia al sistema que contiene el tubo absorbedor en la parte superior.

Tabla 6. Parámetros iniciales del sistema de reflexión secundaria.

| Parámetro | Descripción |
|------------------------|-------------------------------|
| Material | Lámina galvanizado calibre 20 |
| Largo | 1.2 metros |
| Altura | 3.5 centímetros |
| Ancho | 13 centímetros |
| Material de tubo | Cobre |
| Forma del tubo | Tubo en U |
| Diámetro del tubo | 1/4 de pulgada |
| Sistema de aislamiento | Fibra de vidrio |

Fuente. Tomado de [54]

Figura 7. Sistema reflexión secundario.



Fuente. Tomado de [16]

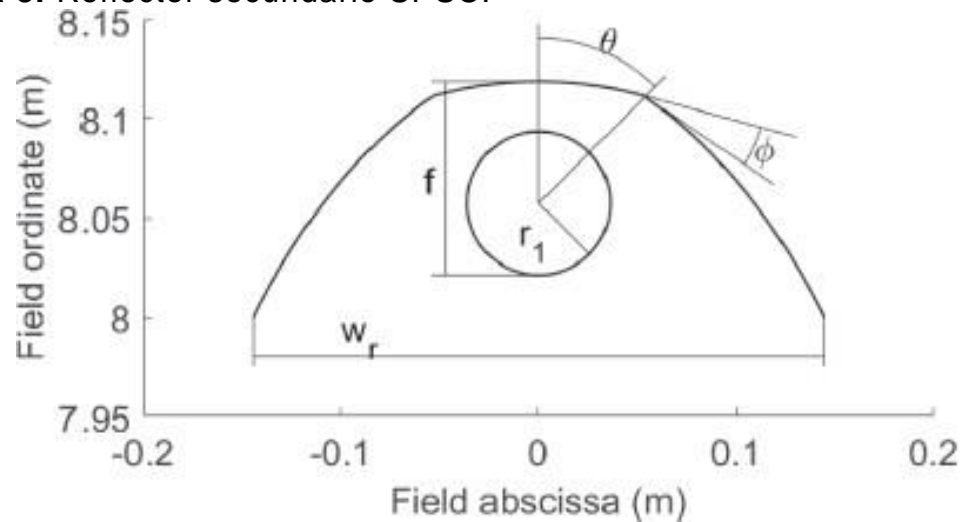
9.2. SELECCIÓN DEL NUEVO SISTEMA DE REFLEXIÓN SECUNDARIO

El primer cambio planteado para mejorar la eficiencia del sistema LFC es cambiar su sistema de reflexión secundario por uno adecuado que aumente su eficiencia óptica. Una de las características más importantes, en el funcionamiento de un colector solar Fresnel, corresponde a la eficiencia óptica del sistema, puesto que, nos permite saber si la cantidad de rayos solares, que inciden en el sistema de reflexión primario están siendo correctamente reflejados hacia el tubo absorbedor, debido a que una importante cantidad de rayos se desvían de su objetivo, lo cual puede ser causado por la diferencia entre el punto óptico enviado por el reflector primario y el diámetro del receptor, siendo este último de menor tamaño. Por lo cual es de vital importancia disponer de un sistema de reflexión secundario, que permita reducir el número de rayos que no inciden directamente en el tubo absorbedor, de manera que éstos sean redirigidos hacia su objetivo [55].

Dadas las condiciones anteriormente mencionadas, se lleva a cabo la selección del sistema de reflexión secundario, que permita el mejoramiento de la eficiencia del prototipo de colector lineal Fresnel en estudio, ya que corresponde a la solución más práctica al problema en cuestión.

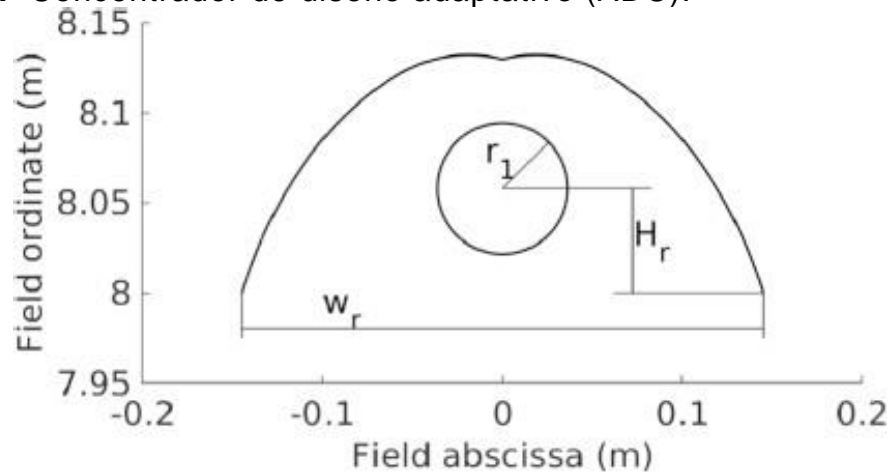
Un reflector secundario puede definirse de manera simple, como una superficie reflectiva, que posee una forma geométrica definida, que permite redirigir los rayos que no inciden en el tubo absorbedor, pero dicha forma geométrica, es fundamental para el aumento del rendimiento óptico de los colectores solares [55]. Se compararon diferentes formas de reflectores secundarios, más concretamente el concentrador parabólico compuesto, el concentrador de diseño adaptativo y el concentrador secundario parabólico segmentado (CPC). De tal forma, según su diseño, podemos encontrar los siguientes tipos de reflectores secundarios utilizados en sistemas LFC.

Figura 8. Reflector secundario SPSC.



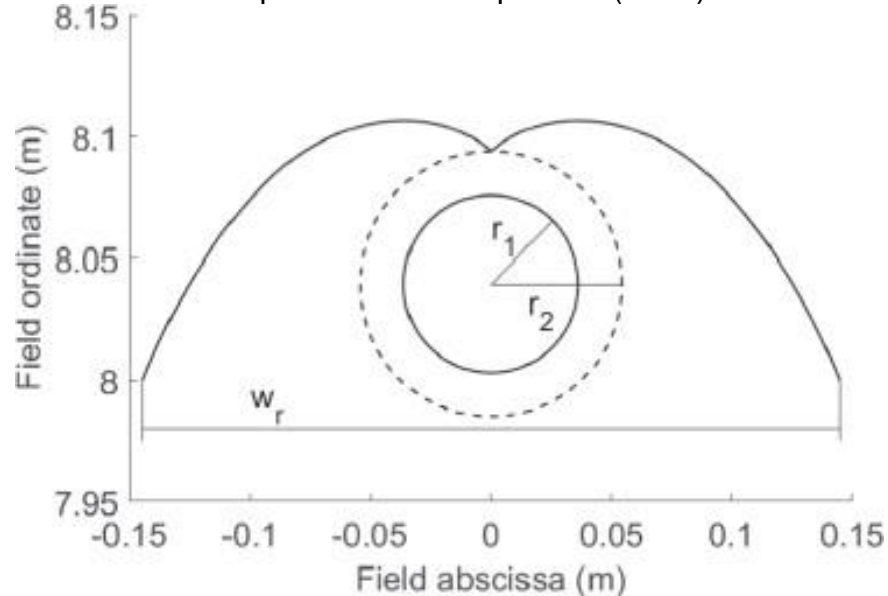
Fuente. Tomado de [57]

Figura 9. Concentrador de diseño adaptativo (ADC).



Fuente. Tomado de [57]

Figura 10. Concentrador parabólico compuesto (CPC).



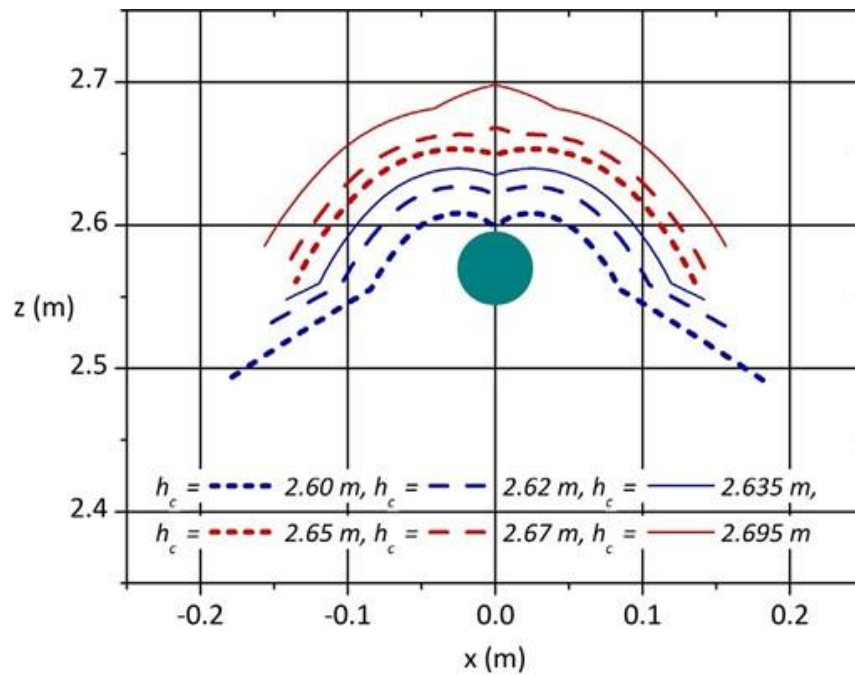
Fuente. Tomado de [57]

En este trabajo, se compararon diferentes formas de reflectores secundarios para colectores lineales de Fresnel, más específicamente concentradores parabólicos compuestos, concentradores de diseño adaptativo y concentradores secundarios parabólicos segmentados, con el objetivo de mejorar la eficiencia y la intensidad de flujo en el tubo absorbente. Sólo se han estudiado los concentradores secundarios que no requieren un cambio en el campo de los espejos primarios. De este estudio se puede concluir que el concentrador secundario parabólico segmentado (SPSC) no parece competitivo con el CPC y el ASC, ya que en todos los casos se consiguen eficiencias más bajas para las mismas especificaciones ópticas

Al comparar el CPC con el ADC se encuentran muy pocas diferencias. La mayor diferencia es que cuando hay radiaciones más bajas, el ADC alcanza mayores eficiencias y allí no tiene importancia el vacío entre el tubo absorbente con la parte reflectiva, en cambio para radiaciones más altas el CPC logra mayores eficiencias, y allí sí importa el vacío entre el tubo absorbente y la parte reflectiva, ya que entre menor sea la distancia entre ellos, mejor es la eficiencia del sistema. [55]

En este estudio de trazado de rayos, se muestra en la Figura 11, las formas optimizadas del reflector secundario en función de la distancia entre el tubo absorbente y la cavidad reflectiva, donde se puede apreciar, que a menor distancia observamos un perfil de tipo concentrador parabólico compuesto (CPC), y a medida que esta distancia aumenta, la curva disminuye, hasta llegar a una curva simple lineal, y en los extremos la curva inicial se invierte [55]

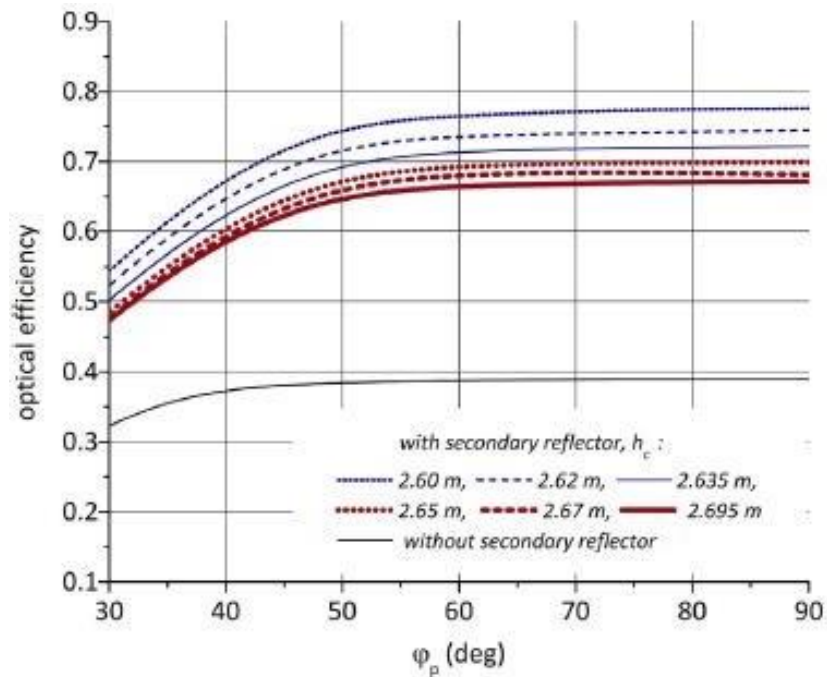
Figura 11. Formas optimizadas de reflector secundario.



Fuente. Tomado de [55]

También cabe destacar, que a medida que aumenta la distancia entre el reflector y el tubo absorbedor, hay una disminución en la eficiencia óptica del sistema, ya que la cantidad de rayos que inciden directamente en el tubo absorbedor es menor. Lo cual indica, que el perfil que se encuentra a menor distancia del receptor, es decir el tipo CPC, produce un mayor rendimiento óptico, tal como se observa en la figura 12, donde además se evidencia la importancia de implementar un adecuado sistema de reflexión secundario, ya que la eficiencia óptica mostrada para un sistema LFC sin reflector secundario, es significativamente menor a los perfiles de reflector estudiados [55].

Figura 12. Eficiencia óptica en función del ángulo de perfil.



Fuente. Tomado de [55]

Dadas las características y condiciones mencionadas anteriormente, sobre los diferentes tipos de reflectores secundarios, se opta por implementar el sistema de reflexión tipo CPC, al prototipo de sistema LFC desarrollado por el grupo de investigación GISEAC, ya que representa el sistema de reflexión secundario de mayor eficiencia y de mayor uso en la industria de la tecnología termosolar.

9.3. SISTEMA DE REFLEXIÓN SECUNDARIO NUEVO

El diseño del sistema de reflexión secundario, tomado como referencia de [56], se llevó a cabo a través del concepto de tecnología apropiada, de tal manera que los elementos y materiales seleccionados para la implementación de dicho sistema, se adecúen a las condiciones del prototipo de sistema LFC. Este sistema fue tomado con referencia para implementar unos cambios en sus dimensiones geométricas de acuerdo a los resultados de las simulaciones.

9.3.1. Materiales y Diseño. El sistema de reflexión secundario se encuentra conformado principalmente por una cavidad reflectora tipo CPC, el tubo absorbedor o receptor, material de aislamiento térmico y una cubierta transparente.

Conformado por la cavidad reflectora tipo CPC que tiene un material con buenas características reflectivas, que garanticen dicha redirección de rayos solares hacia el tubo receptor, donde es el acero inoxidable debido a su buena reflectividad, disponibilidad en la ciudad de Bucaramanga, costo accesible y por sus características estructurales, que se acomodan al perfil tipo CPC, dada la complejidad de sus curvas. El material de aislamiento térmico corresponde a la lana de vidrio, dadas sus buenas características de baja conductividad térmica y su excelente adaptabilidad a la superficie donde es instalado, siendo este el material más común usado en colectores solares. La cubierta inferior transparente tiene alta transmisividad con un un espesor de 4 mm [56]

Se muestra en la siguiente tabla, las principales propiedades de dichos materiales.

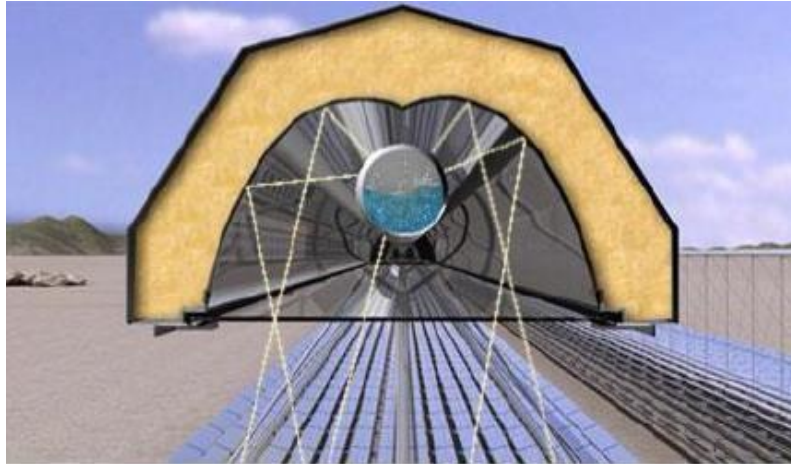
Tabla 7. Propiedades de los materiales seleccionados.

| Propiedad | Absorbedor de cavidades | Aislamiento | Cubierta de vidrio |
|---|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Material | Acero inoxidable 430 acabado espejo | Lana de fibra de vidrio | Vidrio común de 4 líneas |
| Densidad (kg/m³) | 7700 | 20 | 2700 |
| Calor específico (J/ (Kg x °K)) | 460 | 795 | 833 |
| Conductividad térmica (W/ (M x°K)) | 27 | 0,04 | 0,8 |
| Transmisividad | | | 0,87 |

Fuente. Adaptado de [59]

Las dimensiones del sistema de reflexión secundario, están basadas en las condiciones iniciales del prototipo LFC, descritas anteriormente, de tal manera que no se vieran afectadas las condiciones de diseño, realizadas por el grupo de investigación GISEAC de las UTS. Adicionalmente a esto, el diseño se basa en el modelo propuesto por Novatec Solar, el cual se muestra en la Figura 13.

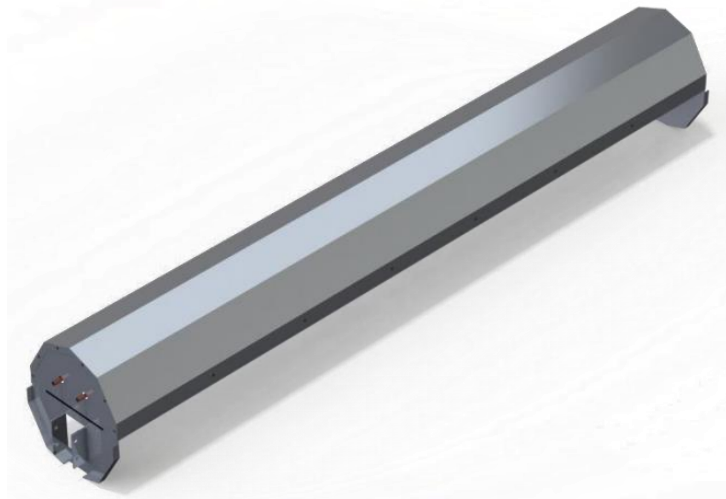
Figura 13. Sección transversal de receptor con cavidad CPC. Modelo Novatec Solar.



Fuente. Tomado de [60].

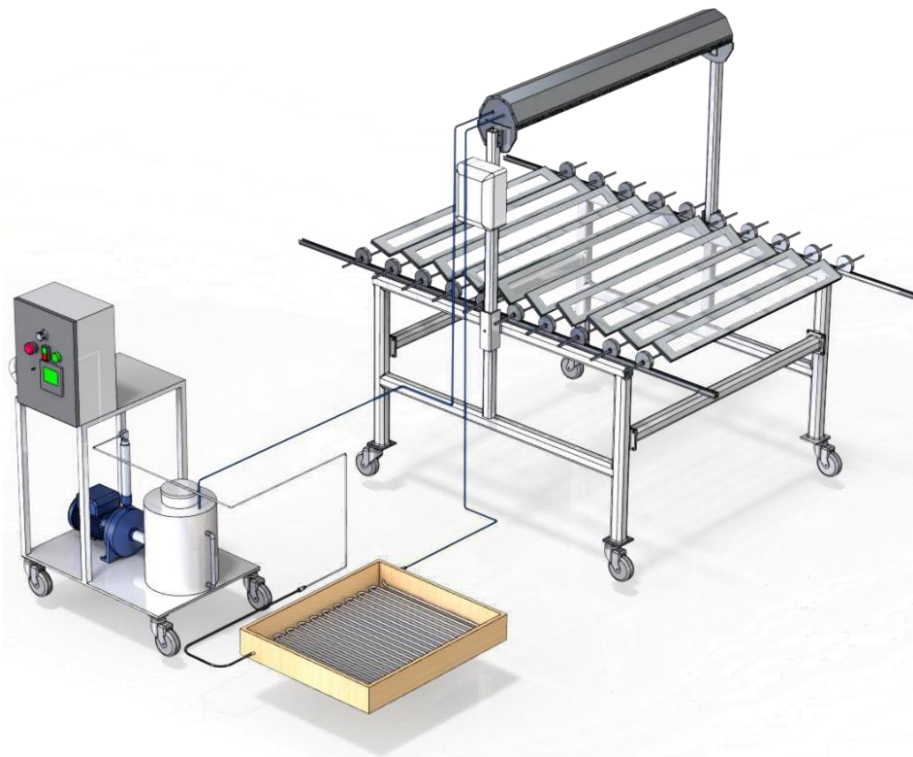
A continuación, se muestra el diseño del nuevo reflector secundario que fue tomado como base para la simulación de diferentes escenarios en los cuales, se hace un cambio en sus dimensiones, dependiendo de cada longitud del espejo simulado.

Figura 14. Imagen renderizada del reflector secundario.



Fuente. Tomado de [56]

Figura 15. Imagen renderizada del sistema LFC.



Fuente. Tomado de [56]

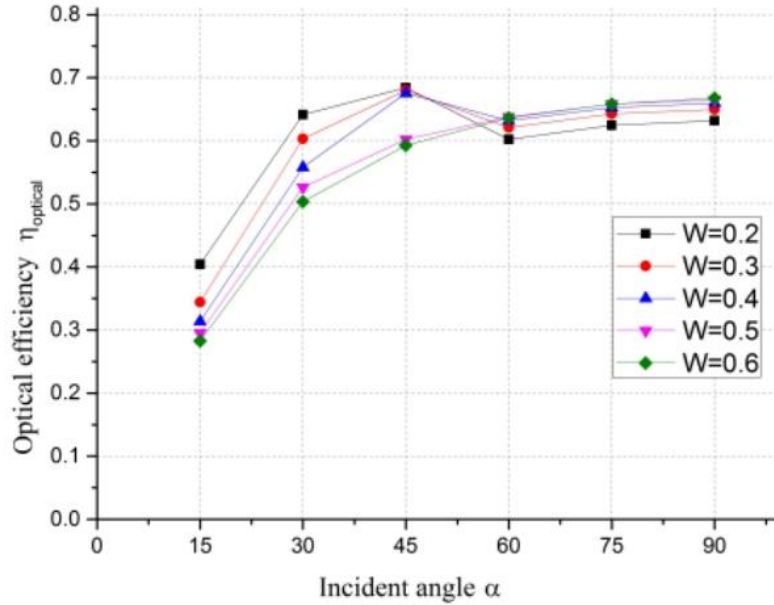
9.4. SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS A VARIAR DEL SISTEMA DE REFLEXIÓN PRIMARIO

Es importante saber que el análisis óptico de un colector es puramente geométrico debido a que las direcciones de los rayos solares y los fenómenos considerados (reflexión y refracción de los rayos solares) son independientes de los valores de la radiación solar. Por eso la eficiencia depende de factores como: El ancho y longitud del espejo, separación entre espejos, el ancho del receptor, la altura del receptor, la distancia focal de los espejos primarios y forma geométrica del reflector secundario, la posición del sol, la latitud de la ubicación y el número de espejos paralelos. Además, la eficacia óptica depende de muchos factores, como el error de seguimiento, el error geométrico y las imperfecciones de la superficie. [61]

9.4.1. Variación del ancho y la separación del espejo reflector. En el sistema reflector primario, los parámetros a variar son el ancho del espejo y la longitud del espejo debido a que según un estudio de [62] identifica que en el reflector primario la anchura del espejo afecta ligeramente a la eficiencia óptica y tiene un gran efecto sobre la eficiencia del sombreado, ya que disminuye rápidamente con el aumento

de la anchura del espejo como se evidencia en la Figura 16. Esto indica que el sombreado y el bloqueo es un problema muy importante a tener en cuenta.

Figura 16. Relación entre la eficacia óptica y la anchura del espejo.

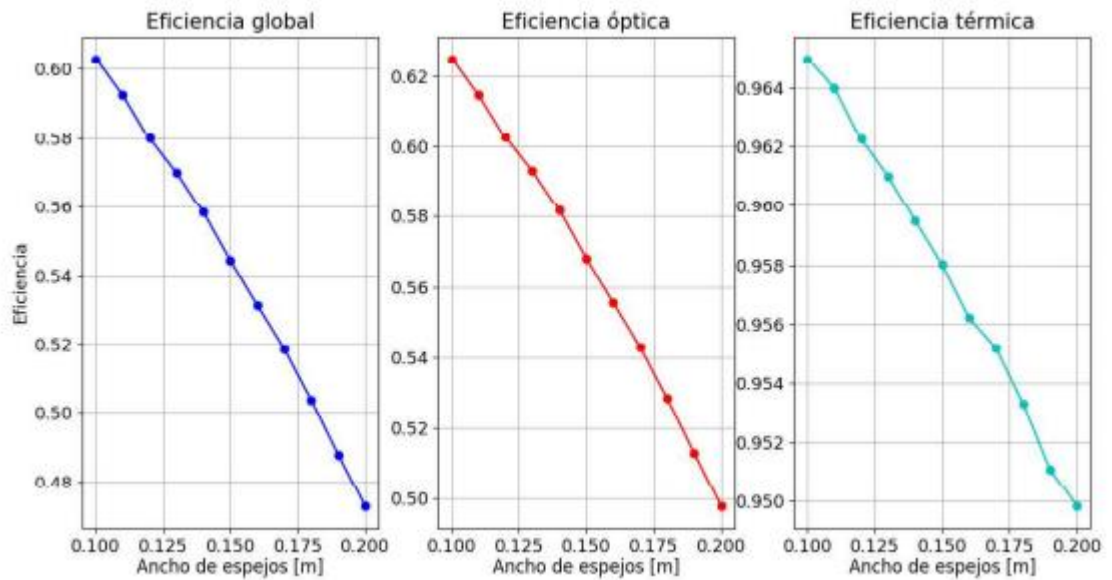


Fuente. Tomado de [62]

También [63] hicieron un estudio analítico del proceso de concentración de la radiación en un colector lineal de Fresnel para ayudar a mejorar la eficiencia del sistema. En este estudio concluyen que se ha visto que hay diferentes razones que conducen a errores en la dirección del haz reflejado, con un efecto diferente según la anchura y la ubicación del espejo. Además, los efectos de sombreado y bloqueo entre espejos vecinos dependen también de dichas variables. Por lo tanto, la anchura y el desplazamiento de los espejos pueden variar a lo largo del campo mejorando la eficacia del sistema.

Y, en el artículo [64], se estudió el comportamiento óptico y térmico de un colector lineal Fresnel con receptor trapezoidal, donde se demostró que el ancho del espejo afectó la eficiencia del sistema, como lo muestra la siguiente figura :

Figura 17. Eficiencia del LFC variando el ancho de los espejos.



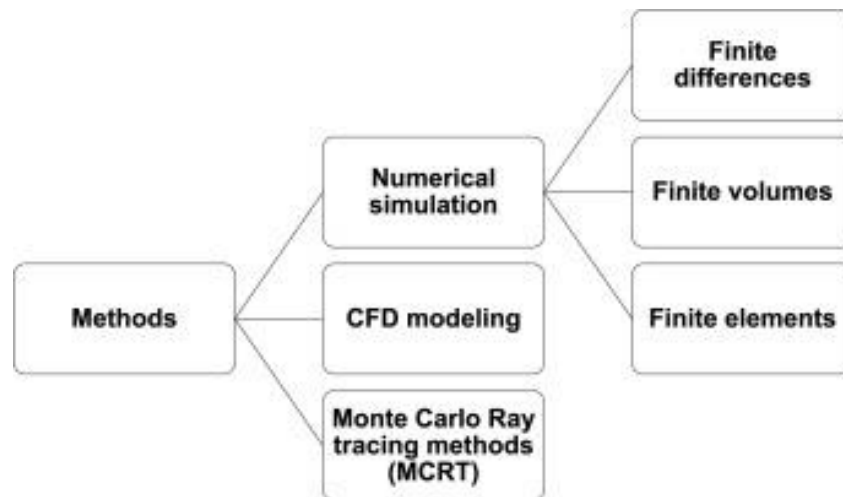
Fuente. Tomado de [64]

Mientras mayor es el ancho de los reflectores primarios, mayor cantidad de radiación solar se transfiere a la cavidad receptora, sin embargo, esto conlleva a que la eficiencia óptica caiga de 0,65 a 0,49 debido a que las pérdidas por rayos perdidos incrementan rápidamente.

Adicionalmente, unas de las propiedades ópticas para mejorar el rendimiento óptico del prototipo, es la reflectancia, debido a que su composición mejora esa capacidad de reflexión de los rayos, según [65] después de un ensayo con 4 tipos de espejos diferentes en composición y grosos para medir su reflectancia, el espejo adecuado que presenta los mayores valores de reflectancia sería un vidrio blanco de alta transparencia con 4mm de espesor y soporte de vidrio con bajo contenido de hierro. Este espejo se va a tomar como base de referencia

9.4.2. Simulaciones Ópticas del LFC. La determinación del rendimiento óptico de los sistemas LFC requieren una precisión alta basada en modelos de predicción, a partir del cual se pueden determinar los coeficientes ópticos (influencia Angulo de incidencia IAM, perfil forma del sol, relación de concentración, sombreado y errores del reflector). En base en esto, este estudio óptico dependerá de 2 programas que se basan el método MCRT y una simulación numérica para determinar el comportamiento óptico del dispositivo [66] (Ver Figura 18). Las herramientas son:

Figura 18. Métodos adoptados en el modelado óptico y térmico de colectores solares LFRs.



Fuente. Tomado de [66]

SolTrace: se basa en el método MCRT, requiere el uso de un plugin con el software Google Sketchup, para obtener las coordenadas geográficas y la geometría del sistema LFC a modelar (El software permite crear directamente a la geometría en su interfaz gráfica de trabajo). Permitiendo estimar la intensidad y la distribución del flujo térmico producto de la radiación solar absorbida por los tubos y reflejada por los espejos y de las dimensiones de ingeniería de los componentes del dispositivo. [66]

- Tonatiuh: se basa en el método MCRT, la interfaz gráfica permite crear la geometría del sistema y las coordenadas geográfica del modelado. Permitiendo estimar la intensidad y la distribución del flujo térmico producto de la radiación solar absorbida por los tubos y reflejada por los espejos y de las dimensiones de ingeniería de los componentes del dispositivo.
- Matlab (Programación numérica): para determinar el efecto de las dimensiones de los componentes en la ubicación de los componentes del dispositivo, ya que la ubicación correcta de los espejos reflectantes y el tubo de cobre y las dimensiones correctas de los espejos reflectantes ayudará a aumentar la eficiencia óptica del dispositivo, que aumenta la eficiencia térmica de instalación. [66]

9.4.2.1. Escenarios de la simulación óptica. Las simulaciones se realizaron en los softwares de simulación Soltrace, Tonatiuh y Matlab para evaluar el comportamiento de la eficiencia óptica con el nuevo reflector secundario tipo CPC y a su vez evaluar diferentes escenarios en el sistema reflector primario variando parámetros geométricos como el ancho y la longitud del espejo para comparar sus valores de eficiencia óptica y presentar una mejora geométrica en el sistema reflector primario y secundario con respecto al prototipo actual.

Para las siguientes simulaciones, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

a. En todos los escenarios de esta simulación, se evaluó el efecto de la propuesta de mejora del reflector secundario tipo CPC (concentrador parabólico compuesto), el cual reemplazara el reflector secundario de cavidad trapezoidal que tiene el prototipo original.

b. Se plantearon los siguientes escenarios de simulación el sistema reflector primario variando el ancho y la longitud del espejo:

- Escenario con reflectancia de 0.712 contiene 9 simulaciones que serán simuladas en 3 software diferente.

Los valores de las variaciones ancho del espejo fueron establecidos en pequeños cambios con el objetivo de mantener el concepto de tecnología apropiada. El largo del espejo varía de 1 metro a 1.8 metros ya que son rangos permitidos que se pueden adaptar al sistema LFC real construido tomado como estudio de este proyecto, basándose en el objetivo de sistemas artesanales de fácil construcción y manufactura, materiales económicos y bajos costos, y su adaptabilidad al entorno local. Debido a esto, se estableció como limite máximo un largo de 1.8 metros en el espejo y un ancho de 0.12 metros para las simulaciones.

Tabla 8. Escenario de simulación con reflectancia 0.712.

| Número de simulación | DNI (W/m ²) | Reflectancia | Ancho del espejo (m) | Separación entre espejos (m) | Longitud del espejo (m) | |
|----------------------|-------------------------|--------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|-----|
| 10 | 600 | 0,712 | 0,08 | 0,12 | 1 | |
| 11 | | | | | 1,4 | |
| 12 | | | | | 1,8 | |
| 13 | | | 0,1 | 0,15 | 0,15 | 1 |
| 14 | | | | | | 1,4 |
| 15 | | | | | | 1,8 |
| 16 | | | 0,12 | 0,18 | 0,18 | 1 |
| 17 | | | | | | 1,4 |
| 18 | | | | | | 1,8 |

Fuente. Elaboración propia.

- Escenario con reflectancia de 0.92 contiene 9 simulaciones que serán simuladas en 3 software diferente.

Tabla 9. Escenario de simulación con reflectancia 0.92.

| Número de simulación | DNI (W/m ²) | Reflectancia | Ancho del espejo (m) | Separación entre espejos (m) | Longitud del espejo (m) |
|----------------------|-------------------------|--------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|
|----------------------|-------------------------|--------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|

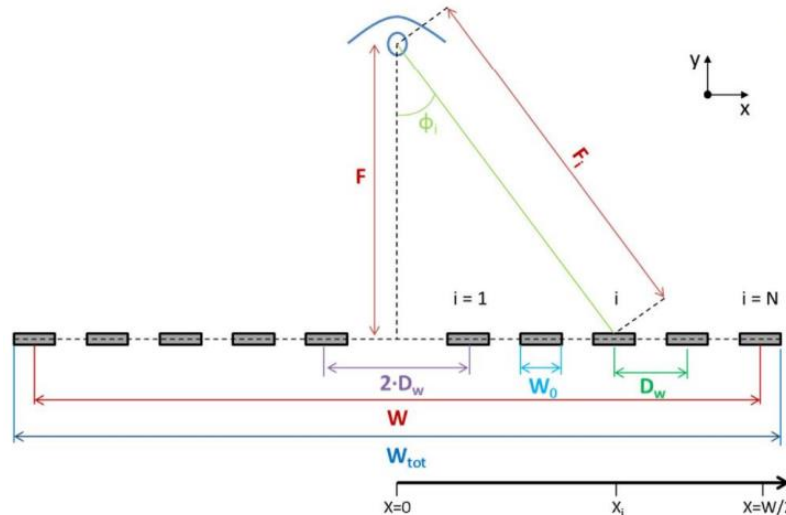
| | | | | | |
|---|-----|------|------|------|-----|
| 1 | | | | | 1 |
| 2 | | | 0,08 | 0,12 | 1,4 |
| 3 | | | | | 1,8 |
| 4 | | | | | 1 |
| 5 | 600 | 0,92 | 0,1 | 0,15 | 1,4 |
| 6 | | | | | 1,8 |
| 7 | | | | | 1 |
| 8 | | | 0,12 | 0,18 | 1,4 |
| 9 | | | | | 1,8 |

Fuente. Elaboración propia.

9.5. ANÁLISIS DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

9.5.1. Análisis geométrico del sistema. La geometría bidimensional simplificada del LFC examinado se presenta en la Figura 19 con detalles. Este LFC tiene espejos primarios planos con una anchura (W_0) y la distancia entre los espejos (D_w). La distancia focal (F) y la distancia de cada espejo (F_i) y el ángulo de posición (φ_i) son también parámetros importantes del colector.

Figura 19. El reflector Fresnel lineal examinado.



Fuente. Tomado de [67]

La apertura del colector viene dada por la siguiente ecuación

$$A_{ac} = W_0 * N * L$$

Ecuación 1

Donde, A_{ac} es la apertura total del colector, W_0 es el ancho de los espejos y N hace referencia al número de espejos primarios en un lado

La separación entre espejos es

Ecuación 2

$$D_w = 3 * W_0 / 2$$

La anchura del colector (W) es la distancia entre los centros de los espejos en el lado derecho y en el izquierdo. En total hay $2N$ espejos. El parámetro (W) se calcula como [67].

Ecuación 3

$$W = 2 * N * D_w$$

9.5.2. Análisis óptico del sistema a través del IAM. El objetivo principal del análisis óptico es determinar la cantidad de energía de los rayos solares reflejada por los espejos e interceptada por el receptor en cualquier posición del sol. La relación entre la energía solar absorbida por el receptor y la energía solar que incide en los reflectores es la eficiencia óptica. Al igual que otros colectores de concentración lineal, como los PTC, el análisis del rendimiento óptico de un sistema LFC puede evaluarse estudiando y analizando la influencia de los fenómenos más importantes. Éstos son el ensombrecimiento por parte del receptor y los reflectores adyacentes, el bloqueo por parte de los reflectores adyacentes, el error de inclinación de los reflectores, el derrame de la radiación solar reflejada en el receptor, los errores de seguimiento del sol y las características del material. En consecuencia, el análisis óptico desempeña un papel importante en el diseño de los sistemas LFC. [61]

La eficiencia óptica de los colectores lineales de Fresnel es una función de las dimensiones, los parámetros de diseño, las propiedades de los materiales y los efectos ambientales. Las eficiencias debidas a los efectos ambientales no se consideran aquí porque son difíciles de parametrizar.

La eficiencia óptica en incidencia normal en reflectores perfectamente limpios que no están sombreados y la radiación solar reflejada no está bloqueada viene dada por la Ecuación 4 [68].

Ecuación 4

$$\eta_{opt} = \alpha * \rho_m * \gamma * K_t(\theta_t) * K_l(\theta_l)$$

$K_l(\theta_l)$: El coeficiente longitudinal del modificador del ángulo de incidencia.

$K_t(\theta_t)$: El coeficiente transversal del modificador del ángulo de incidencia.

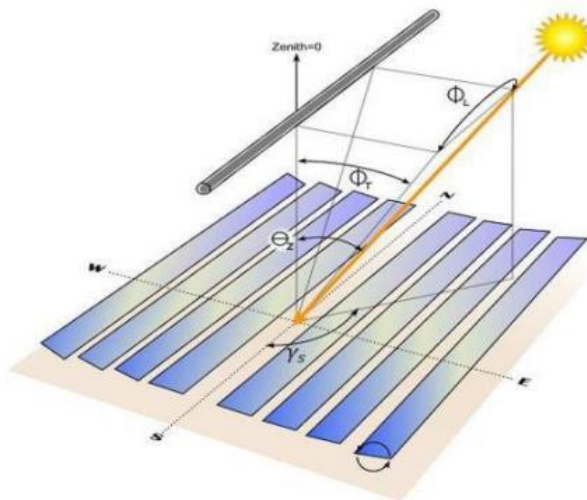
El factor de intersección " γ ": Representa la relación entre la energía interceptada por el tubo absorbente y la reflejada por las superficies reflectantes efectivas, su valor para el caso de este estudio es de 0.95.

α : Coeficiente de absorción de superficie selectiva adecuada o absorbanza del receptor.

ρ_m : Coeficiente de reflectancia del espejo.

9.5.2.1. Modificador del ángulo de incidencia (IAM). Un colector lineal de Fresnel alcanza la máxima eficiencia óptica en caso de incidencia normal y hay una disminución del rendimiento óptico en la incidencia no normal debido a la dependencia de las propiedades ópticas del colector en la dirección de los rayos solares incidentes. Por lo tanto, el IAM se utiliza para corregir el rendimiento del colector en incidencia normal a direcciones no normales (Bello y Tzivanidis, 2018). En el caso de LFC, se requiere un IAM biaxial, es decir, uno para el ángulo de incidencia transversal (θ_t) y otro para el longitudinal (θ_l) como se muestra en la Figura 20 [67].

Figura 20. Ángulo de incidencia transversal y longitudinal para LFC.



Fuente. Tomado de [69]

La relación entre θ_t , el acimut solar (γ_s) y la altitud solar (φ_{lat}) para la orientación Norte-Sur se muestra en la Ecuación 5 y para θ_l por la Ecuación 6 [70].

Ecuación 5

$$\tan(\theta_t) = \sin(\gamma_s) * \tan \theta_z$$

Ecuación 6

$$\tan(\theta_t) = \cos(\gamma_s) * \tan \theta_z$$

El ángulo cenital (θ_z), llamado así porque el campo solar LFR puede asumirse como un plano horizontal se puede encontrar a partir de la relación dada por [70]:

Ecuación 7

$$\cos(\theta_z) = \cos(\varphi_{lat}) * \cos(\delta) * \cos(\omega_{time}) + \sin(\varphi) * \sin(\delta)$$

En el cálculo anterior se utiliza la latitud (φ_{lat}), el ángulo de declinación solar (δ) y la hora solar (ω_{time}). El ángulo de declinación solar (δ) se puede calcular como [70]:

Ecuación 8

$$\delta = 23.45^\circ * \sin \left[360^\circ * \frac{284 + N_{day}}{365} \right]$$

Donde N_{day} es el número del día del año.

El ángulo horario solar (ω_{time}) se puede calcular como

Ecuación 9

$$\omega_{time} = 15^\circ * [t_{hours} - 12]$$

Donde el (t_{hours}) es el tiempo solar medido en horas.

Al final, el ángulo azimutal solar (γ_s) se puede calcular a partir de la siguiente expresión [70]:

Ecuación 10

$$\gamma_s = \frac{\cos(\delta) * \sin(\omega_{time})}{\sin(\theta_z)}$$

El IAM se determina tomando el producto de dos componentes [70] como se muestra en la Ecuación 11.

Ecuación 11

$$IAM(\theta_t, \theta_l) = IAM(\theta_l, 0) * IAM(0, \theta_t)$$

El IAM es un parámetro complejo y su cálculo suele requerir un software de trazado de rayos como Tonatiuh o Soltrace. Se trata de un proceso intensivo desde el punto de vista computacional, ya que el método se basa en la generación de un gran número de vectores (rayos) y el cálculo de su interacción con los materiales ópticos. Sin embargo, el modelo desarrollado por Bellos y Christos [67] muestra que el IAM se puede calcular analíticamente con una precisión razonable. El modelo se desarrolla para espejos planos que desprecia la existencia de curvatura en el campo del espejo primario.

El modelo analítico tiene en cuenta las siguientes pérdidas ópticas: Pérdidas de coseno, pérdidas por sombreado, pérdidas por bloqueo.

El IAM transversal puede expresarse como [67]:

Ecuación 12

$$K_t(\theta_t) = \begin{cases} \cos\left(\frac{\theta_t}{2}\right) - \frac{\frac{W}{4}}{F + \sqrt{F^2 + \left(\frac{W}{4}\right)^2}} \sin\left(\frac{\theta_t}{2}\right), & \text{Cuando } \theta_t < \theta_{t,crit} \\ \left[\cos\left(\frac{\theta_t}{2}\right) - \frac{\frac{w}{4}}{F + \sqrt{F^2 + \left(\frac{W}{4}\right)^2}} \sin\left(\frac{\theta_t}{2}\right) \right] * \left[\frac{D_w}{W_o} \frac{\cos(\theta_t)}{\cos\left(\frac{\theta_t + \varphi_m}{2}\right)} \right], & \text{Cuando } \theta_t \geq \theta_{t,crit} \end{cases}$$

Donde " φ_m , ($^\circ$)" es el ángulo medio

Ecuación 13

$$\varphi_m = 2 \arctan \left[\frac{\frac{W}{4}}{F + \sqrt{F^2 + \left(\frac{W}{4}\right)^2}} \right]$$

Mientras que “ $\theta_{t,crit}$, (°)” es el ángulo crítico

Ecuación 14

$$\theta_{t,crit} = 94.46 - 2.519 \frac{W_o}{D_w} - 55.71 \left(\frac{W_o}{D_w}\right)^2 - 0.48 \varphi_m + 1.77 \frac{\varphi_m^2}{1000} + 1.15 \frac{W_o}{D_w} \varphi_m$$

Los ángulos ($\theta_{t,crit}$) y (φ_m) están en grados

Las ecuaciones de φ_m y $\theta_{t,crit}$ son válidas siempre y cuando

$$\text{Son validos para } 20^\circ < \varphi_m < 70^\circ \text{ y } 0.50 < \left(\frac{W_o}{D_w}\right) < 0.95$$

El IAM longitudinal se puede expresar en la siguiente expresión [67]:

Ecuación 15

$$K_l(\theta_l) = \cos(\theta_l) - \frac{F}{L_m} \sqrt{1 + \left(\frac{W}{4F}\right)^2} * \sin(\theta_l)$$

L_m es la longitud del espejo reflectante.

9.5.2.2. Supuestos/limitaciones del modelo. Llegados a este punto, es importante exponer y comentar las asunciones del modelo desarrollado para la predicción de la IAM del LFR para ambas direcciones. El presente modelo se ha desarrollado para espejos planos y no se ha tenido en cuenta la forma exacta del receptor. Prácticamente, se ha asumido que la eficiencia del reflector secundario no depende del ángulo de incidencia, algo que es aproximadamente correcto en la dirección longitudinal pero que no siempre es válido para la dirección transversal. Por lo tanto, esta cuestión debe comprobarse en la sección 3. Además, los espejos examinados son planos (sin curvatura) y hay que tener en cuenta este hecho. La existencia de la curvatura conduce a un mayor rendimiento debido a la forma

parabólica de los espejos que concentra en un área más baja el haz de radiación solar incidente. Además, se ha supuesto que los espacios entre los espejos primarios son constantes. Otro supuesto es el de la superficie de los espejos, que se supone ideal y sin errores, algo que conduce a un rendimiento un poco mayor. Además, no se han tenido en cuenta los efectos de bloqueo porque, en el presente modelo, son extremadamente bajos. El campo examinado tiene todos los centros de los espejos en la misma línea horizontal. Este diseño presenta pérdidas ópticas por sombreado cuando el ángulo transversal solar toma valores elevados. Sin embargo, el sombreado existente cubre la región bloqueada de los espejos, por lo que los efectos de bloqueo pueden despreciarse en el presente diseño. Por lo tanto, sólo se tienen en cuenta las pérdidas por sombreado. Al final, se puede decir que las distancias de los espejos centrales (bajo el receptor) pueden ser variables entre los diseños y en muchos casos hay un espejo central exactamente bajo el receptor. Por lo tanto, hay desviaciones en las geometrías de los LFR existentes. Otro supuesto de este trabajo es que no se consideran las pérdidas de sombra debidas al reflector secundario. El análisis anterior pretende destacar las posibles razones de las desviaciones del modelo desarrollado con los resultados reales. La variación de los diseños de LFR es grande y, por tanto, no es posible con una modelización cubrir todos los escenarios posibles. Por lo tanto, en los casos de grandes diferencias entre el modelo examinado y el modelo de la Figura 1, los resultados tienen que ser comprobados antes de la adopción final como fiables. [67]

9.5.2.3. Cálculo de la eficiencia óptica

- Parámetros de entrada MATLAB. Para que se ejecute el programa se definen al inicio los parámetros de entrada con sus respectivos valores. Después de definir los parámetros iniciales del programa como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros de entrada simulación de MATLAB.

| Parámetro de entrada | Definición |
|----------------------|---|
| Dw | Distancia entre reflectores |
| Wo | Ancho del espejo |
| W | Ancho entre los centros del primer y el último espejo |
| Wtotal | Ancho total |
| F | Distancia Focal |
| N | Número de reflectores primarios en un lado |
| L | Longitud del espejo |
| ρ_m | Coefficiente de reflectancia del espejo |

| | |
|----------|---|
| α | Coeficiente de absorción de superficie selectiva adecuada |
| γ | El factor de intersección |
| n_day | Número del día del año |
| Q_lat | Latitud del lugar |
| t_hours | Tiempo solar medido en horas |

Fuente. Elaboración propia.

Se da en ejecutar la simulación numérica y los resultados que arroja es en la ventana Command Window como se muestra en la siguiente figura:

Figura 21. Resultados de la eficiencia óptica simulación en Matlab.

```

1.1941
Kt:0.707      K1:1.194      Eficiencia: 0.476>>

```

Fuente. Elaboración propia.

9.6. SIMULACIÓN DEL SISTEMA LFC EN TONATIUH

9.6.1. Modelado de la geometría del sistema LFC. Durante esta sección del proyecto, se efectúa un modelado del sistema LFC, en software Tonatiuh con el fin de realizar una simulación, que permita dar como resultado, la eficiencia del sistema.

Tonatiuh es un programa de fuentes abiertas para la simulación óptico-energética de sistemas solares de concentración. Combina el trazado de rayos con el método de Monte Carlo para simular el comportamiento óptico de una gran variedad de sistemas tornasolares. [16]

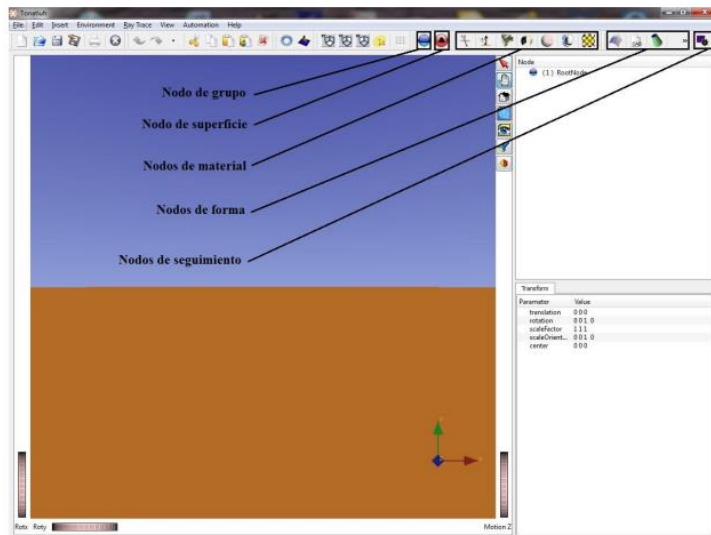
Primeramente, se construye el sistema de reflexión primario (espejos), en el cual inciden los rayos solares, estos rayos se reflejarán en el sistema de reflexión secundario para que posteriormente incidan estos rayos en el tubo absorbedor. [56]

Tonatiuh permite crear la geometría de los elementos a simular mediante nodos (rootnode). Cada uno de los componentes del sistema corresponder a un nodo general, integrado por diversos nodos dependiendo del tamaño de elementos que componen el sistema y están asociados entre sí. Los nodos pueden modificar su

nombre al crearse o posteriormente, con el fin de identificar cada componente del sistema. [16]

A la hora de modelar las superficies que se desean simular, Tonatiuh dispone de 5 tipos distintos de nodos denominados “nodos de grupo” (Group nodes), “nodos de superficie” (Surface nodes), “nodos de forma” (Shape nodes), “nodos de material” (Material nodes) y “nodos de seguimiento” (Tracker nodes)

Figura 22. Tipos de nodos en Tonatiuh. Leyes de Caracterización de Colectores Solares tipo Fresnel.



Fuente. Tomado de [71]

A continuación se detalla la función que desempeña cada uno de los nodos mencionados [71]:

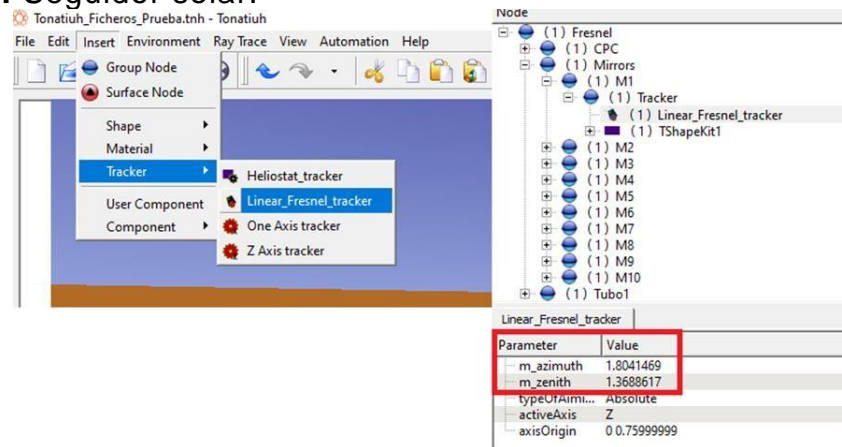
- **Nodos de grupo:** Como su propio nombre indica, sirven para agrupar otros nodos, ya sean de grupo o de superficie. Esto permite crear el modelo según las distintas partes que lo componen. En este tipo de nodo, el usuario puede definir cuál será la posición de la figura con respecto a un sistema de coordenadas (x, y, z) ya definido.
- **Nodos de superficie:** También son nodos de grupo, ya que pueden contener a los nodos de forma y de material.
- **Nodos de forma:** Tonatiuh dispone de diversos nodos de forma en función de la geometría que se quiera modelar (Cilindros, discos parabólicos, planos rectangulares, etc). Todos los nodos de forma llevan asociado el parámetro del lado

activo (“activeSide”) de la superficie (exterior o interior para el caso de los cilindros), sobre el cual incidirán los rayos generados.

- **Nodos de material:** Definen las propiedades y características de las figuras a las que van asociadas, tales como la reflectividad del material.
- **Nodos de seguimiento:** Se pueden incluir dentro de un nodo de grupo con el objetivo de que la superficie perteneciente a ese nodo sea capaz de reflejar los rayos procedentes de una fuente de luz hasta otra superficie objetivo. Si la fuente de luz cambia su posición, los nodos de seguimiento cambiarán la posición de la superficie automáticamente.

En el sistema de reflexión primario, se crea primeramente un nodo en donde se introduce un “Tracker”, el cual es un seguidor solar. El tracker que se introduce será el “Linear_Fresnel_tracker” y los parámetros que se modifican son: El “m_zenith” (Angulo de elevación del sol), y el “m_azimuth” (Angulo de dirección del sol), como se muestra en la Figura 23. Estos son los parámetros referentes a las características de seguimiento del nodo de superficie.

Figura 23. Seguidor solar.

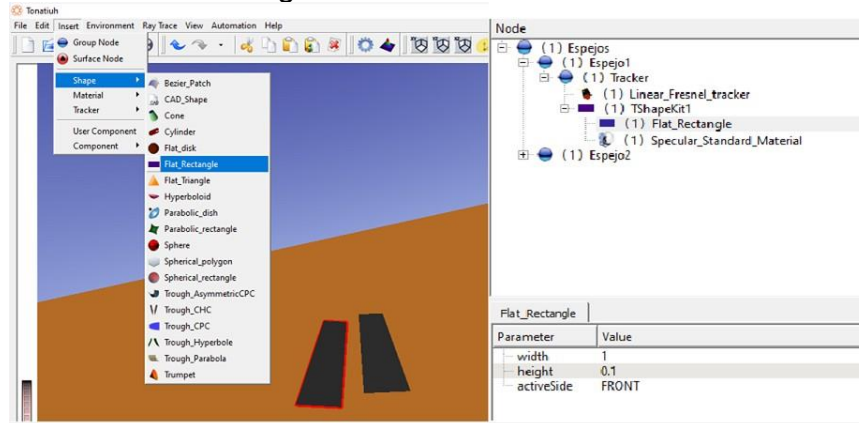


Fuente. Elaboración propia.

Luego se procede a colocar la figura, como se aludió anteriormente, se selecciona la opción “SurfaceNode”, luego “insert” y en la opción “shape” se coloca la figura “Flat_Rectangle”, después de creada la figura se modifican sus parámetros, su ancho (width) es de 1 y su altura (height) es de 0.1, Tonatiuh toma estas medidas en metros, como se puede observar en la Figura 24.

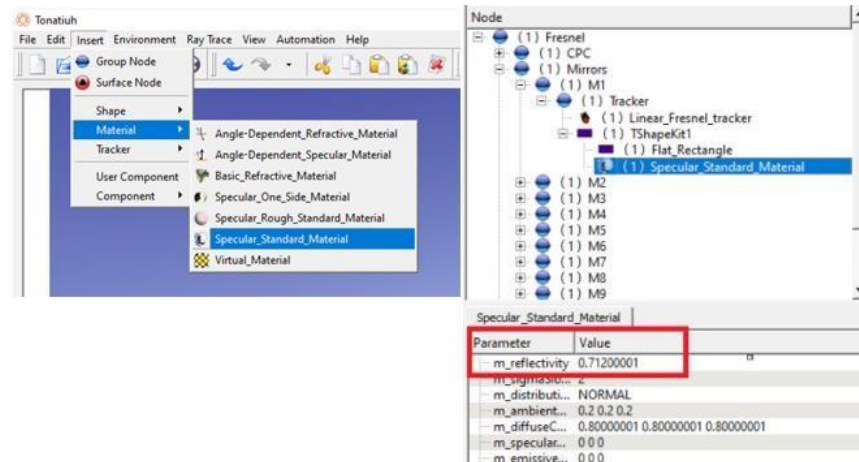
Posteriormente, se le asigna un material reflectante a la figura, en “insert” en la opción “material” se le aplica el “Specular_Standard_Material”, agregando una reflectividad de 0,712, que corresponde a la reflectividad del espejo.

Figura 24. Selección de la geometría.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 25. Selección del material.



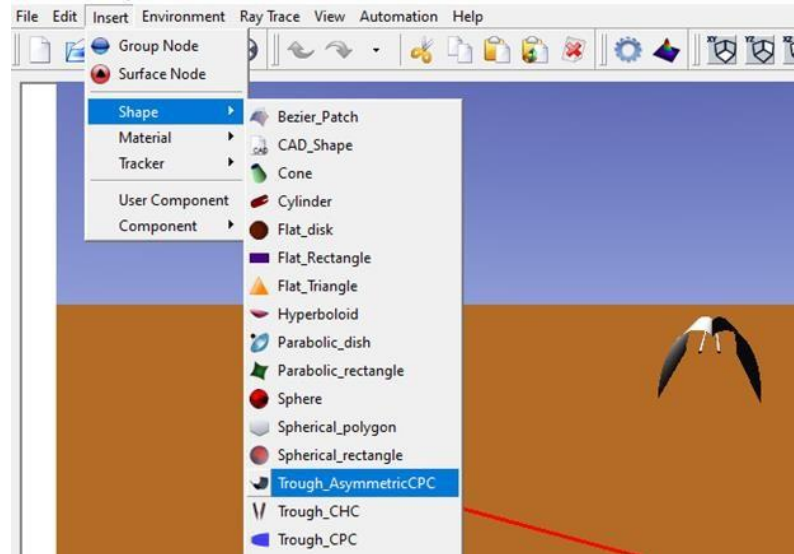
Fuente. Elaboración propia.

Esto se realiza para la construcción de los 10 espejos del sistema primario, cambiando para cada uno su translación y en el tracker, su rotación respecto a la posición del sol.

Una vez que se completa el sistema primario, se construye el sistema secundario del concentrador lineal tipo Fresnel. Para esto se optó por el diseño del

Concentrador Parabólico Compuesto (CPC), en el programa seleccionaremos la forma “Trough_AsymmetricCPC” en la opción “Shape”.

Figura 26. Selección de la geometría secundaria.



Fuente. Elaboración propia.

Una vez creada la geometría se indica el nodo correspondiente, en este caso el nodo "CPC", obtendremos unos parámetros que tenemos que modificar para colocar correctamente la figura en el espacio, Tonatiuh trabaja las posiciones en metros y la rotación en radianes. En la Figura 27, veremos los valores para el sistema CPC.

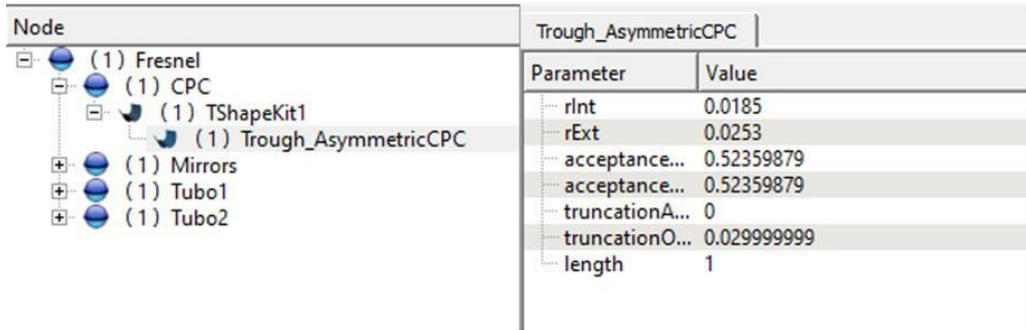
Figura 27. Características del rootnode.

| Node | | Transform | |
|------|---------------|----------------|-------------------|
| | | Parameter | Value |
| + | (1) Fresnel | | |
| + | (1) CPC | | |
| + | (1) Mirrors | | |
| + | (1) Tubo1 | | |
| + | (1) Tubo2 | | |
| | | translation | 0 0.74000001 -0.5 |
| | | rotation | 0 0 1 3.0999999 |
| | | scaleFactor | 1 1 1 |
| | | scaleOrient... | 0 0 1 0 |
| | | center | 0 0 0 |

Fuente. Elaboración propia.

También se modifican unos parámetros en el CPC, para ello tenemos que apuntar directamente la figura (Trough_AsymmetricCPC), allí nos muestra unos parámetros para los cuales indicamos los siguientes valores que aparecen en la Figura 28.

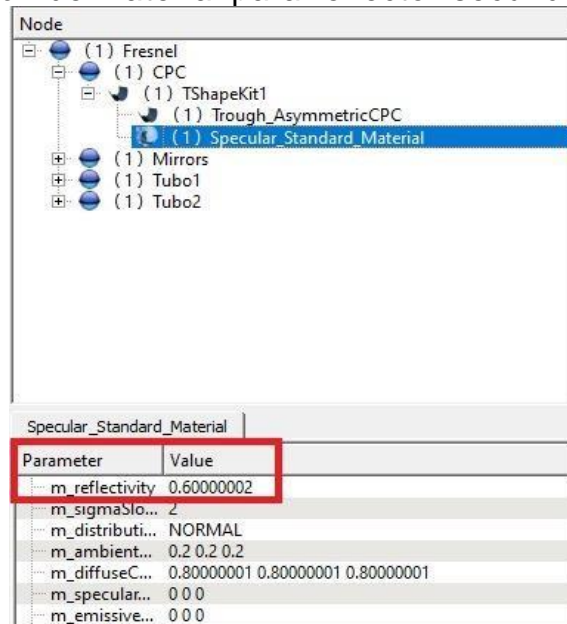
Figura 28. Características del SurfaceNode.



Fuente. Elaboración propia.

Por último, se le emplea un material reflectivo al CPC, así como en los espejos del sistema primario, se le asigna el material “Specular_Standard_Material”, completando un valor de 0,6 en su reflectividad, la cual corresponde a la reflectividad del acero inoxidable.

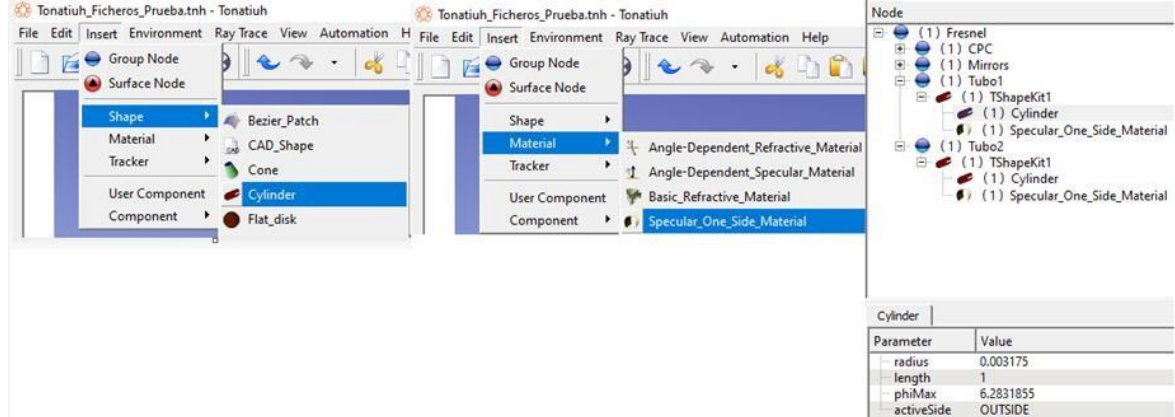
Figura 29. Selección de material para reflector secundario.



Fuente. Elaboración propia.

Acabado el sistema secundario del LFC, se procede a elaborar por último el tubo absorbedor. Para este se introduce la figura “Cylinder” en donde se modificará su translación, su radio (radius) y su largo (length). También se le introduce un material el cual será el “Specular_One_Side_Material” como muestra la Figura 30.

Figura 30. Selección de forma y material para tubo absorbedor.

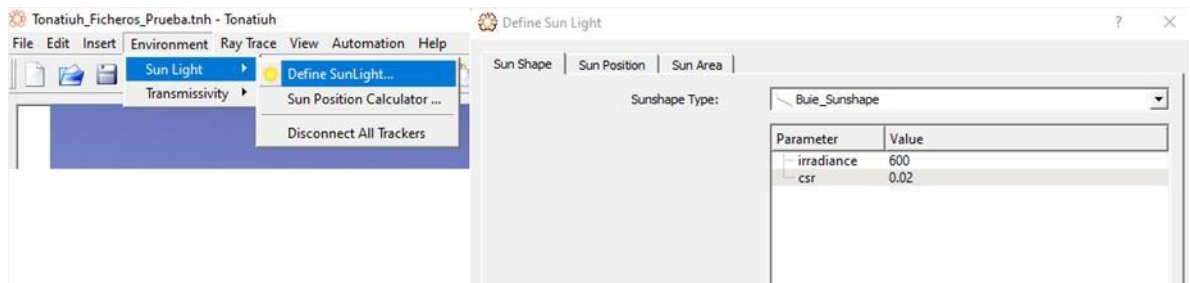


Fuente. Elaboración propia.

9.6.2. Simulación del sistema LFC. Después que se tiene terminado el modelo del sistema LFC en Tonatiuh, se comienza con la simulación del mismo, donde se evaluará la eficiencia óptica del sistema cambiando el largo y el ancho de los espejos y la posición del sol, en cada hora de un día determinado.

Tras haber definido el colector que se desea simular, es necesario definir el tipo de fuente de luz para generar los rayos que interactuarán con los espejos. Para ello, hay que ir a la pestaña “environment”, situada en la parte superior de la interfaz, seleccionar la opción “Sun Light” y luego “Define SunLight” [71]. Lo primero será elegir la forma que se le va a dar al sol. Tonatiuh cuenta con dos tipos de forma solar, “Buie_Sunshape” y “Pillbox_Sunshape”, en la cual se escoge la opción “Buie_Sunshape”, donde su irradiancia será de 600 y su csr de 0.02, como se muestra en la Figura 31.

Figura 31. Definición de parámetros solares.



Fuente. Elaboración propia.

Luego se define la posición del sol en la opción “Sun position” mediante dos parámetros angulares, el azimut (con respecto al Norte) y la elevación (con respecto al Sur). Para definir este parámetro, se debe tener en cuenta que los datos de posición se definieron de acuerdo a las Unidades Tecnológicas de Santander, ubicada en la ciudad de Bucaramanga, Santander, y los cuales fueron tomados de la página web Sunearthtools, donde se pueden observar los valores de Elevación y Azimut de la posición solar desde las 7:00 am hasta las 5:00 pm, del día 17 de febrero de 2022, como se muestra en la Figura 32 y en la Tabla 11.

Figura 32. Ubicación geográfica de las UTS.



Fuente. Tomado de Sunearthtools.

Tabla 11. Datos de posición del sol.

| Hora | Elevación | Azimut |
|-------|-----------|---------|
| 7:00 | 11.57° | 103.37° |
| 8:00 | 25.96° | 106.53° |
| 9:00 | 40.05° | 111.55° |
| 10:00 | 53.48° | 120.37° |
| 11:00 | 65.14° | 138.24° |
| 12:00 | 71.36° | 175.09° |
| 13:00 | 67.15° | 215.81° |
| 14:00 | 56.2° | 236.95° |
| 15:00 | 43.01° | 247.1° |
| 16:00 | 29.02° | 252.72° |
| 17:00 | 14.68° | 256.21° |

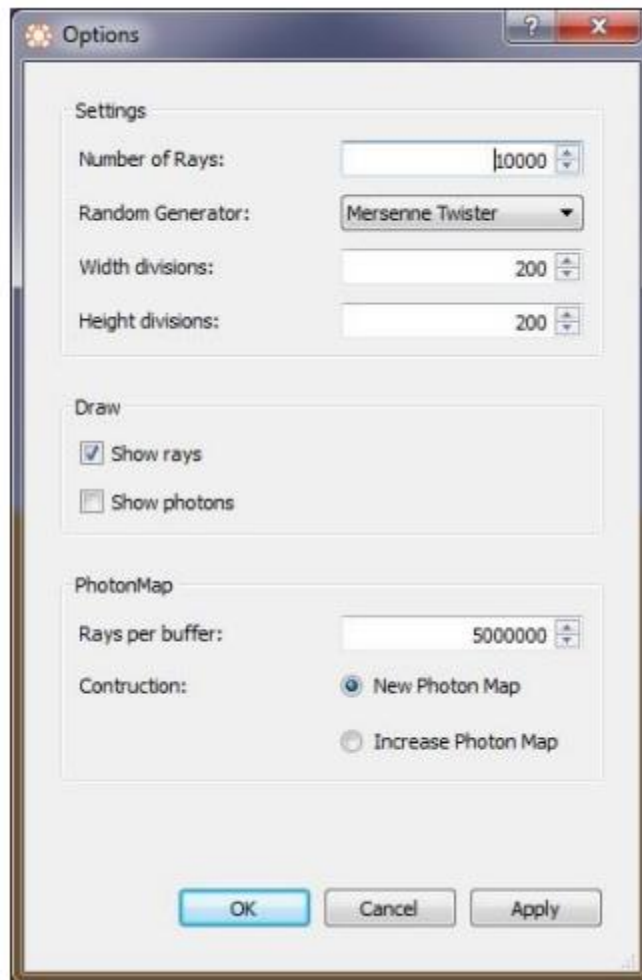
Fuente. Elaboración propia. Tomado de Sunearthtools.

Antes de realizar la simulación, es imprescindible establecer los parámetros asociados al trazador de rayos. Para acceder a dicha configuración se sigue la ruta “Ray Trace”>”Ray Trace Options”. [71]

El primero de los parámetros que aparece en la ventana de opciones del trazador de rayos es el número de rayos con el que se quiere realizar la simulación. En este ejemplo se utilizará el valor de 10000 rayos que viene por defecto. Cabe destacar que el número de rayos generados no coincidirá con el número de rayos que incidirán por primera vez sobre una o varias superficies elegidas en el apartado de Área Solar. Esto se debe a que algunos de los rayos generados por el Sol (de forma aleatoria) no llegan a tocar dicha superficie. [71]

Tonatiuh dispone de dos generadores aleatorios de rayos (“Random Generator”). Se elegirá la opción “Mersenne Twister” para esta y futuras simulaciones. Para poder visualizar en la pantalla los rayos incidentes en las superficies del colector se marca la opción “Show rays”. Como se muestra en la Figura 33 [71].

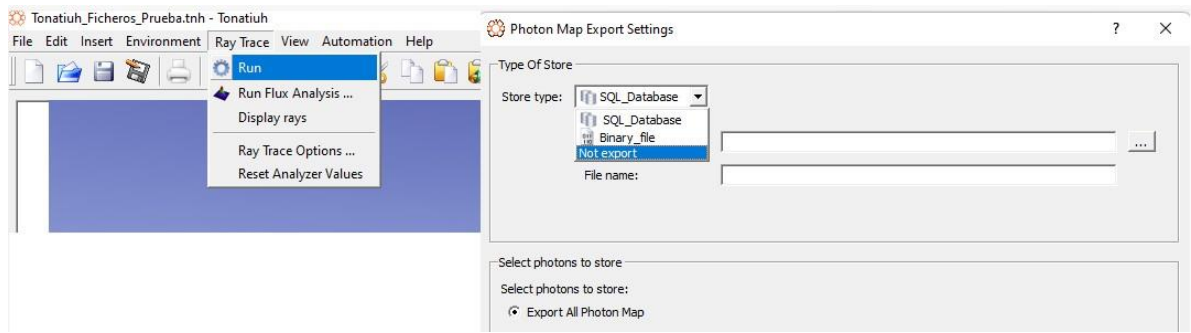
Figura 33. Opciones del trazador de rayos en Tonatiuh.



Fuente. Elaboración propia.

Justo después de precisados estos parámetros, se continúa a la simulación. Para ello se selecciona la opción trazado de rayos "Ray trace" y después la opción "Run", y a continuación en la ventana que aparece la opción de "Store type", se toma la opción "Not export", esto para que el programa omita guardar la simulación, como muestra la Figura 34, y finalmente se selecciona la opción Ok.

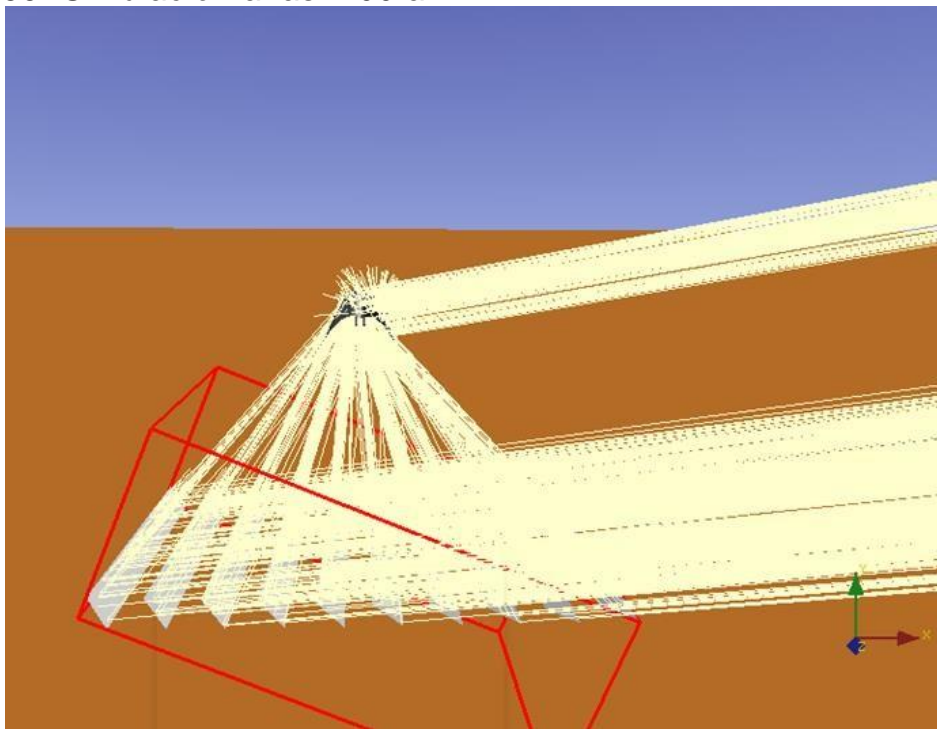
Figura 34. Arranque de simulación.



Fuente. Elaboración propia.

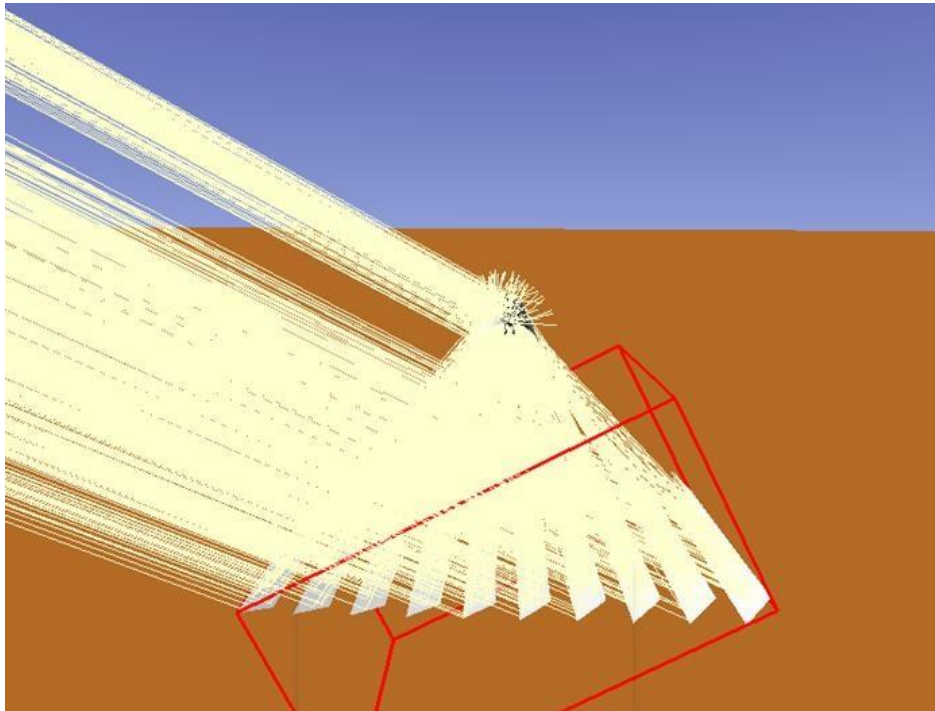
En la Figura 35 se muestra la simulación solar a las 7:00 am, y en la Figura 36 se muestra la simulación a las 4:00 pm, del día 17 de febrero de 2022, con las condiciones de posición solar de acuerdo a la ubicación de estudio.

Figura 35. Simulación a las 7:00 am.



Fuente. Elaboración propia.

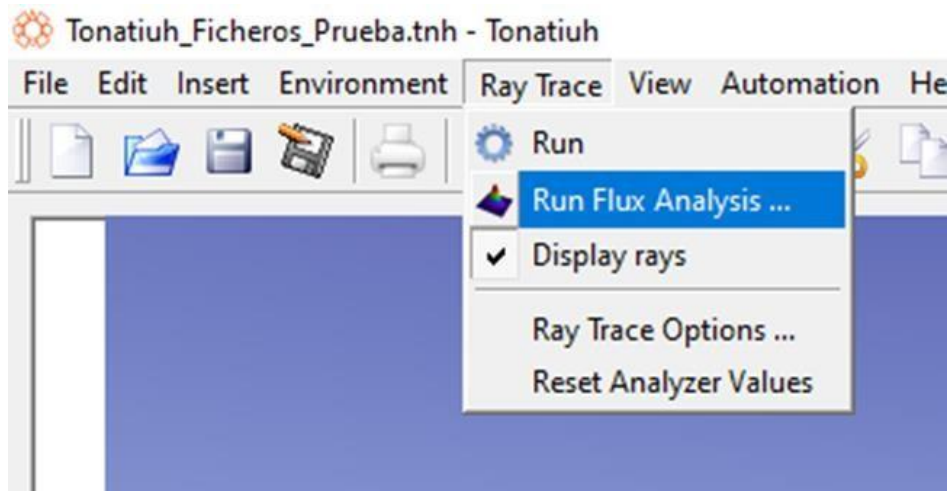
Figura 36. Simulación a las 4 pm.



Fuente. Elaboración propia.

9.6.3. Cálculo de la eficiencia. Para el cálculo de la eficiencia óptica, se toma el flujo promedio (average flux), el cual se obtiene del análisis de la simulación que se efectuó. Para ello se va a la opción “Ray Trace” y después a la opción “Run Flux Analysis”, como muestra la Figura 37.

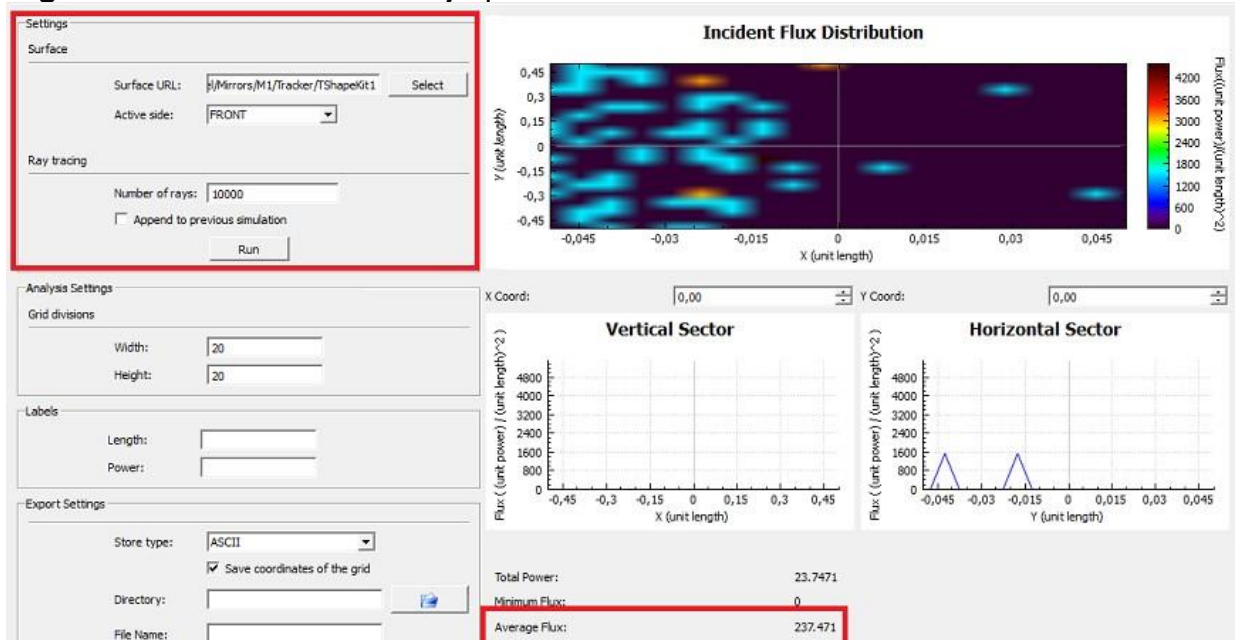
Figura 37. Análisis de la simulación.



Fuente. Elaboración propia.

Se calcula la eficiencia por cada hora del día desde las 7:00 am hasta las 4:00 pm por cada espejo y tubo absorbedor, por medio del flujo promedio. Para obtener el flujo promedio (average flux), se elige en la opción “Surface URL”, un solo parámetro el cual será un espejo, o un tubo absorbedor. Este análisis se realizó con un número de rayos correspondientes a 10000, y posteriormente, se selecciona la opción “Run” y el programa empieza el análisis, como se muestra en la Figura 38. [71]

Figura 38. Obtención del flujo promedio.



Fuente. Elaboración propia.

Para el cálculo de la eficiencia óptica se debe obtener el Average Flux de cada uno de los espejos y de los dos tubos absorbedores. Apenas se tienen estos valores, se calcula la eficiencia, la cual será igual a la sumatoria de la energía útil (tubos absorbedores), dividido en la sumatoria de la energía total (espejos), luego se aplica la siguiente ecuación.

Ecuación 16

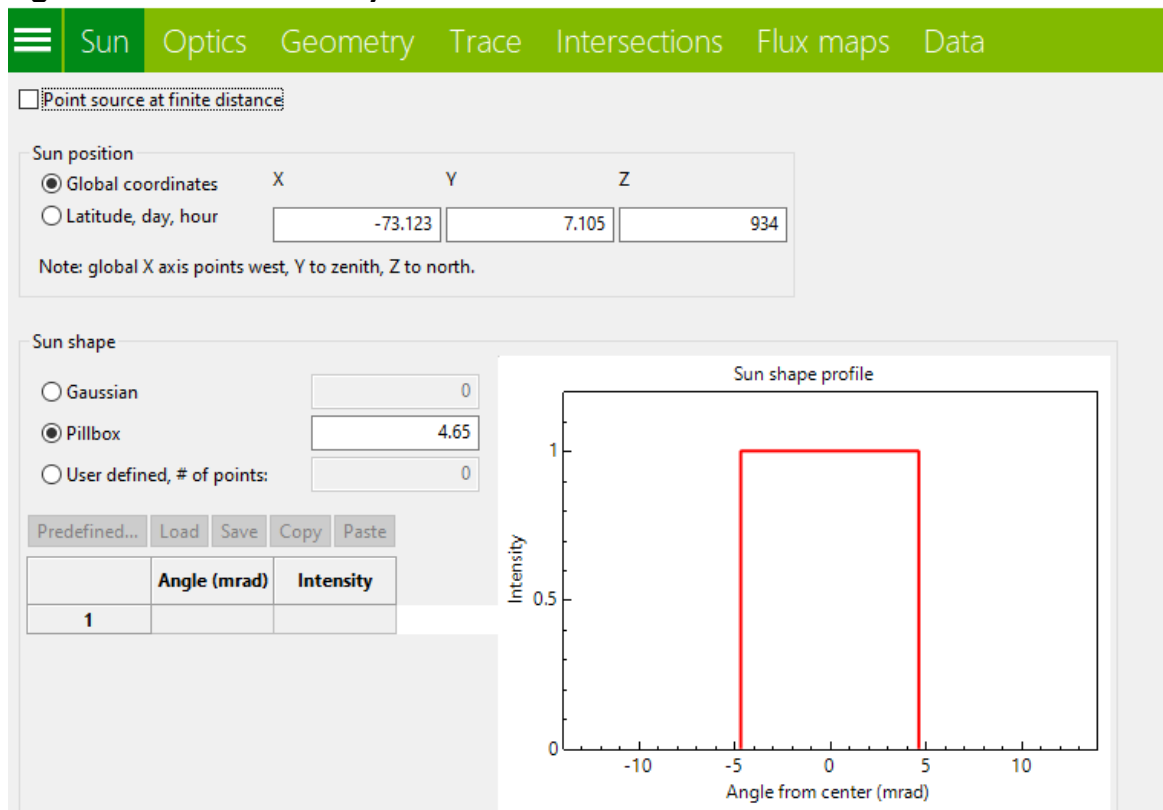
$$Eficiencia\ optica\ del\ día = \frac{\sum Eficiencia\ por\ hora}{Numero\ de\ datos}$$

9.7. SIMULACIÓN SOFTWARE SOLTRACE

Se desarrollará un modelamiento geométrico para un colector lineal fresnel, aplicando el software soltrace al manejo de se puede dar de dos formas la primera manualmente y la segunda podemos exportar un archivo de programan Google Sketchup. En el actual documento se realizó la geometría del sistema colector lineal fresnel (LFC) en el programan Google Sketchup de esta menara exportamos los archivos de documento a la herramienta de soltrace.

Al desempañar soltrace, la interfaz gráfica que nos aparece, nos arroja diferentes funciones las cuales son “Sun, Optics, Geometry, Trace, Intersections, Flux maps, Data” y le tenemos que dar primero a la opción llamada “Sun” como se evidencia en la Figura 39.

Figura 39. Interfaz de ejecución inicial SOLTRACE.



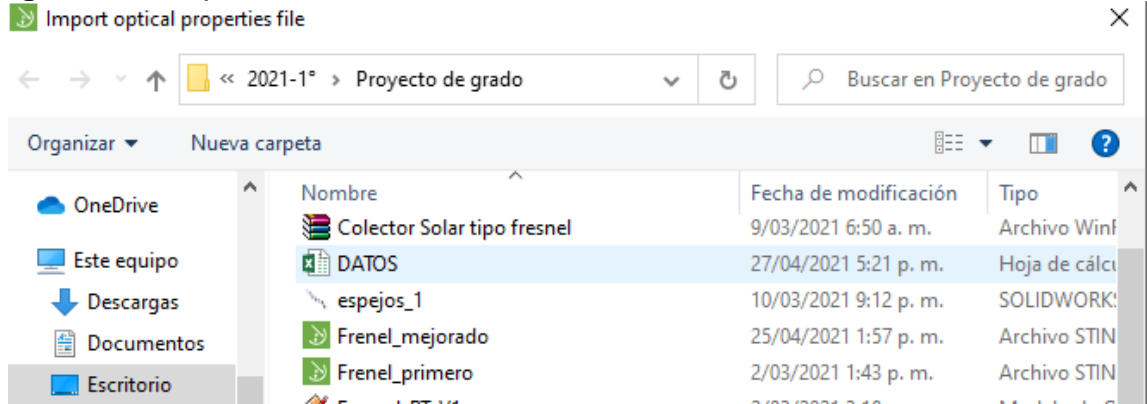
Fuente. Elaboración propia.

Para importar la geometría de Google Sketchup a la herramienta soltrace, tenemos que ir al icono que se encuentra en la parte superior izquierda de la interfaz gráfica

☰, Se muestran diferentes funciones, y seleccionamos “Open Project”, esta función no permite indagar en el ordenador y buscar el archivo de Google Sketchup que estar guardado como .stinput que es totalmente compatible con soltrace ver

Figura 40. El archivo .stinput abarcar la geometría el modelamiento 3D previamente realizo en el programa Google Sketchup.

Figura 40. Importación de archivos a SOLTRACE



Fuente. Elaboración propia.

Ya identificado el archivo .stinput le damos clic y soltrace cargara todos los elementos guardados en Google Sketchup. Ya en soltrace nos vamos a la opción “Geometry” y podemos ver automáticamente las coordenadas de cada elemento individual y sus diferentes ejes como podemos observar en la Figura 41.

Figura 41. Función “Geometry” SOLTRACE.

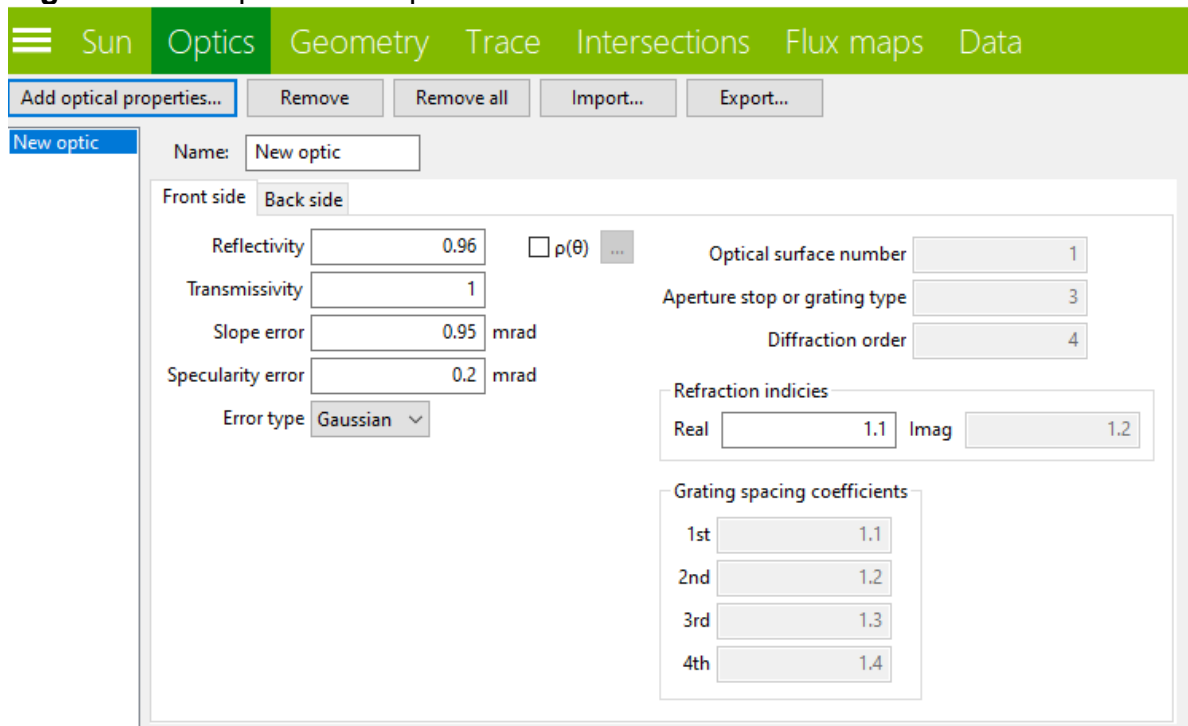
| | En. | X-Coord. | Y-Coord. | Z-Coord. | X-AimPt. | Y-AimPt. | Z-AimPt. | Z-Rot. | Aperture | Surface | Interaction | Optics | Comment |
|----|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|------------------------|-----------------|-------------|------------|------------|
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.1 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 1.25 | 0 | r-0.1,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Reflexion | E1 |
| 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.265 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 1 | 0 | r-0.1,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Reflexion | E2 |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.43 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 0.3 | 0 | r-0.1,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Reflexion | E3 |
| 4 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.595 | 0 | 0 | 0.625 | 0 | 0.45 | 0 | r-0.1,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Reflexion | E4 |
| 5 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.76 | 0 | 0 | 0.75 | 0 | 1 | 0 | r-0.1,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Reflexion | E5 |
| 6 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.925 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 3 | 0 | r-0.1,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Reflexion | E6 |
| 7 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1.09 | 0 | 0 | 0.3 | 0 | 3 | 0 | r-0.1,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Reflexion | E7 |
| 8 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1.225 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 2 | 0 | r-0.1,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Reflexion | E8 |
| 9 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1.42 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 2 | 0 | r-0.1,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Reflexion | E9 |
| 10 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1.585 | 0 | 0 | 0.6 | 0 | 2 | 0 | r-0.1,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Reflexion | E10 |
| 11 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.76 | 0 | 0.75 | 0.925 | 0 | 4.55 | 0 | r-0.05,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Reflexion | ARRIBA |
| 12 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.72 | 0 | 0.733 | 0.25 | 0 | 1.198 | 0 | r-0.0495,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Refraction | ARRIBA IZQ |
| 13 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.801 | 0 | 0.732 | 0 | 0 | 0 | 0 | r-0.0495,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Refraction | ARRIBA DER |
| 14 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.75 | 0 | 0.731 | 0.7 | 0 | 2 | 0 | r-0.009525,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Refraction | TUBO 1 |
| 15 | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.77 | 0 | 0.731 | 0.7 | 0 | 0 | 0 | r-0.009525,1,0,0,0,0,0 | f-0,0,0,0,0,0,0 | Reflection | Refraction | TUBO 2 |

Fuente. Elaboración propia.

La función “Geometry”, contiene como podemos observar en la Figura 41 contiene las coordenadas espaciales de los componentes del modelo en 3D que fue exportado de Google Sketchup. Y podemos ver la altura la profundidad y el ángulo de cada componente por otro lado, podemos poner un comentario a cada elemento previamente identificado. Para seleccionar las propiedades del material (Reflexión o Refracción) nos vamos a la opción “Optics” y de damos las propiedades del material para los elementos de modelo en 3D estas propiedades ópticas.

Para crear una propiedad óptica de damos clic a “Optics” después de damos clic en “Add Optical Propeties” le asignamos un nombre y proporcionamos los datos correspondientes para dicho material de cada elemento de la figura en 3D.

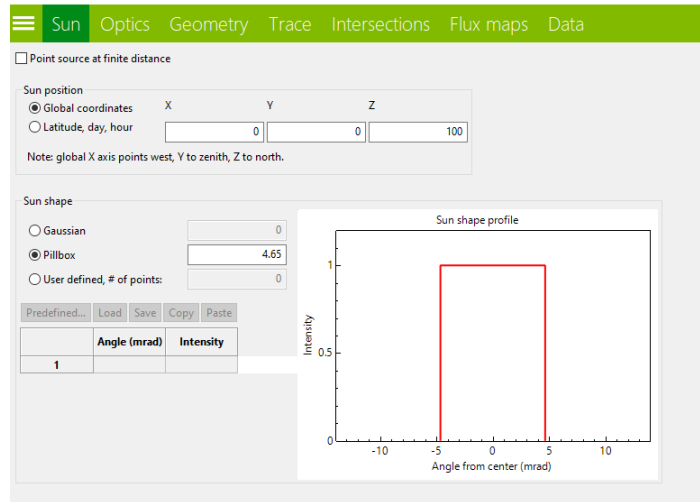
Figura 42. Propiedades ópticas.



Fuente. Elaboración propia.

Luego de definir las propiedades ópticas de los elementos nos dirigimos la opción “Sun” en la cual definimos las característica soles, las cuales son las coordenadas globales donde se va a desarrollar la simulación y se selecciona el tipo de sol que puede ser “Gaussian, Pillbox, Use defined” en este caso seleccionamos Pillbox.

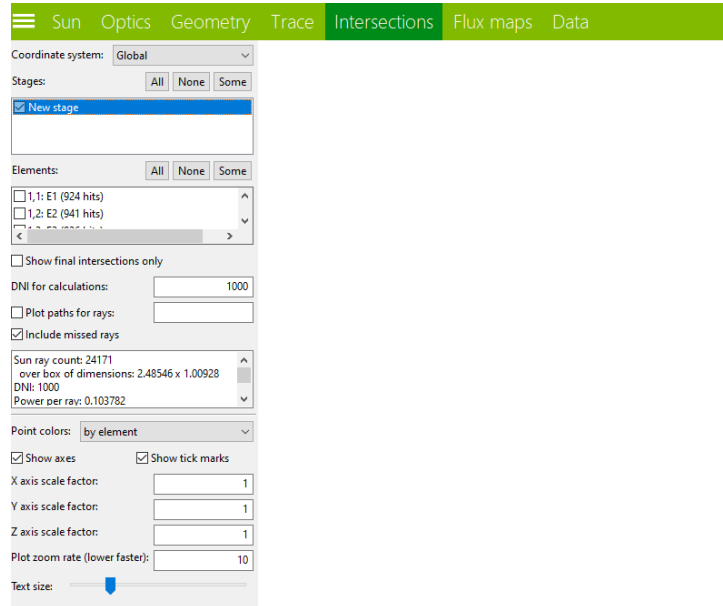
Figura 43. Posición solar SOLTRACE.



Fuente. Elaboración propia.

Luego debemos seleccionar todos los elementos que queremos simular, y nos vamos a la opción "Intersections" y tenemos que seleccionar uno por uno cada elemento en la opción "Elements" lo podemos seleccionar uno por uno o solamente le damos a All y los selecciona automáticamente. Luego nos vamos a la parte de DNI de la simulación, que es 600.

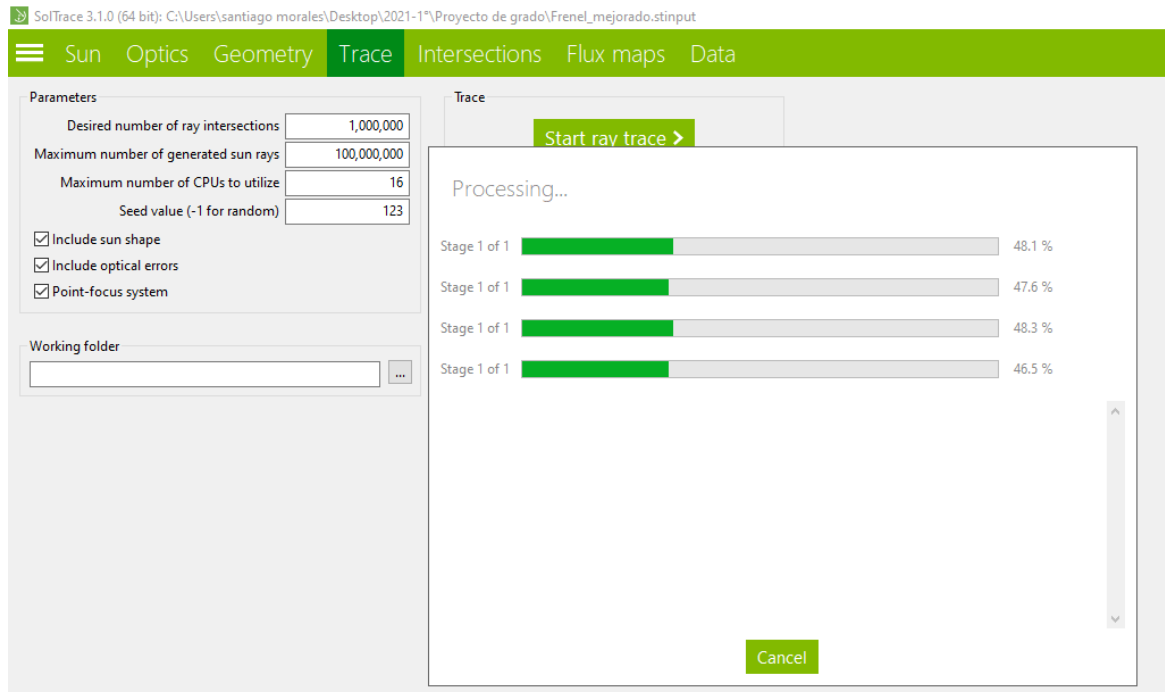
Figura 44. Elementos a simular.



Fuente. Elaboración propia.

Por lo tanto, los parámetros del trazado de rayos se ajustan mediante la función "trace", que define el número de intersecciones y rayos que se utilizarán durante la simulación. Además, puede incluir o no error de posición del sol, error óptico y error de posición de enfoque. Después de definir todos los parámetros anteriores, haga clic en "Start ray trace", y luego comience a aplicar rayos solares en cada etapa, como se muestra en la Figura 45. Este proceso puede tomar varios minutos, dependiendo de la cantidad de rayos asignados al proceso de simulación.

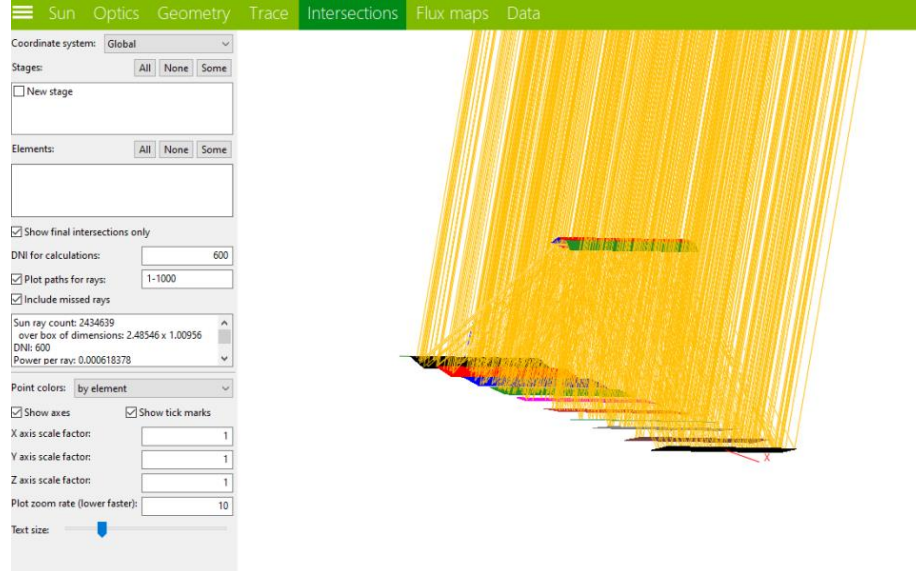
Figura 45. Ajuste de parámetros de trazado de rayos y simulación SOLTRACE.



Fuente. Elaboración propia.

Para ver la geometría del sistema modelada y el trazado de rayos en SOLTRACE, debe ir a "Intersections" después de que se complete el proceso "Start ray trace". El resultado final de la simulación se muestra en la Figura 46, que demuestra la interacción entre la luz proyectada por la herramienta y cada componente del sistema LFC. Los rayos amarillos se dirigen a cada componente y luego apunten al punto focal, por sí mismos los rayos rojos son rayos que no pueden aprovechar el proceso de reflexión hacia el tubo absorbente.

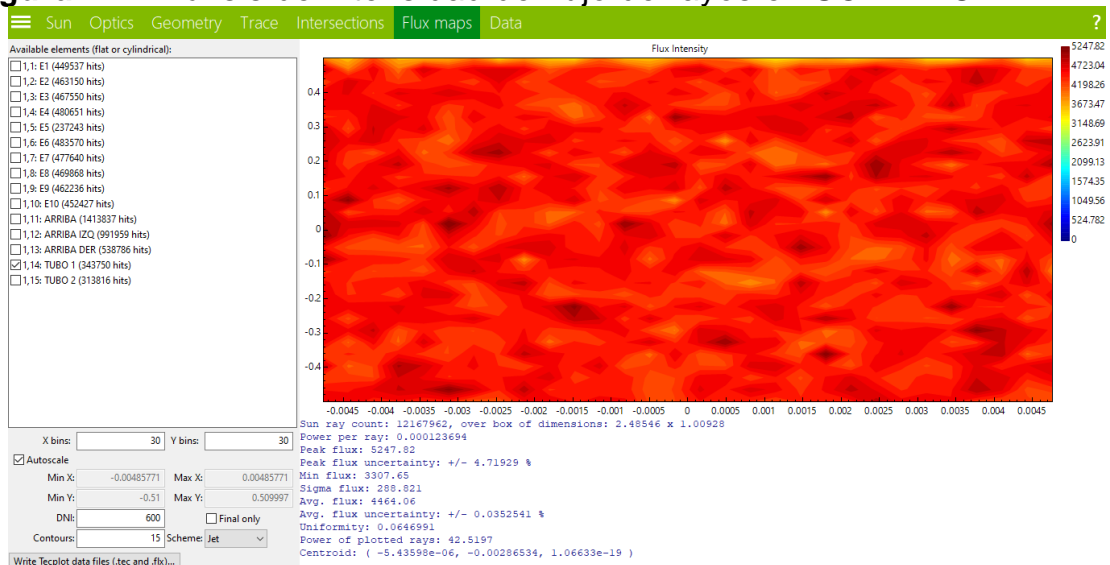
Figura 46. Trazado de rayos en proceso de simulación SOLTRACE.



Fuente. Elaboración propia.

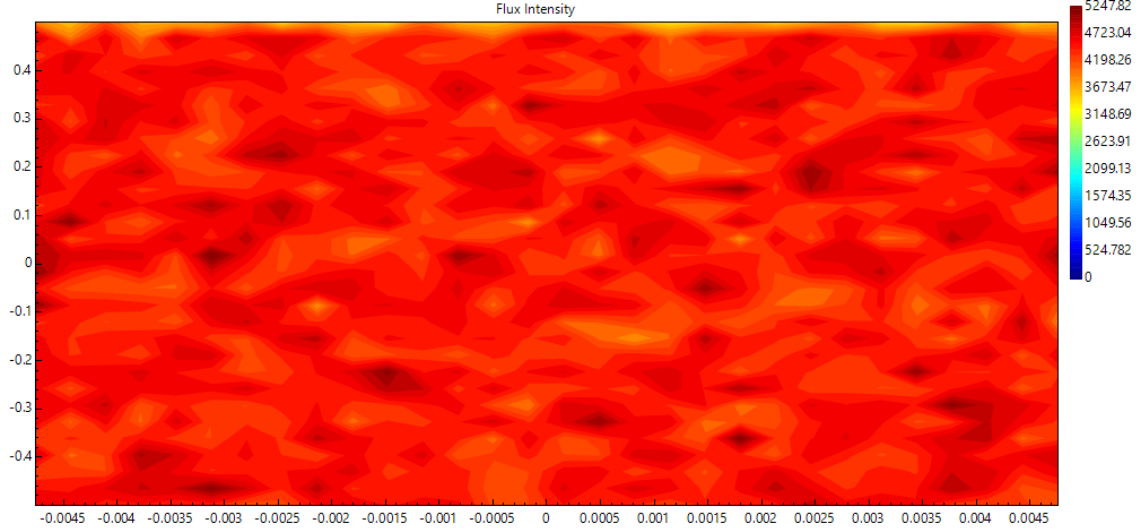
Adicionalmente, SOLTRACE tiene una opción llamada “Flux Maps”, que nos permite analizar la distribución de rayos en los elementos del sistema. Para efectuar este análisis, primero se debe seleccionar el elemento del sistema modelado como se evidencia en la Figura 47, donde se selecciona el Tubo 1. Una vez seleccionado el elemento a evaluar, aparecen una serie de datos visuales con diferentes niveles de intensidad, que permiten posteriormente desarrollar una evaluación detallada de la incidencia de rayos en el componente (Ver Figura 48).

Figura 47. Análisis de intensidad de flujo de rayos en SOLTRACE.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 48. Mapa intensidad flujo tubo absorbedor 1 SOLTRACE.



Fuente. Elaboración propia.

9.7.1. Cálculo de la eficiencia óptica. Para el cálculo de la eficiencia óptica se debe obtener el Average Flux de cada uno de los espejos y de los dos tubos absorbedores. Apenas se tienen estos valores, se calcula la eficiencia, la cual será igual a la sumatoria de la energía útil (tubos absorbedores), dividido en la sumatoria de la energía total (espejos), como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\text{Eficiencia optica del día} = \frac{\sum \text{Average flux Tubo absorbedor}}{\sum \text{Average flux Espejo Reflector}} \quad \text{Ecuación 17}$$

10.RESULTADOS

10.1. EJEMPLO DE CÁLCULO EFICIENCIA EN TONATIUH Y SOLTRACE.

Hay que tener en cuenta que Tonatiuh brinda los resultados del flujo promedio por horas a medida que cambia la posición del sol, es decir, por cada hora obtengo un valor de flujo promedio en cada uno de los 10 espejos y en los 2 tubos del sistema LFC. Un ejemplo para el caso de un ancho de 0.1 metros y un largo de 1 metro con una reflectancia de 0.712, como se presenta en la Tabla 12. Todas las simulaciones de Tonatiuh se hicieron de la misma manera. Los datos contenidos en las siguientes tablas hacen referencia al flujo de energía promedio, en los espejos y tubos receptores, por medio de los cuales se obtiene la eficiencia, relacionando la energía útil o absorbida, con la energía total suministrada.

Tabla 12. Simulación Tonatiuh para un ancho de 0.1 metros y largo 1 metro con reflectancia de 0.712. Parte 1

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Espejo 1 | 234,526 | 525,417 | 617,755 | 654,627 | 620,570 | 290,972 |
| Espejo 2 | 238,371 | 422,797 | 485,379 | 518,246 | 550,581 | 374,107 |
| Espejo 3 | 238,371 | 463,845 | 560,392 | 500,062 | 676,561 | 526,522 |
| Espejo 4 | 246,060 | 431,006 | 432,429 | 540,976 | 499,256 | 606,193 |
| Espejo 5 | 180,701 | 439,216 | 441,254 | 395,504 | 564,579 | 588,873 |
| Espejo 6 | 249,905 | 369,434 | 317,703 | 390,958 | 438,598 | 571,553 |
| Espejo 7 | 238,371 | 492,579 | 586,867 | 622,805 | 121,314 | 602,729 |
| Espejo 8 | 215,303 | 439,216 | 591,280 | 304,583 | 625,236 | 575,017 |
| Espejo 9 | 219,147 | 365,329 | 516,267 | 336,405 | 653,232 | 613,121 |
| Espejo 10 | 184,545 | 504,893 | 428,016 | 545,522 | 620,570 | 571,553 |
| Tubo 1 | 905,807 | 1954,76 | 1327,14 | 1458,44 | 1473,52 | 1302,3 |
| Tubo 2 | 308,36 | 1028,82 | 1658,92 | 1731,89 | 1660,63 | 1510,67 |
| Energía total | 2.245,300 | 4.453,732 | 4.977,342 | 4.809,688 | 5.370,497 | 5.320,640 |
| Energía útil | 1214,167 | 2983,58 | 2986,06 | 3190,33 | 3134,15 | 2812,97 |
| Eficiencia | 54,08% | 66,99% | 59,99% | 66,33% | 58,36% | 52,87% |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 13. Simulación Tonatiuh para un ancho de 0.1 metros y largo 1 metro con reflectancia de 0.712. Parte 2

| | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| Espejo 1 | 523,495 | 589,137 | 542,385 | 466,417 | 292,310 |
| Espejo 2 | 385,483 | 487,728 | 564,985 | 487,426 | 273,810 |
| Espejo 3 | 242,711 | 627,769 | 687,021 | 508,436 | 225,708 |
| Espejo 4 | 637,712 | 217,305 | 641,823 | 483,225 | 236,808 |
| Espejo 5 | 613,917 | 579,479 | 605,664 | 428,599 | 299,710 |
| Espejo 6 | 613,917 | 622,940 | 262,153 | 394,984 | 292,310 |
| Espejo 7 | 528,254 | 613,282 | 488,147 | 470,619 | 266,409 |
| Espejo 8 | 509,218 | 555,334 | 542,385 | 428,599 | 255,309 |
| Espejo 9 | 480,664 | 463,583 | 406,789 | 479,023 | 292,310 |
| Espejo 10 | 423,555 | 502,215 | 397,749 | 369,772 | 307,111 |
| Tubo 1 | 1312,08 | 1500,81 | 1608,65 | 1537,62 | 779,009 |
| Tubo 2 | 1431,36 | 1573,43 | 1812,56 | 1369,12 | 1595,11 |
| Energía total | 4.958,926 | 5.258,772 | 5.139,101 | 4.517,100 | 2.741,795 |
| Energía útil | 2743,44 | 5119,821 | 5083,646 | 4705,943 | 2734,181 |
| Eficiencia | 55,32% | 97,36% | 98,92% | 104,18% | 99,72% |

Fuente. Elaboración propia.

En Sol trace mide el flujo promedio con la posición del sol en un solo punto el cual es el punto máximo donde tomando como referencia las 12 p.m. En MATLAB también se tomó la posición del sol en un solo punto con las condiciones nombradas anteriormente.

Estos resultados contenidos en la Tabla 12 anterior dan una evidencia de cómo se comportan los rayos solares que inciden exitosamente en el tubo absorbedor, de acuerdo al cambio de posición del sol durante el día, evidenciando también las posiciones en las cuales se generan sombras en algunos espejos. Una vez obtenidas las eficiencias, se procede a realizar un promedio de éstas, con el fin de obtener una eficiencia aproximada del día, por medio del siguiente cálculo

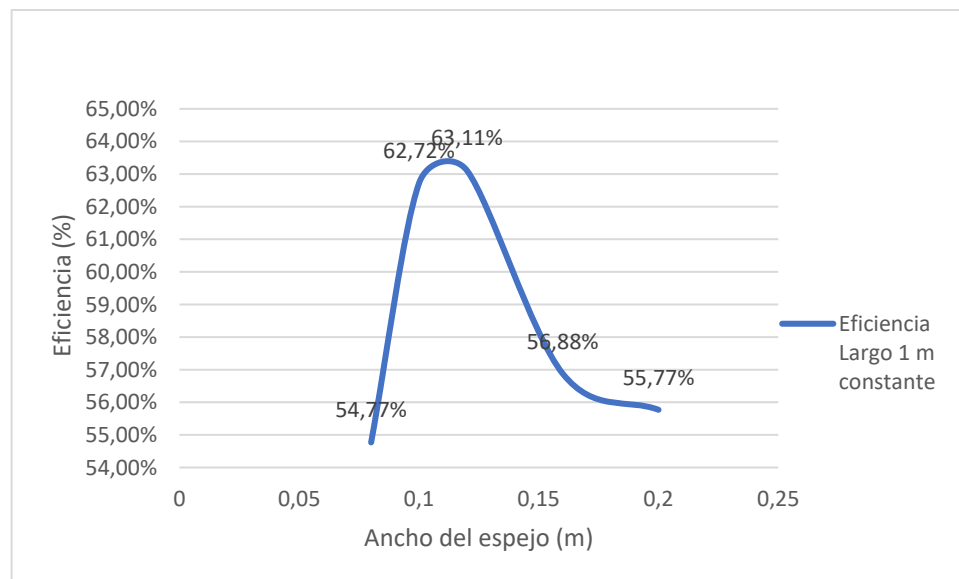
Ecuación 18

$$Eficiencia\ optica\ del\ día = \frac{\sum Eficiencia\ por\ hora}{Numero\ de\ datos}$$

10.2. RESULTADOS PARA ENCONTRAR EL PUNTO MÁXIMO DE EFICIENCIA.

En la siguiente gráfica se muestra una simulación hecha en Tonatiuh tomando el promedio de las eficiencias de todas las posiciones del sol en las diferentes horas del día de 7 am hasta las 5 pm con el objetivo de observar el comportamiento de la eficiencia óptica únicamente variando el ancho del espejo manteniendo los demás parámetros geométricos de la misma forma. Se puede concluir que a medida que aumento el ancho del espejo, la eficiencia óptica disminuye debido a que entre mas ancho los espejos mayor es la separación entre ellos y mayor el ancho total del concentrador Fresnel haciendo que los espejos de los extremos no puedan redirigir correctamente los rayos a la entrada del concentrador y también es debido a la altura del receptor secundario la cual debe aumentar para permitir que todos los rayos reflejados incidan correctamente en el sistema de reflexión secundario. La eficiencia óptica máxima se alcanza en el rango del 0.1 metro a 0.13 metro de ancho con una eficiencia de un 63.11%, por esta razón el rango que se escoge para la variación también es muy reducido debido a que si se escoge valores del ancho mas grandes, se bajará la eficiencia óptica.

Figura 49. Eficiencia óptica con largo 1 m constante y variación de los anchos de 0.08 a 0.2 m.



10.3. RESULTADOS DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN CON UNA REFLECTANCIA DE 0.712.

Tabla 14. Resultados del escenario de simulación con reflectancia de 0.712.

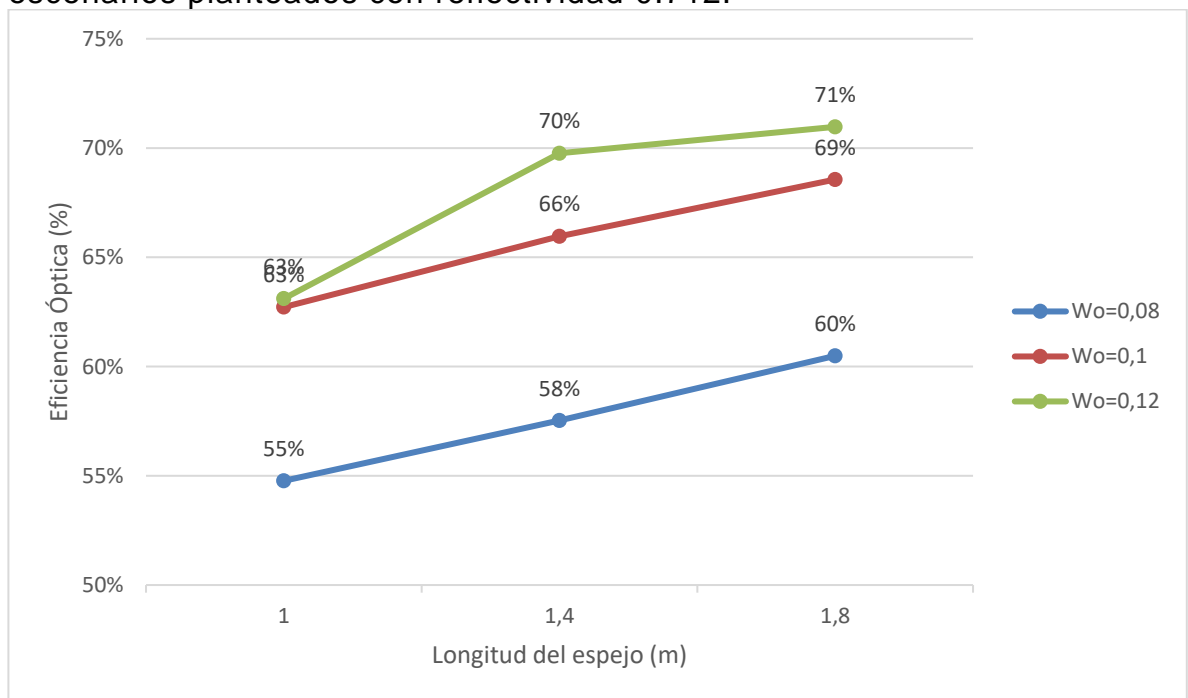
| Número de simulación | DNI (W/m ²) | Reflectancia | Ancho del espejo (m) | Separación entre espejos (m) | Longitud del espejo (m) | Eficiencia TONATIUH (%) | Eficiencia SOLTRACE (%) | Eficiencia MATLAB (%) |
|----------------------|-------------------------|--------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| | | | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|----------|-----|-------|------|------|-----|-------|-------|-------|
| 1 | | | | | 1 | 54,8% | 60,3% | 56,8% |
| 2 | | | 0,08 | 0,12 | 1,4 | 57,5% | 61,3% | 56,9% |
| 3 | | | | | 1,8 | 60,5% | 58,9% | 57,0% |
| 4 | | | | | 1 | 62,7% | 62,0% | 57,1% |
| 5 | 600 | 0,712 | 0,1 | 0,15 | 1,4 | 66,0% | 63,2% | 57,2% |
| 6 | | | | | 1,8 | 68,6% | 63,7% | 57,3% |
| 7 | | | | | 1 | 63,1% | 64,9% | 57,3% |
| 8 | | | 0,12 | 0,18 | 1,4 | 69,8% | 71,0% | 57,5% |
| 9 | | | | | 1,8 | 71,0% | 72,1% | 57,6% |

Fuente. Elaboración propia.

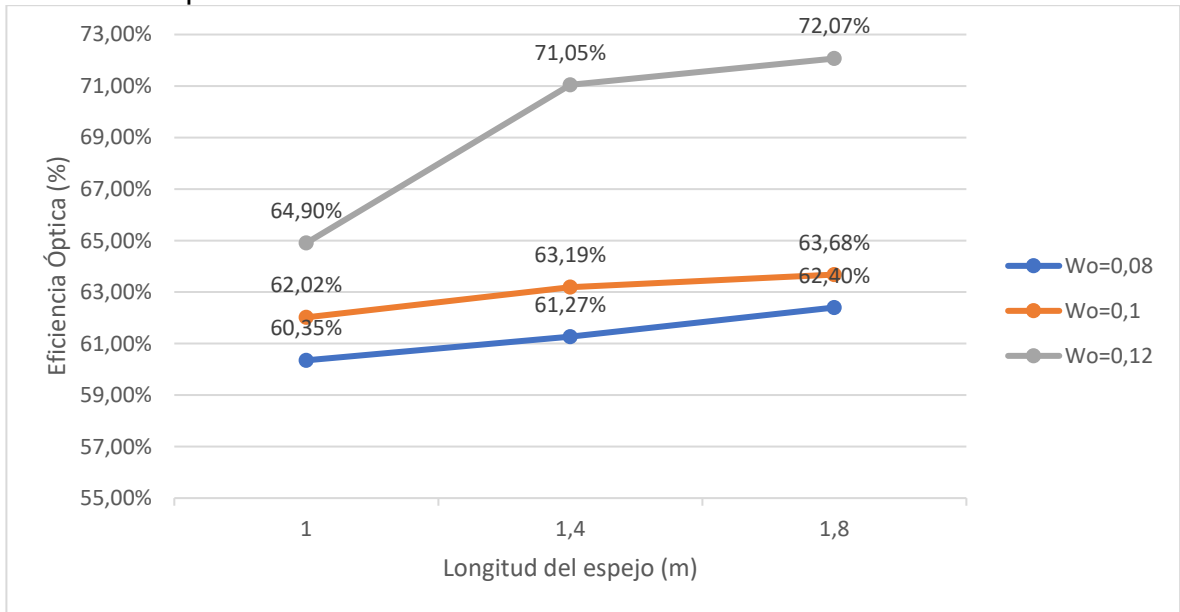
A continuación, se muestran las **Figura 50**, **Figura 51** y **Figura 52** que representan la eficiencia óptica por cada software simulado Soltrace, Tonatiuh y Matlab en las condiciones presentadas anteriormente, como se muestra en la Tabla 14, con una reflectancia de 0.712 de los espejos, variando el ancho de 0.08 metros a 0.12 metros y el largo del espejos variando en un largo de 1 metros a 1.8 metros. Se simuló para el día 100 del año, a las 11 a.m. de la mañana. En todas las simulaciones desarrolladas, se simuló con el nuevo reflector secundario CPC propuesto y se variaron fueron las condiciones del sistema reflector primario.

Figura 50. Comportamiento de la eficiencia óptica de Tonatiuh de los escenarios planteados con reflectividad 0.712.



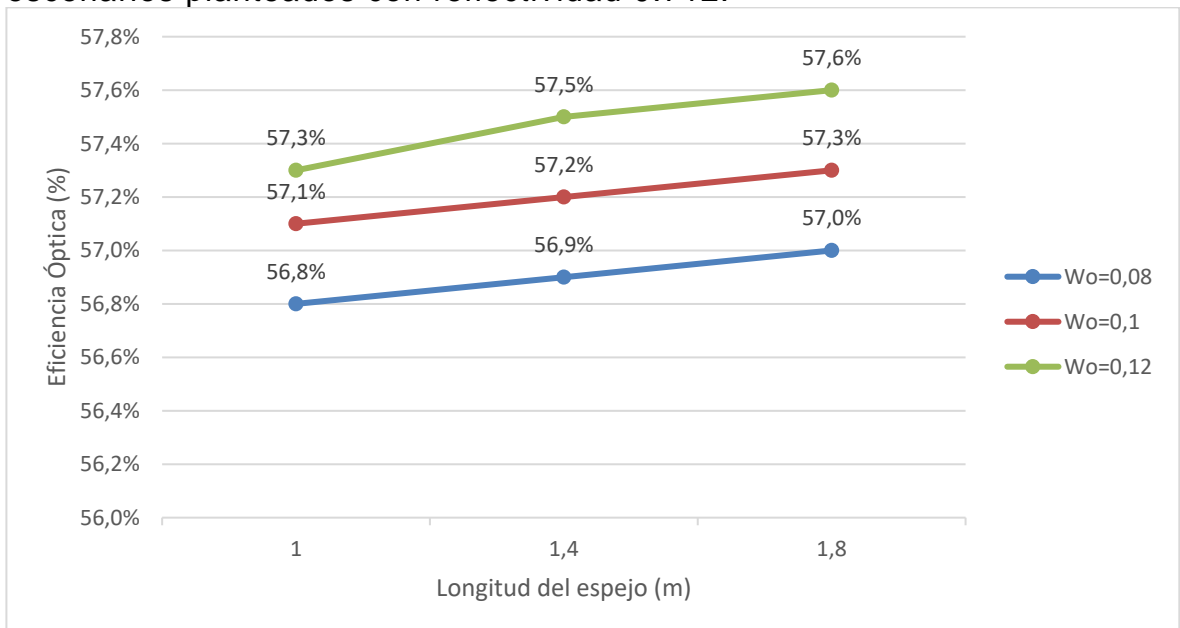
Fuente. Elaboración propia.

Figura 51. Comportamiento de la eficiencia óptica de Soltrace de los escenarios planteados con reflectividad 0.712



Fuente. Elaboración propia.

Figura 52. Comportamiento de la eficiencia óptica de Matlab de los escenarios planteados con reflectividad 0.712.



Fuente. Elaboración propia.

En la figura anterior se puede observar el comportamiento de la eficiencia óptica en cada escenario, se muestra una Figura por cada software Soltrace, Tonatiuh y Matlab. En las 3 Figuras, se demuestra que la eficiencia óptica tiene una tendencia creciente a medida que aumenta las dimensiones de los espejos en su largo y ancho, por eso, una de las mejores opciones para mejorar la eficiencia óptica es según la Figura 50, Figura 51 y Figura 52 un espejo con largo de 1,8 m y el ancho de 0,12 m, demuestra que tiene mejor eficiencia en todos los escenarios en las simulaciones de cada software además hay que tener en cuenta que cumple con los parámetros de diseños óptimos propuesto por [67] con respecto al ancho, la separación y el ancho total del colector debido a que los espejos no pueden estar muy pegados o muy separados entre ellos, al igual que cuando se varia aumentando o disminuyendo el ancho de los espejos.

En este caso la separación entre espejos es la adecuada para cada variación del ancho del espejo para no generar muchas pérdidas por sombras. Según un estudio hecho por [67] afirma que después de muchos análisis realizados de la geometría del LFC la separación de los espejos adecuada debe ser la anchura entre los centros del primer y el último espejo en total dividido en el número total de espejos del LFC, como se refleja en la Ecuación 1. Este sistema LFC estudiado y simulado LFC presente cumple con las condiciones nombradas anteriormente.

Normalmente, la eficiencia óptica del colector baja debido a que mientras más ancho el espejo más energía se capta, pero al mismo tiempo más energía se pierde debido a sombras y rayos perdidos ya que los espejos que se ubican en los extremos les es más difícil dirigir los rayos hacia el receptor. En este caso, con las variaciones pequeñas que se realizaron en el ancho, no se representa esta situación.

Por otro lado, si la separación entre espejos se aumenta demasiado las pérdidas por rayos perdidos aumentan debido a que es más difícil redireccionar la radiación incidente hacia la cavidad receptora para los espejos que se encuentren más lejos del receptor. La desventaja que se tiene al disminuir la separación y juntar demasiado los espejos, es que las pérdidas por sombras incrementan. Mientras más cerca se encuentren los espejos mayor sombra se hacen los unos a los otros, y también la sombra de la cavidad receptora los afecta más, es por esta razón que mientras menor sea la separación entre espejos, mayor es la pérdida por sombras.

En este caso en particular, las pérdidas por rayos perdidos son menores debido a que el ancho de los espejos es todos los casos de variación es menor que el ancho de placa absorbadora en la cavidad receptora. Al variar el ancho y el largo también se varía el área de concentración, es decir, para el caso de un largo de 1 m y un ancho de 0.08 m, el área de reflexión del concentrador es 0.8 m², mientras que en el caso de 0.12 m de ancho y 1.8 de largo es de 2.16 m². Si se considera una radiación directa normal de 600 W/m², el colector con espejos de 0.08 m entrega 480 W, mientras que el colector con espejos de 0.12 m ofrece 1,3 kW, un 62.61 %

de potencia adicional, cuando la eficiencia óptica es un 16 % mayor que en el primer caso.

Como se muestra en las 3 Figuras anteriores a medida que aumenta las dimensiones del largo y ancho aumenta la eficiencia óptica del LFC, debido a que al modificar el ancho del espejo, se aumentó la separación de manera proporcional con una relación de 1.5 el ancho de cada espejo y a su vez, implica que también varía el ancho total del concentrador, pero es importante tener en cuenta que existe un límite que no es estudiado dentro de los alcances de este proyecto en el que no se puede ampliar o disminuir mucho el ancho total del concentrador debido al caso en que si se reduce mucho el ancho total, la eficiencia óptica tendrá un aumento debido a la reducción del ángulo de reflexión, por lo que las pérdidas al ingreso del receptor se reducen o si se aumenta mucho el ancho total las pérdidas ópticas aumentarán. Una consecuencia adversa de reducir el ancho total del concentrador corresponde a posicionar los espejos más cerca entre sí, lo que aumenta las pérdidas por sombreado y bloqueo al aumentar el ángulo de incidencia del sol.

Por lo tanto, las Figura 50, Figura 51 y Figura 52 demuestran que el mejor rendimiento lo obtiene el escenario con el espejo de 0,12 metros de ancho y 1.8 metros de longitud la cual puede ser la opción para modificar el diseño del sistema reflector primario.

10.4. RESULTADOS DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN CON UNA REFLECTANCIA DE 0.92.

En la Tabla 15 presentada a continuación se realizó unas simulaciones con las mismas condiciones del numeral anterior basado en la Tabla 9 y en las mismas condiciones de medidas del largo y ancho del espejo variando la reflectancia, la reflectancia del modelo base de condiciones iniciales es 0.712, pero en las siguientes simulaciones se cambió a 0.92 de un vidrio blanco de superficie espejada cuyo soporte de vidrio contiene una leve concentración de hierro de 4 mm de grosor.

Tabla 15. Resultados del escenario de simulación con reflectancia de 0.712.

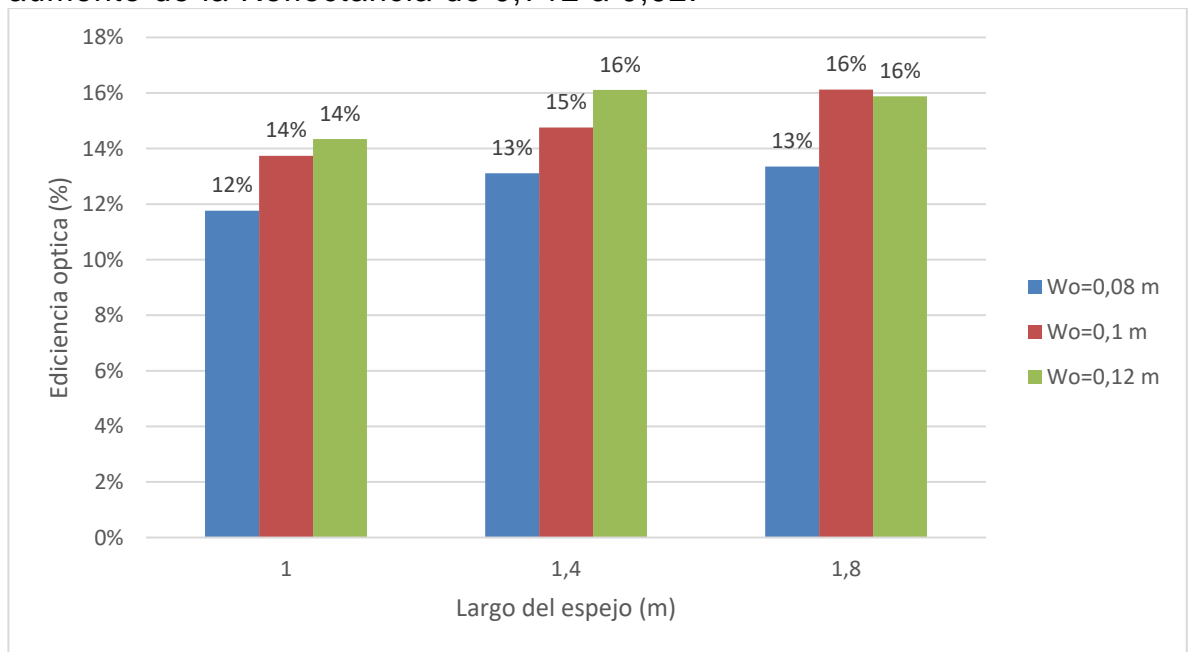
| Número de simulación | DNI (W/m ²) | Reflectancia | Ancho del espejo (m) | Separación entre espejos (m) | Longitud del espejo (m) | Eficiencia TONATIUH (%) | Eficiencia SOLTRACE (%) | Eficiencia MATLAB (%) |
|----------------------|-------------------------|--------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 10 | 600 | 0,92 | 0,08 | 0,12 | 1 | 66,5% | 75,0% | 73,3% |
| 11 | | | | | 1,4 | 70,6% | 75,5% | 73,5% |
| 12 | | | | | 1,8 | 73,8% | 76,9% | 73,7% |
| 13 | | | 0,1 | 0,15 | 1 | 76,5% | 80,7% | 73,7% |
| 14 | | | | | 1,4 | 80,7% | 84,9% | 73,9% |
| 15 | | | | | 1,8 | 84,7% | 81,6% | 74,1% |

| | | | | | | |
|-----------|------|------|-----|-------|-------|-------|
| 16 | | | 1 | 77,5% | 84,7% | 74,1% |
| 17 | 0,12 | 0,18 | 1,4 | 85,9% | 87,4% | 74,3% |
| 18 | | | 1,8 | 86,9% | 85,1% | 74,4% |

Fuente. Elaboración propia

La siguiente figura muestra gráficamente el porcentaje de aumento de la eficiencia óptica pasando de una reflectancia de 0.712 a 0.92, es decir, el porcentaje mostrado es el que aumentó con las mismas condiciones de simulación anterior variando únicamente la reflectancia. La **Figura 53** a es para Tonatiuh, la **Figura 54** para Soltrace y la **Figura 55** para Matlab.

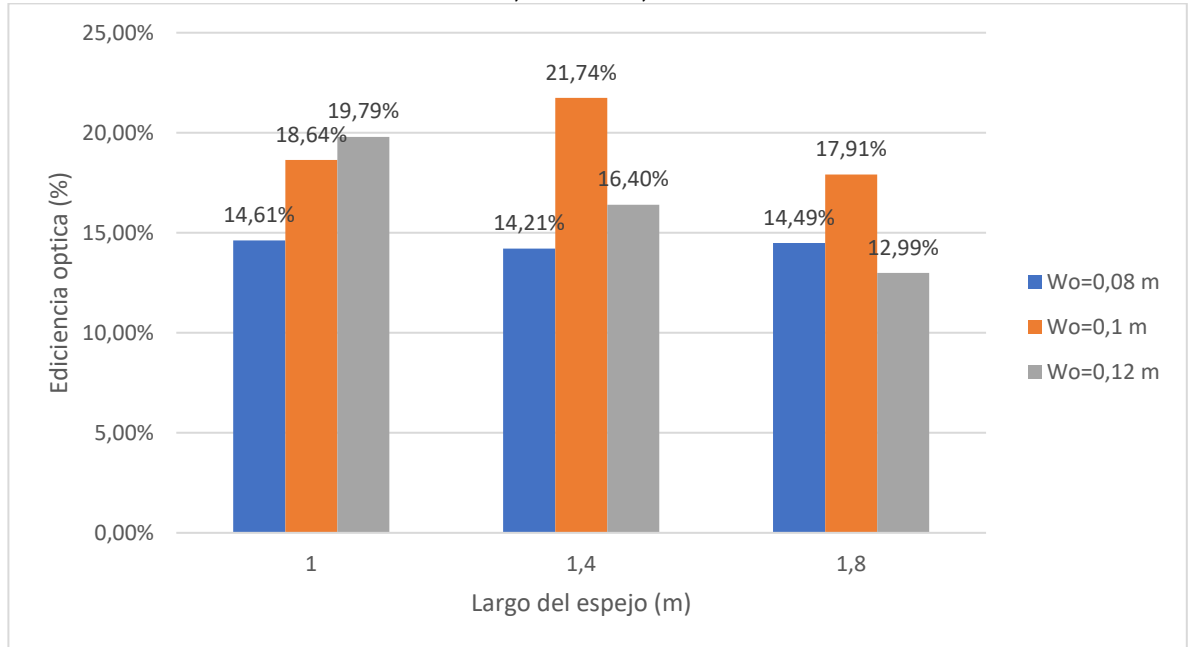
Figura 53. Simulación Tonatiuh Aumento en la Eficiencia Óptica por el aumento de la Reflectancia de 0,712 a 0,92.



Fuente. Elaboración propia

Se puede observar en la Figura anterior de la simulación de Tonatiuh que manteniendo las mismas condiciones pero aumentando la reflectancia de los espejos de 0.712 a 0.92, es posible lograr un gran aumento en la eficiencia óptica, debido a que manteniendo la longitud de 1 m, el aumento de la eficiencia óptica a medida que aumento el ancho del espejo aumenta en un rango del 12% al 14% con respecto al modelo inicial de la Figura 50, en el largo de 1.4 metros en un rango de 13% a 16% y en el largo de 1.8 metros en un rango de 13% al 16% todo con respecto al modelo inicial de la gráfica 50.

Figura 54. Simulación Soltrace - Aumento en la Eficiencia Optica por el aumento de la Reflectancia de 0,712 a 0,92.

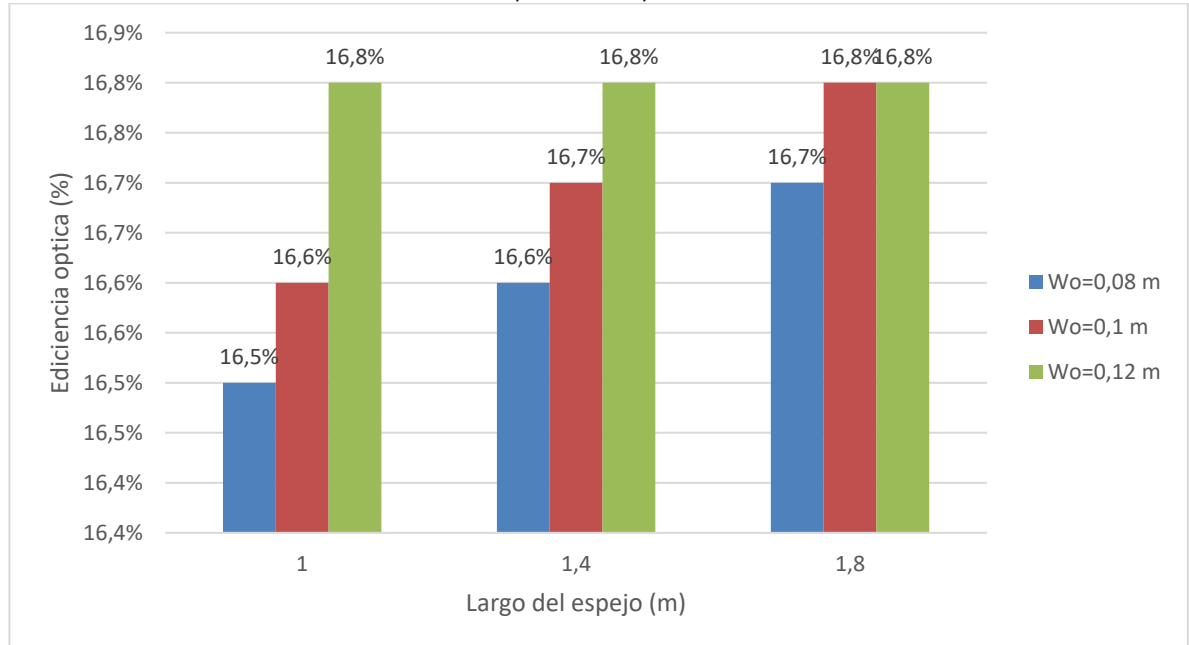


Fuente. Elaboración propia

Se puede observar en la Figura anterior de la simulación de Soltrace que manteniendo las mismas condiciones pero aumentando la reflectancia de los espejos de 0.712 a 0.92, es posible lograr un gran aumento en la eficiencia óptica, debido a que manteniendo la longitud de 1 m de longitud, el aumento de la eficiencia óptica a medida que aumento el ancho del espejo aumenta en un rango del 14.6% al 19.8% con respecto al modelo inicial de la Figura 51, en el largo de 1.4 metros en un rango de 14.21% a 21.74% y en el largo de 1.8 metros en un rango de 13% al 18%.

Se puede notar que los rangos de la figura 54 en el aumento de eficiencia de Soltrace debido al aumento de la reflectancia son un poco diferentes a los presentados en la Figura 53 de Tonatiuh debido a la posición del sol, ya que Soltrace solamente tiene en cuenta una posición del sol en su punto máximo a las 12 p.m mientras Tonatiuh tiene todas las posiciones del sol por hora del día y se saca una eficiencia por cada hora del día para sacar un promedio general de la eficiencia del día.

Figura 55. Simulación MATLAB - Aumento en la Eficiencia Optica por el aumento de la Reflectancia de 0,712 a 0,92.



Fuente. Elaboración propia

En general en la Figura 53, Figura 54 y Figura 55 se demuestra que la reflectancia de los espejos del sistema reflector primario aumenta considerablemente la eficiencia debido a que el vidrio recomendado con la reflectancia de 0.92 es un vidrio blanco con alta transparencia con una concentración de hierro en su composición mayor a los vidrios de las condiciones iniciales del sistema.

10.5. COMPARACIÓN POR SOFTWARE DEL SISTEMA INICIAL Y PROPUESTO

La siguiente tabla muestra las condiciones de cada uno de los modelos mostrados en la Figura 56 y Figura 57.

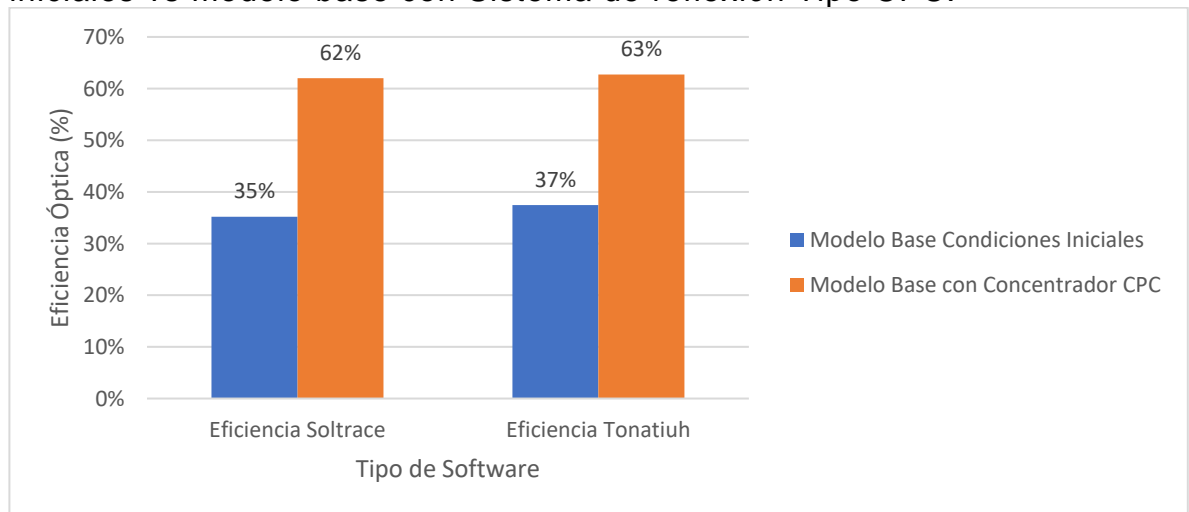
Tabla 16. Comparación de diferentes modelo analizados.

| | Ancho del espejo (m) | Separación entre espejos (m) | Longitud del espejo (m) | Reflectancia | Tipo de reflector secundario |
|--|----------------------|------------------------------|-------------------------|--------------|------------------------------|
| Modelo Base (Condiciones iniciales) | 0,1 | 0,15 | 1 | 0,712 | Trapezoidal |
| Modelo Base con CPC | 0,1 | 0,15 | 1 | 0,712 | Parabólico Compuesto |
| Modelo Propuesto | 0,12 | 0,18 | 1,8 | 0,92 | Parabólico Compuesto |

Fuente. Elaboración propia

En la siguiente Figura se compara el modelo base con las condiciones iniciales, el modelo base con diferente concentrador CPC

Figura 56. Comparación por Software del Modelo base con condiciones iniciales vs modelo base con Sistema de reflexión Tipo CPC.



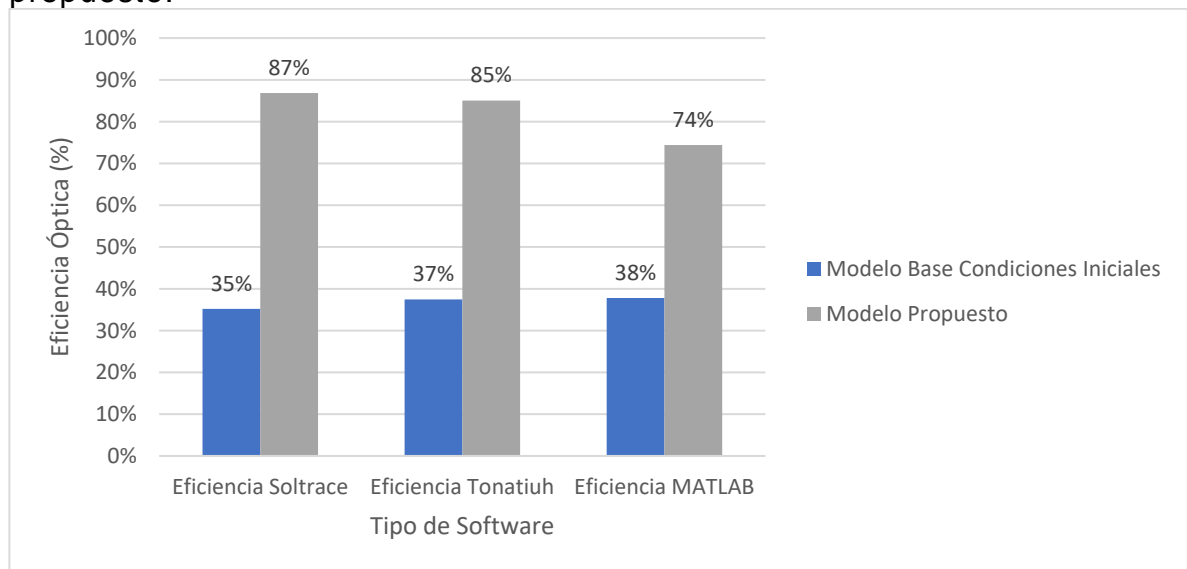
Fuente. Elaboración propia

En la Figura 56 **Figura 56** el modelo base se refiere al modelo presentado en las condiciones iniciales presentado en la Tabla 4 el cual tiene los espejos de un largo de 1 metro de largo y un ancho de 0.1 metros con una reflectancia de 0.712 y un concentrador secundario de forma trapezoidal. El modelo base con concentrador tipo CPC, es el mismo modelo con las mismas condiciones iniciales presentadas en la tabla 3, pero con diferente concentrador secundario, proponiendo uno tipo CPC

con las características como se menciona en la Tabla 16. Cambiando el concentrador secundario permite dar un gran salto en la eficiencia comparado con el modelo Base aumenta de un 26% al 27% según los resultados de Soltrace y Tonatiuh, entonces queda en evidencia, que es muy importante la implementación de este tipo de concentrador secundario en el modelo actual. Lo que permite validar que el modelo base con cavidad tipo CPC presenta una mejor eficiencia que el modelo base con cavidad trapezoidal.

En la siguiente figura, se compara el modelo base con condiciones iniciales con el modelo propuesto producto de los resultados de las simulaciones de los escenarios anteriores

Figura 57. Comparación de la eficiencia del modelo base con el modelo propuesto.



Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 57 **Figura 57**, Para el modelo base inicial, se evidencia que la eficiencia varía del 35% en Soltrace ,37% Tonatiuh y 38% Matlab con esto se puede validar el modelo de Matlab es adecuado para las condiciones iniciales del prototipo ya que los resultados de los 3 software son muy parecidos también debido a que da valores cercanos a soltrace y tonatiuh a pesar que tiene unas restricciones y limitaciones nombradas en el numeral 8.5.2.2. Una de ellas es que el modelo geométrico desarrollado por [131] no tiene en cuenta la forma exacta del receptor, debido a que se estudia más el efecto de los parámetros geométricos del sistema reflector primario en los modificadores del ángulo de incidencia (IAM) para la eficiencia óptica. También por eso se debe la diferencia de la simulación en Matlab con Soltrace y Tonatiuh en el modelo propuesto, ya que en Soltrace y Tonatiuh da 87%

y 85% comparado con 74% no da con un valor cercano debido a que no tienen en cuenta la forma exacta del receptor.

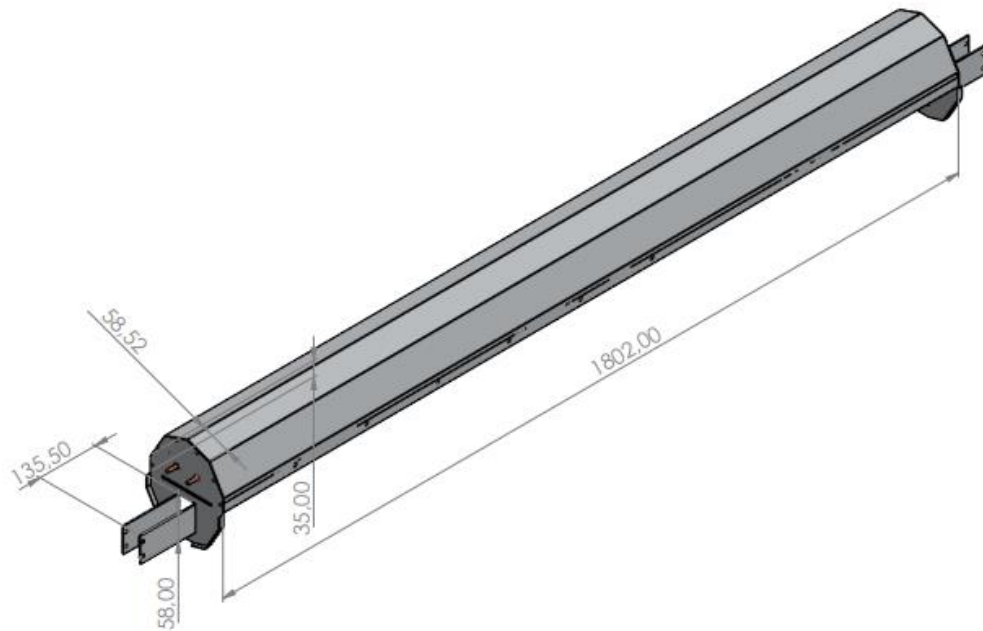
A comparación del sistema LFC inicial con cavidad trapezoidal, este sistema LFC propuesto, su salto de eficiencia fue principalmente por el mejoramiento de su concentrador secundario tipo CPC debido a que quedó demostrado que este tipo de reflector garantiza que la máxima concentración de rayos fuera del objetivo se redirija al receptor por reflexión secundaria. Su éxito en el mejoramiento de la eficiencia se debe a que, a diferencia de las distintas formas estudiadas, es la más eficiente porque es la que tiene una menor distancia vertical respecto al receptor. Este reflector secundario se encuentra ubicado a una distancia adecuada del sistema primario debido a que no encuentra tan lejano a él porque los reflectores situados a mayor distancia alcanzan valores más bajos de eficiencia óptica [referencia]. Se podría decir que se encuentra en el punto óptimo en donde se disminuyen tanto las pérdidas ópticas como térmicas.

Respecto del sistema propuesto con el reflector CPC y el aumento en las medidas del espejo reflector y el aumento de su reflectancia, comparado con el modelo inicial mejoraría un 49% su eficiencia óptica según Soltrace, 48% según Tonatiuh y un 37% según Matlab. Se puede afirmar que el modelo propuesto final mejora la eficiencia notablemente. Es necesario cambiar el reflector secundario trapezoidal por el propuesto tipo CPC, se llevará a cabo la opción de un aumento de dimensiones en los espejos pasando de 1 metro de longitud a 1.8 metros, 0.1 metros de ancho a 0.12 metros y una separación de 0.18 metros. Por último, para lograr ese aumento de eficiencia también es necesario, el cambio del espejo actual de reflectancia 0.712 y 8mm de grosor por uno de 4mm con reflectancia 0.92 de alta transparencia sería lo más recomendable para aumentar de un 12% a un 16% su eficiencia.

10.6. PROPUESTA DE MEJORA GEOMÉTRICA EN EL SISTEMA LINEAL FRESNEL.

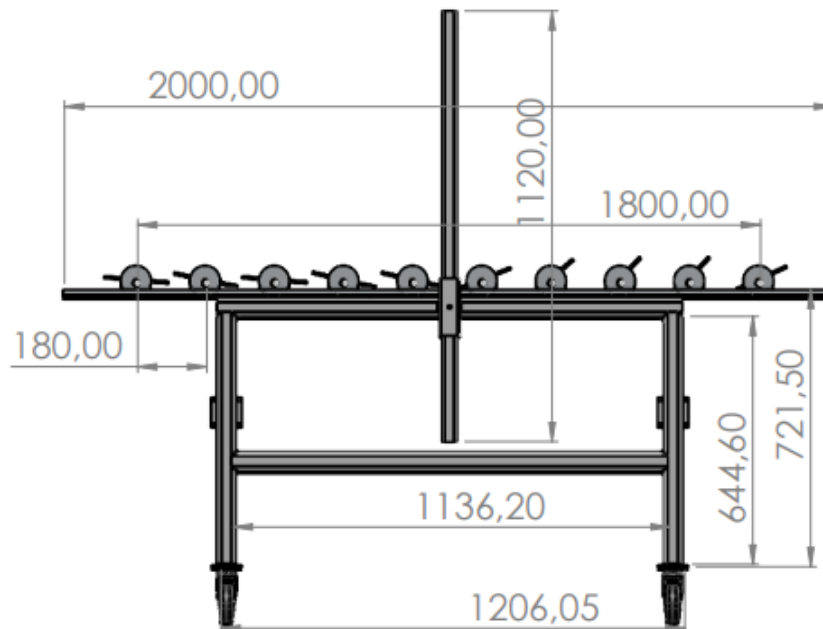
A continuación, se presenta el diseño final seleccionado después del análisis desarrollado anteriormente, el sistema reflector secundario es el mismo que el desarrollado en el numeral 8.3, pero con diferentes medidas en la longitud del sistema reflector, y el sistema reflector primario aumenta las dimensiones con respecto al modelo LFC de las condiciones iniciales, la separación de espejos aumenta de 0,15 metros a 0,18 metros, el ancho de los espejos aumenta de 0,1 metros a 0,12 metros y la longitud de los espejos aumenta de 1 metro a 1.8 metros. Lo demás sigue manteniendo las mismas condiciones iniciales, a continuación en la Figura 58, Figura 59 y Figura 60 se presenta el diseño final. Los planos principales del diseño se presentan en el Anexo B.

Figura 58. Vista Isométrica del reflector secundario diseñado con el largo de 1.8 m.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 59. Vista Frontal del sistema reflector primario con sus dimensiones mejoradas.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 60. Vista lateral del sistema reflector primario con sus nuevas dimensiones.



Fuente. Elaboración propia.

11. CONCLUSIONES

Las variables identificadas de las cuales depende geoméricamente la eficiencia óptica son la distancia focal de los espejos primarios, la altura del absorbedor sobre el plano de los espejos primarios, la anchura de los espejos primarios, la latitud de la ubicación, la separación entre los espejos y el número de filas de espejos paralelos. La forma geométrica del sistema de reflexión secundario causa el mayor efecto en el mejoramiento de la eficiencia óptica.

Las mejores condiciones geométricas que garantizaron un aumento en la eficiencia óptica fue el aumento de las dimensiones de los espejos de 0.12 metros de ancho y 1.8 de largo, manteniendo un espaciado adecuado de 0.18 metros, el nuevo reflector CPC y la reflectancia del espejo de 0.92 vidrio blanco de superficie espejada cuyo soporte de vidrio contiene una leve concentración de hierro de 4 mm de grosor contribuye aproximadamente en un de mejoramiento de la eficiencia óptica.

La propuesta de mejora presentada del LFC para mejorar su eficiencia óptica aumenta en un 48% su eficiencia óptica con respecto al modelo base inicial, lo cual demuestra que el concentrador secundario tipo CPC, mejora en un 26% la eficiencia óptica, es el más eficiente para recuperar los rayos perdidos ya que garantiza que la máxima concentración de rayos fuera del objetivo se redirija al receptor por reflexión secundaria y además el mejoramiento de su reflectancia de 0.92 aumenta en un 16% la eficiencia óptica, el aumento de las dimensiones en el ancho y largo de los espejos permite un mayor área de reflexión y aumenta la eficiencia óptica del sistema LFC manteniendo el concepto de tecnología apropiada. Si se quiere mejor el sistema actual, esta propuesta mejora la eficiencia óptica y mantiene el concepto de tecnología apropiada.

12. RECOMENDACIONES

Se sugiere la continuación de este proyecto de manera que el código y modelo matemático de este proyecto sea la base para desarrollar un modelo matemático que incluya la forma exacta del sistema de reflexión secundario para obtener datos más fiables de la eficiencia óptica.

Existen muchas áreas para seguir trabajando o investigando en este tema. Uno de los posibles trabajos consiste en realizar la validación experimental de los modelos ópticos planteados en este trabajo.

Mediante un estudio más exhaustivo del sistema se podría llegar a determinar un análisis dinámico del sistema para desarrollar un código cuyos datos de entrada presenten una variación en el tiempo y por lo tanto sea observable el cambio de los resultados según la hora del día y el clima de la zona.

Una alternativa de propuesta para el cambio de recubrimiento externo en el reflector secundario, es la pintura negro mate, esta pintura no tiene las propiedades de absorción de la musou black, ni tampoco se han realizado estudios para encontrar sus propiedades termodinámicas, pero al ser pintura negra y no tener acabado brillante, ayudara absorber una gran cantidad de rayos incidentes, ayudando a la colección y aumento de calor en el reflector secundario.

De igual manera, se recomienda, implementar un sistema de seguimiento solar, adecuado que permita que los espejos del sistema de reflexión primario, se muevan de acuerdo a la posición del sol, para de esta manera evitar el movimiento manual de los espejos.

Otra área de estudio podría ser el aumento de la anchura de los espejos y de la altura del receptor. Esto sólo sería apropiado para una instalación más grande en la que el espacio no esté limitado. Unos espejos más anchos y un receptor más alto permitirían introducir la curvatura del espejo. Debido a la rigidez de los espejos de cristal, esto no es factible para espejos de poca anchura, ya que es probable que se rompan. Como alternativa, se podría investigar un material reflectante flexible como superficie de espejo primario. La curvatura del espejo mejora la relación de concentración y permite reducir la anchura del receptor.

Finalmente, se recomienda llevar a cabo, un proyecto enfocado en determinar las pérdidas en el sistema de reflexión secundario implementado en el presente proyecto, con el fin de mejorar el rendimiento del sistema LFC.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. M. Omer. «Energy, environment and sustainable development. Renewable and sustainable energy reviews» 2008.
- [2] P. Heller «Introduction to CSP systems and performance. En Peter Heller (Ed.), The Performance of Concentrated Solar Power (CSP) Systems» 2017.
- [3] S. Ziuku, L. Seyitini, B. Mapurisa, D. Chikodzi, K. Koen van «Ener para Sust. Desarrollar» 2014
- [4] E. Bellos, C. Tzivanidis, M.A. Moghimi «Reducing the optical end losses of a linear Fresnel reflector using novel techniques» 2019
- [5] E. Bellos, C. Tzivanidis «Assessment of linear solar concentrating technologies for Greek climate Energy Convers» 2018
- [6] R. Loni, E.A. Asli-Ardeh, B. Ghobadian, M.H. Ahmadi, E. Bellos «GMDH modeling and experimental investigation of thermal performance enhancement of hemispherical cavity receiver using MWCNT/oil nanofluid» Sol. Energy, 2018, pp. 790-803.
- [7] P. Dellicompagni, J. Franco «Potential uses of a prototype linear Fresnel concentration system Renew» Energy, 2018, pp. 1044-1054
- [8] Zafar S., Mokhtar G., Ahmed A., Boussad B. «Optical performance assessment of a small experimental prototype of linear Fresnel reflector» 2019
- [9] UDEC, «Universidad de Cundinamarca», 2021 [En línea] Available: <https://www.ucundinamarca.edu.co/index.php/noticias-ucundinamarca/2932-tecnologias-apropiadas-que-son-y-para-que-sirven>.
- [10] M. Noman, A. Wasim, M. Ali, M. Jahanzaib, S. Hussain, H.M.K. Ali, H.M. Ali An investigation of a solar cooker with parabolic trough concentrator Case Stud. Therm. Eng., 2019
- [11] C. Tzivanidis, E. Bellos The use of parabolic trough collectors for solar cooling – a case study for Athens climate Case Stud. Therm. Eng., 8, 2016, pp. 403-413
- [12] C. Tzivanidis, E. Bellos, D. Korres, K.A. Antonopoulos, G. Mitsopoulos Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector Case Stud. Therm. Eng., 6, 2015, pp. 226-237
- [13] W. Fuqiang, C. Ziming, T. Jianyu, Y. Yuan, S. Yong & L. Linhua «Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review» Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, pp.1314-1328.
- [14] M. Malekan, A. Khosravi & M. El Haj Assad «Parabolic trough solar collectors» En M. E. H. Assad & M. A. Rosen (Eds.), Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems, 2021 pp. 85–100.
- [15] W. Platzer, D. Mills & W. Gardner «Linear Fresnel Collector (LFC) solar thermal technology» En Keith Lovegrove & W. Stein (Eds.), Concentrating Solar Power Technology, 2021 pp. 165–217.

- [16] B. E. Tarazona Romero, Desarrollo de la simulación óptica de un prototipo artesanal de concentrador lineal Fresnel a través de la aplicación de los softwares Sol Trace y Tonatiuh., Bucaramanga, 2021
- [17] N. Kincaid, G. Mungas, N. Kramer & G. Zhu «Sensitivity analysis on optical performance of a novel linear Fresnel concentrating solar power collector» Solar Energy, 2019.
- [18] M. Gonzales, «Estado del Arte de la Tecnología de generación de energía eléctrica a partir de concentración de energía solar.,» SUBSECRETARIA DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA, 2019.
- [19] W. Sepúlveda, M. Pineda & S. Mora «Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta» Entre Ciencia e Ingeniería, 2018.
- [20] K. Mallon, F. Assadian & B. Fu «Analysis of On-Board Photovoltaics for a Battery Electric Bus and Their Impact on Battery Lifespan.» 2017
- [21] O. Planas «¿Qué es la energía termosolar? Energía solar térmica.» Energía solar, 2017.
- [22] A. Häberle, & D. Krüger «Concentrating solar technologies for industrial process heat.» En Keith Lovegrove & W. Stein (Eds.), Concentrating Solar Power Technology (Second Edition), 2021.
- [23] O. Planas «¿Qué es un concentrador solar? Tipos, funcionamiento y usos.» Energía solar, 2015.
- [24] M. Revelo & S. Salazar «Diseño y simulación de un colector solar lineal de Fresnel para la producción de vapor en base a las condiciones climáticas de la ciudad de Quito.» 2015.
- [25] C. Venegas «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL.» 2017
- [26] A. Häberle «Linear Fresnel Collectors». En C. Richter, D. Lincot, & C. A. Gueymard (Eds.), Solar Energy, 2013.
- [27] Z. Said, M. Ghodbane, A. Hachicha & B. Boumeddane «Optical performance assessment of a small experimental prototype of linear Fresnel reflector.» Case Studies in Thermal Engineering, 2019.
- [28] O. Delgado «METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO ANUAL DE SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN DE ENERGÍA SOLAR» 2019
- [29] CENER «Tonatiuh, ray tracing for solar energy.», Congreso de Colombia. (2014). Leyes desde 1992—Vigencia expresa y control de constitucionalidad [LEY_1715_2014]., [En línea] Available: <https://www.cener.com/documentacion/TONATIUH.pdf>
- [30] J. López «Análisis óptico y energético de un captador Fresnel» 2017.
- [31] NREL, «SolTrace | Concentrating Solar Power. Concentrating Solar Power», 2021[En línea] Available: <https://www.nrel.gov/csp/soltrace.html>
- [32] F. Bianchi «Introducción a MATLAB» Universidad Nacional de La Plata, 2021.
- [33] G. Betsegaw «Study on the Performance of Linear Fresnel Solar Collector with Sensible Thermal Energy Storage for Industrial Process Heat Generation» 2019

- [34] ENSA «¿Qué es la energía?» ENSA, 2016
- [35] A. Lozano & D. Adriana «Evaluación de la orientación y el ángulo de inclinación óptimo de una superficie plana para maximizar la captación de irradiación solar en Cuenca-Ecuador», 2017
- [36] EUDE «La importancia de las energías renovables. Eude Business School», 2019
- [37] K. Reddy & K. Kumar «Estimation of convective and radiative heat losses from an inverted trapezoidal cavity receiver of solar linear Fresnel reflector system» Int. J. Therm, 2014.
- [38] F. Huang, L. Li & W. Huang «Optical performance of an azimuth tracking linear Fresnel solar concentrator» Sol. Energy, 2014.
- [39] J. He, Z. Qiu, Q Li & Y. Zhang «Optical design of linear Fresnel reflector solar concentrators» Energy Procedia, 2012.
- [40] G. Zhu «Development of an analytical optical method for linear Fresnel collectors» Sol. Energy, 2013.
- [41] E. Bellos, & C. Tzivanidis «Assessment of linear solar concentrating technologies for Greek climate» Energy Convers, 2018.
- [42] Y. Qiu, Y. He, Z. Cheng, K. Wang «Study on optical and thermal perforation of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods» Appl. Energy, 2015.
- [43] P. Boito, R. Grena «Optimización de la geometría de colectores lineales Fresnel» Sol. Energía, 2016.
- [44] G. Zhu «New adaptive method to optimize the secondary reflector of linear Fresnel collectors». Solar Energy, 2017.
- [45] C. Wang, J. Ma, Y. Zhou, & R. Wang «Optimized design of a linear Fresnel collector with a compound parabolic secondary reflector» Renewable Energy, 2021.
- [46] Singh PL, Ganesan S., Yadav GC, Ren. Ener.18 (1999) 409-416.
- [47] VATIA «Cinco razones por las que Colombia podría ser potencia en energía solar» Eficiencia energética comprometida con el medio ambiente, 2020.
- [48] CELSIA «Todo lo que debes saber sobre energía solar en Colombia» Celsia Eficiencia energética, 2017
- [49] Congreso de Colombia «Leyes desde 1992—Vigencia expresa y control de constitucionalidad» [LEY_1715_2014], 2014
- [50] L. Soto, «Ley 2099 de 2021 “Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones”». Derecho del Medio Ambiente, 2021
- [51] Hernández, C. Fernández & P. Baptista «Software and Codes for Analysis of Concentrating Solar Power Technologies» McGraw-Hill Higher Education, 2003.
- [52] E. Coronel «Concentrador solar tipo Fresnel lineal para producir vapor de agua», Universidad nacional del centro del Perú. Huancayo, Perú, 2017

- [53] C. Jaramillo «Modelación y simulación del comportamiento térmico de un receptor solar de media temperatura tipo Fresnel de geometría trapezoidal» Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2017.
- [54] S. Velandia & J. Becerra «Evaluación del comportamiento óptico y térmico de un prototipo de colector lineal Fresnel (LFC) por medio de simulación numérica», 2021
- [55] A. Vouros, E. Mathioulakis, E. Papanicolaou, & V. Belessiotis «On the optimal shape of secondary reflectors for linear Fresnel collectors», Renewable Energy, 2019
- [56] J. E. Morales Medina y N. D. Quintero Escobar , Desarrollo De Un Sistema De Reflexión Secundario Para Un Prototipo De Concentrador Lineal Tipo Fresnel, Bucaramanga, 2021.
- [57] R. Abbas, A. Sebastián, M. Montes & M. Valdés «Optical features of linear Fresnel collectors with different secondary reflector technologies» Applied Energy, 2018
- [58] O. Planas «¿Qué es un colector solar térmico? Tipos de captadores», 2019
- [59] IRESTAL GROUP.«TABLAS TÉCNICAS DEL ACERO INOXIDABLE», 2020
- [60] M. García, «Impacto ambiental de las energías renovables», Universidad Central, 2021.
- [61] G. Betsegaw «Study on the Performance of Linear Fresnel Solar Collector with Sensible Thermal Energy Storage for Industrial Process Heat Generation» Doctoral dissertation, ASTU, 2019
- [62] J. Song, J. Ma, Z. Zhan y Y. Dai «Análisis óptico y optimización del campo de espejos del colector lineal de Fresnel» En Foro Internacional sobre Energía, Ciencias Ambientales y Materiales, 2015
- [63] R. Abbas & J. Martínez-Val «Analytic optical design of linear Fresnel collectors with variable widths and shifts of mirrors» Renewable Energy, 2015
- [64] E. Flores «Desarrollo de un modelo óptico y térmico de un colector solar lineal Fresnel con receptor trapezoidal», Quito, 2019.
- [65] M. Hongn & S. Larsen «Medidas de reflectancia espectral para espejos utilizados en la captación de energía solar.» Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA, 2014
- [66] Z. Said, M. Ghodbane, A. Hachicha & B. Boumeddane «Optical performance assessment of a small experimental prototype of linear Fresnel reflector» Case Studies in Thermal Engineering, 2019.
- [67] E. Bellos & C. Tzivanidis «Development of analytical expressions for the incident angle modifiers of a linear Fresnel reflector» Solar Energy, 2018.
- [68] H. Mohamed & M. Amr «Thermal analysis of the performance of linear Fresnel solar concentrator» Journal of Clean Energy Technologies, 2016.
- [69] M. Wagner «Results and comparison from the SAM linear Fresnel technology performance model (No. NREL/CP-5500-54758)» National Renewable Energy Lab.(NREL), United States, 2012

- [70] E. Bellos, E. Mathioulakis, C. Tzivanidis, V. Belessiotis & K. Antonopoulos «Experimental and numerical investigation of a linear Fresnel solar collector with flat plate receiver» Energy Conversion and Management, 2016.
- [71] M. C. Díaz-Galiano, «Leyes de Caracterización de Colectores Solares tipo,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.

Anexo A. Código de la simulación de MATLAB.

```
clc
disp('Programa 1')
%Valores fijos
Wo=0.12; %Ancho de cada espejo reflectante

%datoseficiencia
N=5;%Numero de espejos es un lado
pm=0.92; %reflectividad
alfa=0.8; % factor de absorcion
F=0.75;%Distancia focal
lm=1.8; %largo del espejo
Dw=3*Wo/2; %espaciado
w=2*N*Dw; %ancho total

nday=100;
qlat=7.10541380;
thour=11;
s=23.45*sind(360*(284+nday)/365);
wtime=15*(thour-12);

theta=acosd(sind(s)*sind(qlat)+ cosd(s)*cosd(qlat)*cosd(wtime));

ys=asind(cosd(s)*sind(wtime)/sind(theta));

Thetal=atand(cosd(ys)*tand(theta))
Thetat=atand(sind(ys)*tand(theta))

am=2*atand((w/4)/(F+(F^2+(w/4)^2)^0.5))

thetacrit=94.46-2.519*(Wo/Dw)-55.71*(Wo/Dw)^2-0.48*am+1.77*((am^2)/1000)+1.15*(Wo/Dw)*am

if thetacrit>Thetat
    kt=cosd(Thetat/2)-((w/4)/(F+(F^2+(w/4)^2)^0.5))*sind(Thetat/2)
end
if thetacrit<Thetat
    kt=(cosd(Thetat/2)-((w/4)/(F+(F^2+(w/4)^2)^0.5))*sind(Thetat/2))*
    (Dw/Wo)*(cosd(Thetat)/cosd((Thetat+am)/2))
end

k1=cosd(Thetal)-(F/lm)*(1+(w/(4*F))^2)^0.5*sind(Thetal)

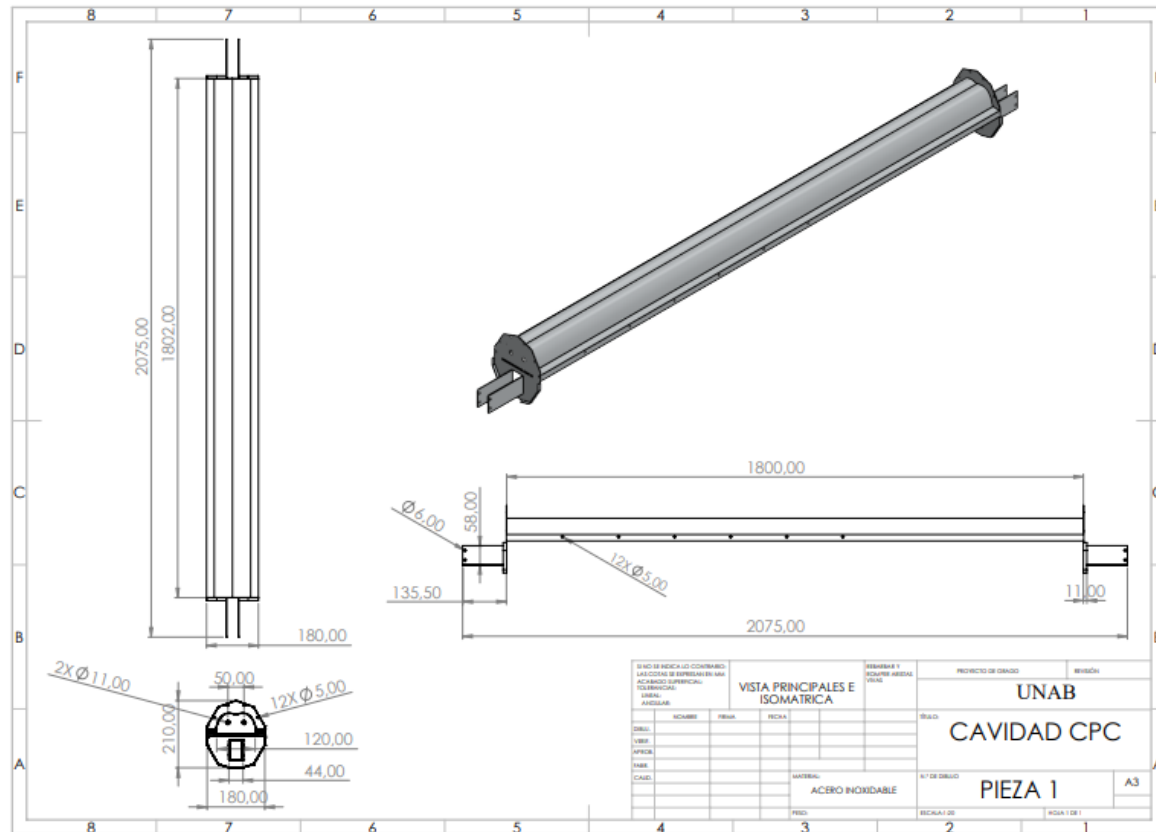
Ef=alfa*pm*0.95*kt*k1;

fprintf(' Wo:%.3f', Wo)
fprintf(' Dw:%.3f', Dw)
fprintf(' w:%.3f', w )
fprintf(' ys:%.3f', ys)
fprintf(' Kt:%.3f', kt)
fprintf(' K1:%.3f', k1)

fprintf(' Eficiencia: %.3f', Ef)
```

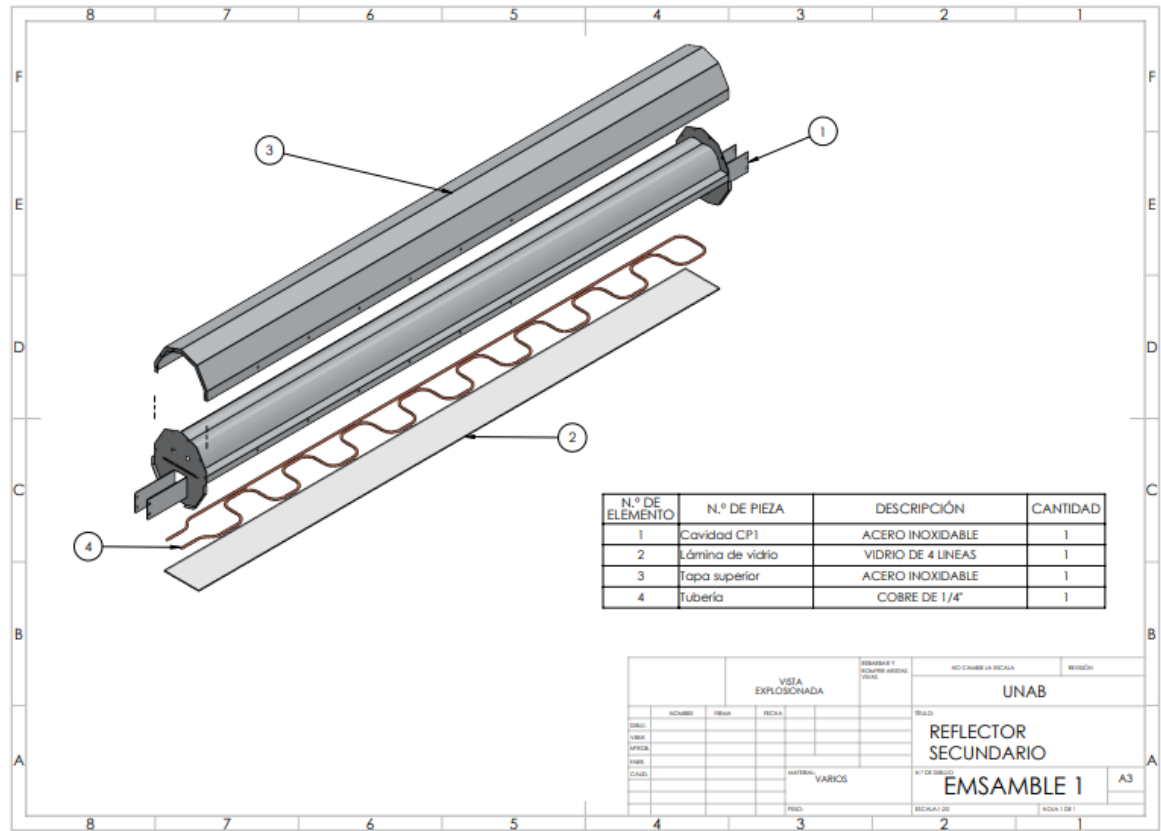
Anexo B. Planos del diseño geométrico final propuesto.

Figura 61. Vista isométrica del sistema de reflexión secundario tipo CPC.



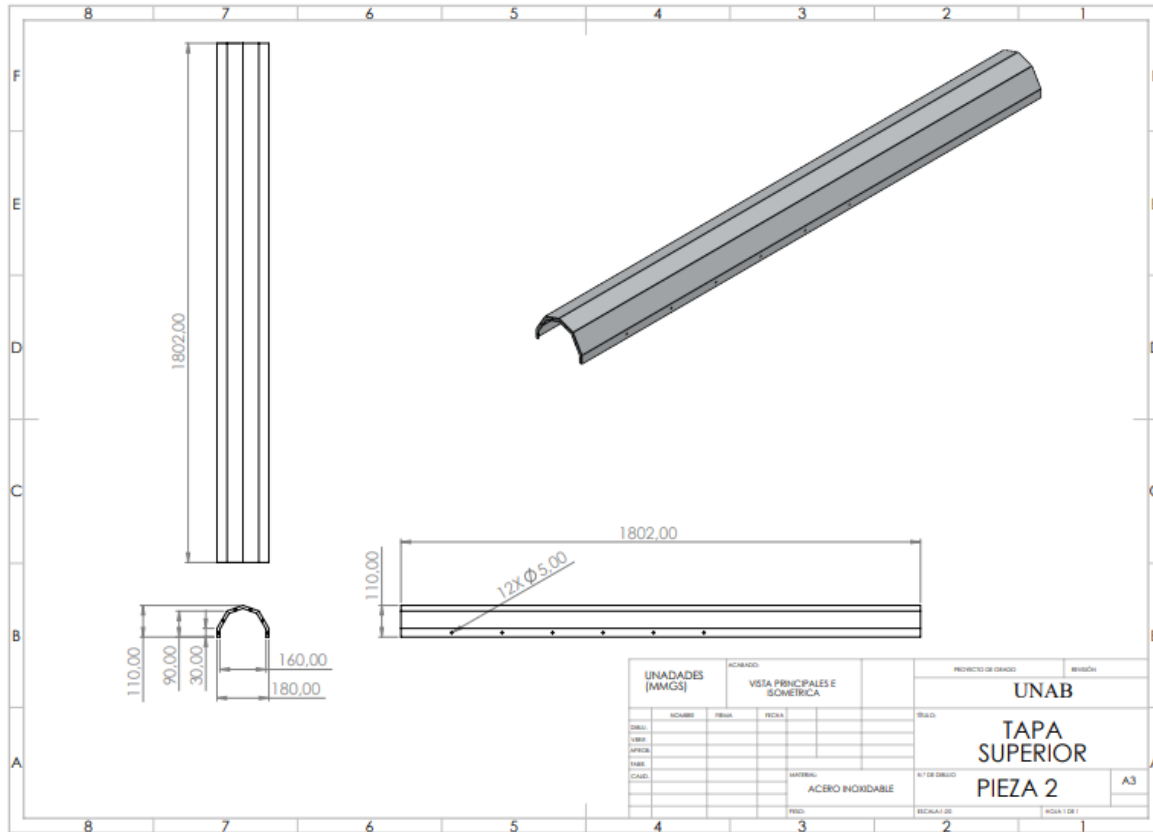
Fuente. Elaboración propia.

Figura 62. Implosión del sistema de reflexión secundario tipo CPC.



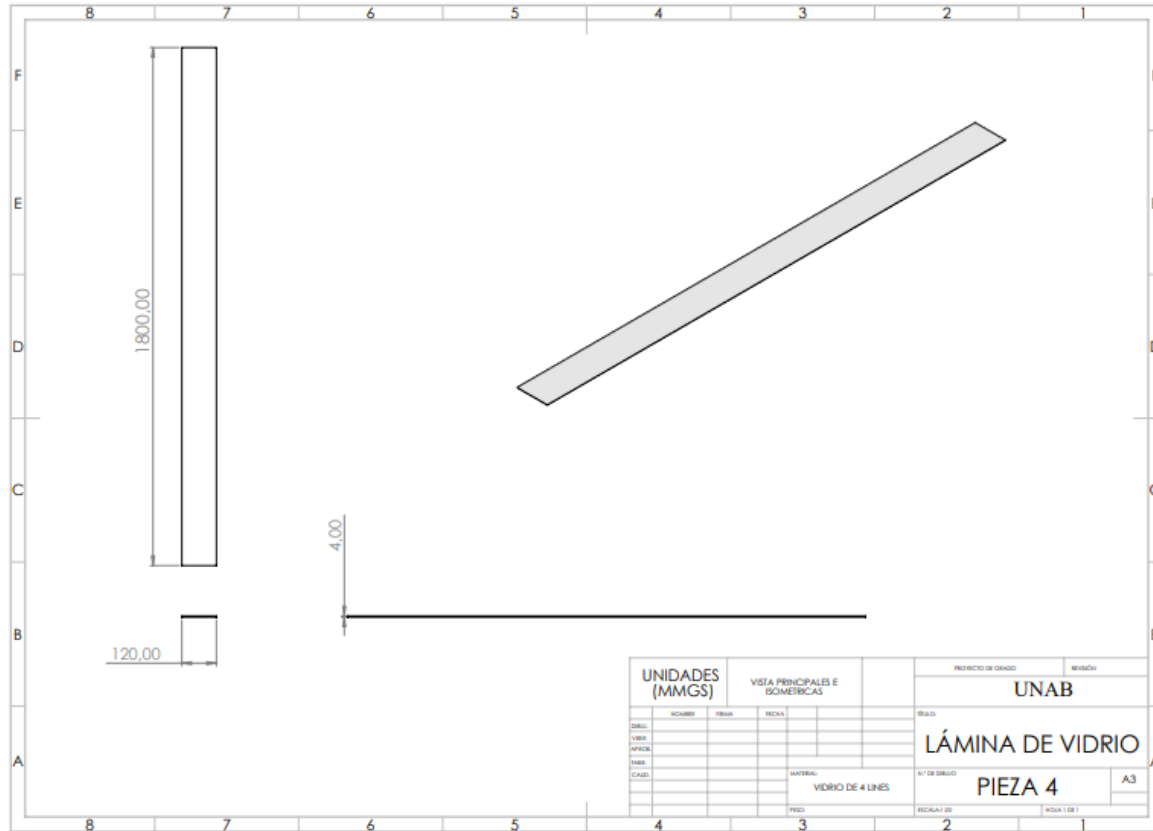
Fuente. Elaboración propia.

Figura 63. Tapa Superior del sistema de reflexión secundario tipo CPC.



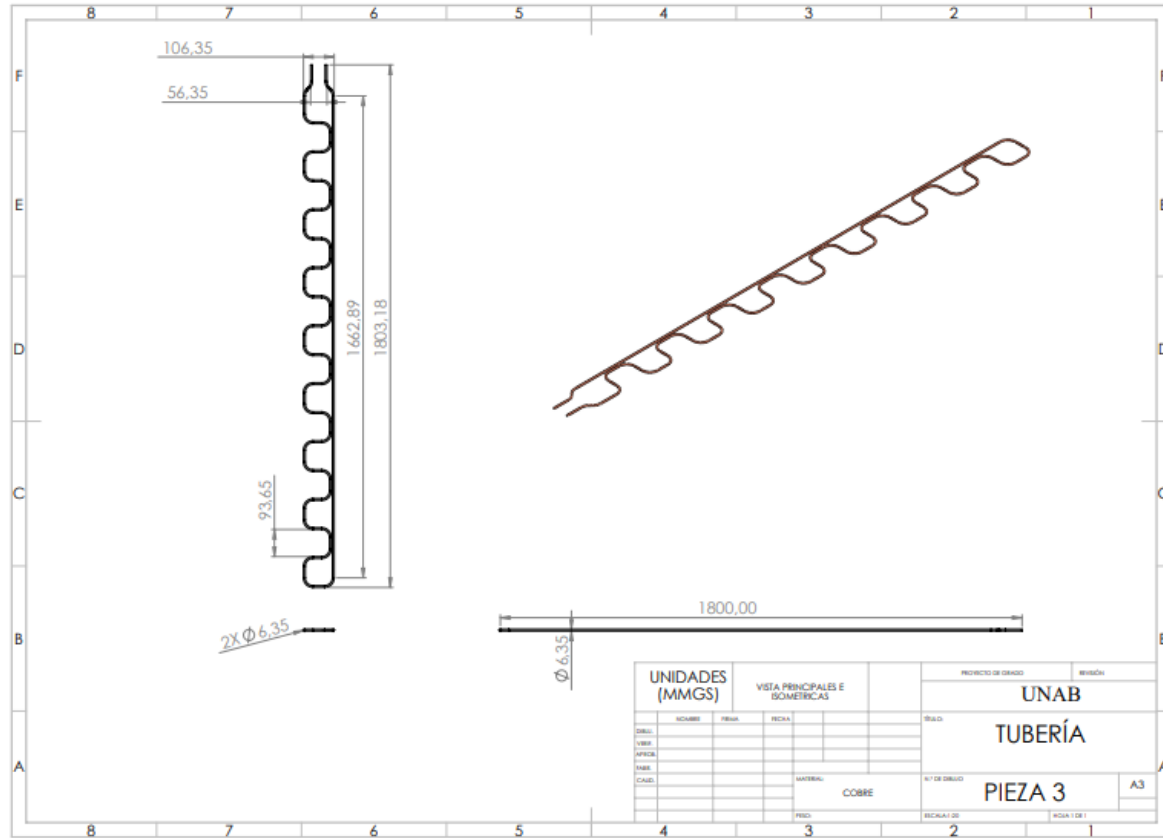
Fuente. Elaboración propia.

Figura 64. Lamina de vidrio del sistema de reflexión secundario tipo CPC.



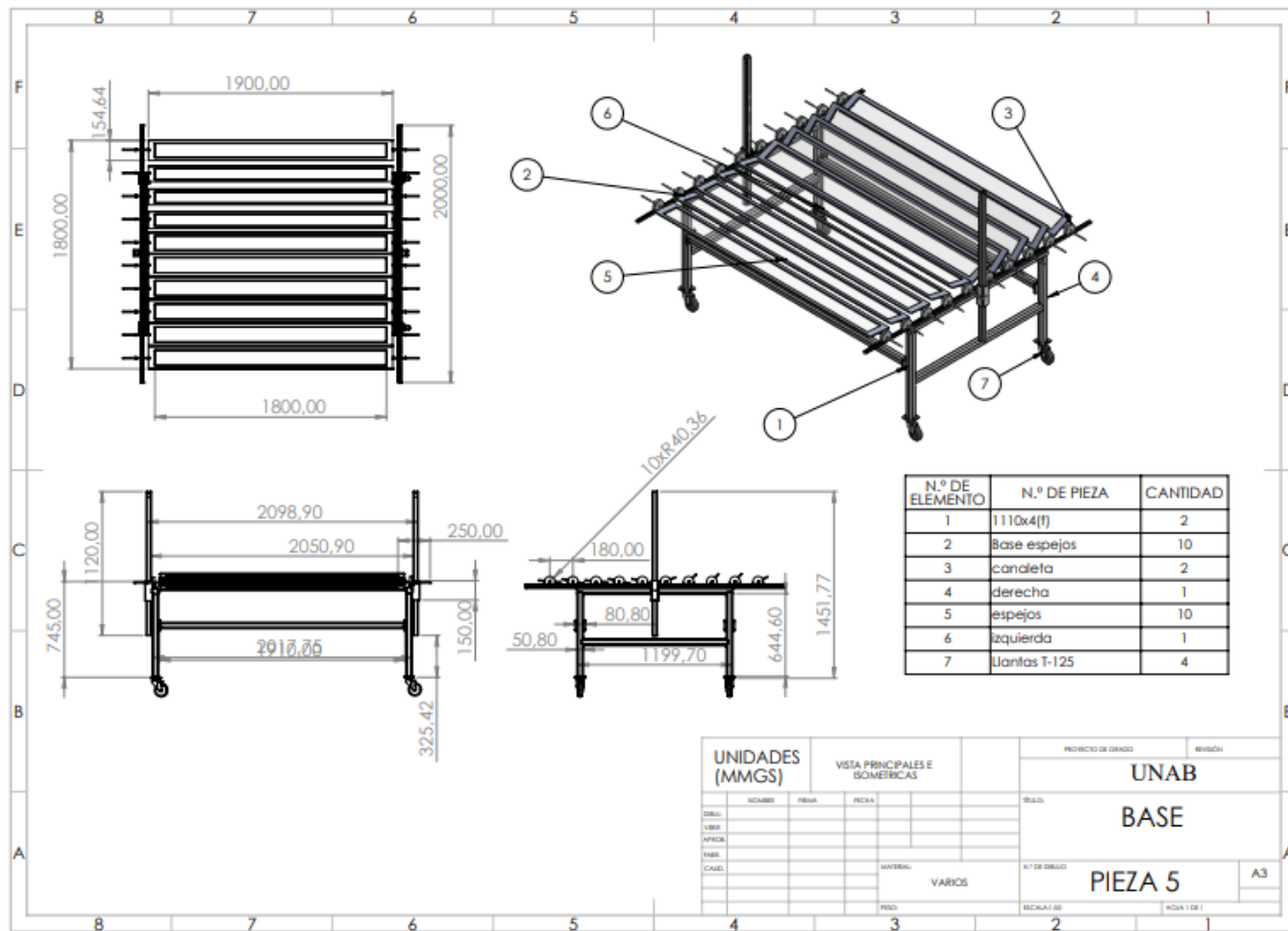
Fuente. Elaboración propia.

Figura 65. Tubería del sistema de reflexión secundario tipo CPC.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 66. Dimensiones del sistema reflector primario.



Fuente. Elaboración propia.

Anexo C. Flujo promedio de las simulaciones en TONATIUH, SOLTRACE Y MATLAB.

Tabla 17. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1 m y reflectancia 0.712.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 223,4 | 401,1 | 562,2 | 585,8 | 597,3 | 177,6 | 609,6 | 628,7 | 576,1 | 479,7 | 250,9 |
| Espejo 2 | 227,7 | 533,3 | 504,6 | 610,4 | 562,7 | 411,8 | 578,9 | 691,1 | 694,0 | 493,4 | 320,1 |
| Espejo 3 | 197,6 | 405,7 | 446,9 | 605,5 | 631,8 | 619,6 | 199,8 | 566,4 | 645,1 | 520,9 | 229,3 |
| Espejo 4 | 176,1 | 314,5 | 485,3 | 571,0 | 577,5 | 653,6 | 491,8 | 504,0 | 562,1 | 502,6 | 294,2 |
| Espejo 5 | 227,7 | 382,9 | 398,8 | 600,6 | 513,3 | 585,6 | 507,2 | 244,2 | 591,4 | 498,0 | 276,9 |
| Espejo 6 | 382,4 | 483,2 | 480,5 | 339,7 | 473,9 | 646,0 | 584,0 | 644,3 | 606,0 | 484,3 | 263,9 |
| Espejo 7 | 240,6 | 478,6 | 615,1 | 531,6 | 162,9 | 638,5 | 676,2 | 561,2 | 562,1 | 548,3 | 324,5 |
| Espejo 8 | 167,5 | 346,4 | 677,5 | 571,0 | 320,8 | 570,5 | 660,9 | 576,8 | 523,0 | 466,0 | 276,9 |
| Espejo 9 | 232,0 | 414,8 | 528,6 | 147,7 | 592,3 | 619,6 | 548,2 | 498,8 | 439,9 | 424,9 | 255,3 |
| Espejo 10 | 201,9 | 478,6 | 595,9 | 359,4 | 631,8 | 653,6 | 614,7 | 478,0 | 430,1 | 360,9 | 324,5 |
| Tubo 1 | 861,4 | 1.718,3 | 1.619 | 1.402 | 1.207 | 1.409,0 | 1.561 | 1.500,3 | 1.686 | 1.411 | 451,1 |
| Tubo 2 | 206,7 | 968,8 | 1.522 | 1.244 | 1.405 | 1.318,1 | 1.335 | 1.312,8 | 1.470 | 1.319 | 1.249 |
| Energía total | 2276,9 | 4239,2 | 5295,4 | 4922,6 | 5064,4 | 5576,2 | 5471,3 | 5393,6 | 5629,7 | 4779,1 | 2816,4 |
| Energía útil | 1068,2 | 2687,1 | 3141,0 | 2645,3 | 2612,9 | 2727,0 | 2896,7 | 2813,1 | 3155,5 | 2730,0 | 1700,2 |
| Eficiencia | 0,47 | 0,63 | 0,59 | 0,54 | 0,52 | 0,49 | 0,53 | 0,52 | 0,56 | 0,57 | 0,60 |
| Eficiencia General | 54,77% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 18. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1 m y reflectancia 0.92.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 267,3 | 332,2 | 489,9 | 512,6 | 682,6 | 177,6 | 787,0 | 520,5 | 600,1 | 514,3 | 263,6 |
| Espejo 2 | 257,1 | 579,9 | 458,7 | 680,0 | 672,4 | 526,2 | 757,6 | 848,5 | 755,1 | 557,3 | 320,1 |
| Espejo 3 | 226,3 | 423,6 | 446,9 | 759,6 | 644,9 | 705,2 | 235,1 | 579,5 | 458,4 | 576,8 | 266,9 |
| Espejo 4 | 154,1 | 308,5 | 609,1 | 604,6 | 593,7 | 575,1 | 451,4 | 425,6 | 510,6 | 480,7 | 349,3 |
| Espejo 5 | 305,2 | 386,5 | 446,7 | 786,9 | 475,2 | 599,4 | 530,8 | 240,1 | 538,4 | 532,2 | 242,7 |
| Espejo 6 | 505,9 | 451,0 | 734,1 | 438,4 | 564,6 | 563,8 | 588,5 | 529,4 | 616,5 | 592,5 | 210,5 |
| Espejo 7 | 217,3 | 410,8 | 656,7 | 465,7 | 219,3 | 594,4 | 761,5 | 503,7 | 645,3 | 543,4 | 410,1 |
| Espejo 8 | 146,6 | 398,2 | 682,6 | 758,5 | 306,5 | 598,0 | 864,7 | 576,8 | 514,2 | 525,4 | 309,0 |
| Espejo 9 | 223,9 | 452,1 | 632,5 | 151,7 | 511,9 | 654,6 | 591,6 | 545,6 | 562,1 | 369,0 | 222,9 |
| Espejo 10 | 244,0 | 424,1 | 669,6 | 446,2 | 479,8 | 594,2 | 704,5 | 409,1 | 469,2 | 332,2 | 316,7 |
| Tubo 1 | 1008,0 | 1501,3 | 2725 | 2124,3 | 1456,6 | 2104,0 | 1816,8 | 2081,1 | 2469,0 | 1623,4 | 569,2 |
| Tubo 2 | 400,6 | 1550,1 | 1766 | 1341,8 | 1722,1 | 1621,1 | 1891,7 | 1292,6 | 1672,1 | 2009,3 | 1365,0 |
| Energía total | 2547,7 | 4167,0 | 5826,8 | 5604,2 | 5150,8 | 5588,3 | 6272,6 | 5178,9 | 5669,9 | 5023,9 | 2911,8 |
| Energía útil | 1408,6 | 3051,4 | 4490,7 | 3466,1 | 3178,7 | 3725,1 | 3708,6 | 3373,7 | 4141,1 | 3632,7 | 1934,2 |
| Eficiencia | 0,55 | 0,73 | 0,77 | 0,62 | 0,62 | 0,67 | 0,59 | 0,65 | 0,73 | 0,72 | 0,66 |
| Eficiencia General | 66,53% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 19. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.712.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 222 | 427 | 587 | 663 | 488 | 161 | 661 | 565 | 526 | 441 | 227 |
| Espejo 2 | 218 | 478 | 639 | 528 | 553 | 397 | 601 | 627 | 526 | 562 | 275 |
| Espejo 3 | 251 | 431 | 567 | 630 | 535 | 655 | 146 | 615 | 551 | 499 | 260 |
| Espejo 4 | 276 | 416 | 532 | 438 | 570 | 465 | 597 | 424 | 681 | 546 | 257 |
| Espejo 5 | 189 | 420 | 488 | 536 | 518 | 577 | 605 | 154 | 593 | 542 | 352 |
| Espejo 6 | 280 | 392 | 484 | 466 | 484 | 529 | 623 | 644 | 597 | 565 | 202 |
| Espejo 7 | 273 | 466 | 599 | 638 | 112 | 642 | 588 | 598 | 572 | 409 | 268 |
| Espejo 8 | 200 | 361 | 655 | 626 | 371 | 632 | 627 | 631 | 521 | 515 | 253 |
| Espejo 9 | 236 | 361 | 710 | 184 | 686 | 558 | 558 | 544 | 475 | 468 | 253 |
| Espejo 10 | 160 | 439 | 583 | 299 | 574 | 545 | 614 | 561 | 492 | 437 | 312 |
| Tubo 1 | 933 | 1.386 | 1.798 | 1.756 | 1.351 | 1.449 | 1.808 | 1.432 | 1.501 | 1.423 | 779 |
| Tubo 2 | 306 | 981 | 1.432 | 1.198 | 1.333 | 1.501 | 1.360 | 1.299 | 1.484 | 1.532 | 1.235 |
| Energía total | 2304,4 | 4191,2 | 5843,2 | 5008,5 | 4891,8 | 5161,8 | 5620,7 | 5360,8 | 5534,6 | 4983,3 | 2657,2 |
| Energía útil | 1238,9 | 2367,7 | 3229,3 | 2953,7 | 2683,7 | 2949,8 | 3168,3 | 2730,9 | 2985,2 | 2955,4 | 2013,6 |
| Eficiencia | 0,54 | 0,56 | 0,55 | 0,59 | 0,55 | 0,57 | 0,56 | 0,51 | 0,54 | 0,59 | 0,76 |
| Eficiencia General | 57,53% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 20. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.92.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 265 | 354 | 512 | 580 | 558 | 161 | 854 | 468 | 548 | 472 | 239 |
| Espejo 2 | 246 | 520 | 581 | 588 | 660 | 507 | 787 | 770 | 572 | 634 | 275 |
| Espejo 3 | 287 | 450 | 567 | 791 | 546 | 745 | 172 | 629 | 391 | 553 | 303 |
| Espejo 4 | 242 | 408 | 667 | 464 | 586 | 409 | 548 | 358 | 619 | 522 | 305 |
| Espejo 5 | 253 | 423 | 546 | 702 | 480 | 591 | 634 | 151 | 540 | 579 | 308 |
| Espejo 6 | 370 | 366 | 739 | 602 | 576 | 462 | 627 | 529 | 607 | 692 | 161 |
| Espejo 7 | 246 | 400 | 640 | 559 | 151 | 598 | 662 | 537 | 657 | 406 | 338 |
| Espejo 8 | 175 | 415 | 659 | 832 | 355 | 663 | 820 | 631 | 513 | 580 | 282 |
| Espejo 9 | 228 | 394 | 850 | 189 | 593 | 590 | 602 | 595 | 607 | 406 | 221 |
| Espejo 10 | 193 | 389 | 655 | 371 | 436 | 496 | 704 | 480 | 537 | 402 | 304 |
| Tubo 1 | 1092 | 1211 | 3026 | 2661 | 1629 | 2164 | 2104 | 1986 | 2199 | 1637 | 983 |
| Tubo 2 | 593 | 1570 | 1661 | 1292 | 1634 | 1846 | 1927 | 1279 | 1688 | 2334 | 1349 |
| Energía total | 2506,4 | 4118,9 | 6416,3 | 5677,4 | 4941,2 | 5221,2 | 6409,8 | 5146,3 | 5590,9 | 5246,7 | 2735,6 |
| Energía útil | 1684,6 | 2781,4 | 4686,7 | 3953,6 | 3262,8 | 4009,6 | 4031,0 | 3265,3 | 3886,9 | 3971,4 | 2332,1 |
| Eficiencia | 0,67 | 0,68 | 0,73 | 0,70 | 0,66 | 0,77 | 0,63 | 0,63 | 0,70 | 0,76 | 0,85 |
| Eficiencia General | 70,64% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 21. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.712.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 226 | 431 | 566 | 604 | 710 | 109 | 620 | 611 | 633 | 465 | 268 |
| Espejo 2 | 236 | 494 | 545 | 523 | 684 | 346 | 601 | 611 | 591 | 419 | 265 |
| Espejo 3 | 197 | 512 | 453 | 619 | 650 | 648 | 156 | 581 | 522 | 522 | 192 |
| Espejo 4 | 190 | 438 | 559 | 585 | 557 | 575 | 516 | 495 | 664 | 490 | 255 |
| Espejo 5 | 193 | 448 | 510 | 515 | 617 | 651 | 605 | 112 | 591 | 550 | 235 |
| Espejo 6 | 288 | 395 | 503 | 489 | 467 | 534 | 557 | 577 | 626 | 486 | 212 |
| Espejo 7 | 233 | 395 | 644 | 569 | 135 | 581 | 590 | 592 | 581 | 433 | 281 |
| Espejo 8 | 174 | 473 | 683 | 546 | 303 | 643 | 668 | 574 | 532 | 493 | 248 |
| Espejo 9 | 200 | 392 | 609 | 138 | 628 | 584 | 449 | 492 | 577 | 447 | 291 |
| Espejo 10 | 190 | 455 | 587 | 396 | 643 | 543 | 434 | 432 | 466 | 444 | 265 |
| Tubo 1 | 880 | 1.614 | 1.689 | 1.635 | 1.529 | 1.647 | 1.562 | 1.733 | 1.687 | 1.466 | 597 |
| Tubo 2 | 276 | 920 | 1.476 | 1.419 | 1.499 | 1.600 | 1.429 | 1.270 | 1.590 | 1.751 | 1.340 |
| Energía total | 2126,1 | 4433,0 | 5659,0 | 4985,5 | 5392,9 | 5214,2 | 5194,8 | 5076,3 | 5783,2 | 4749,2 | 2511,3 |
| Energía útil | 1156,1 | 2533,5 | 3164,9 | 3054,5 | 3027,4 | 3247,7 | 2990,9 | 3002,0 | 3277,2 | 3216,9 | 1937,2 |
| Eficiencia | 0,54 | 0,57 | 0,56 | 0,61 | 0,56 | 0,62 | 0,58 | 0,59 | 0,57 | 0,68 | 0,77 |
| Eficiencia General | 60,49% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 22. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.08 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.92.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 271 | 357 | 493 | 528 | 812 | 109 | 800 | 506 | 659 | 498 | 282 |
| Espejo 2 | 266 | 537 | 495 | 583 | 817 | 442 | 787 | 750 | 643 | 473 | 265 |
| Espejo 3 | 225 | 534 | 453 | 777 | 664 | 738 | 183 | 594 | 371 | 578 | 223 |
| Espejo 4 | 166 | 429 | 702 | 619 | 572 | 506 | 473 | 418 | 603 | 469 | 303 |
| Espejo 5 | 259 | 452 | 571 | 675 | 571 | 667 | 633 | 110 | 538 | 588 | 206 |
| Espejo 6 | 381 | 369 | 768 | 631 | 557 | 466 | 561 | 474 | 637 | 595 | 169 |
| Espejo 7 | 210 | 339 | 688 | 499 | 181 | 541 | 664 | 532 | 667 | 429 | 355 |
| Espejo 8 | 152 | 544 | 688 | 726 | 289 | 674 | 874 | 574 | 523 | 556 | 277 |
| Espejo 9 | 193 | 427 | 728 | 142 | 543 | 617 | 485 | 538 | 738 | 388 | 254 |
| Espejo 10 | 230 | 403 | 660 | 492 | 488 | 493 | 498 | 370 | 508 | 408 | 258 |
| Tubo 1 | 1030 | 1410 | 2843 | 2478 | 1844 | 2460 | 1818 | 2403 | 2472 | 1687 | 753 |
| Tubo 2 | 535 | 1472 | 1712 | 1531 | 1836 | 1968 | 2024 | 1250 | 1808 | 2667 | 1464 |
| Energía total | 2353,1 | 4392,4 | 6246,7 | 5671,9 | 5493,5 | 5252,9 | 5957,6 | 4865,0 | 5887,5 | 4982,9 | 2591,9 |
| Energía útil | 1564,5 | 2881,7 | 4555,2 | 4009,7 | 3680,6 | 4428,3 | 3841,8 | 3653,1 | 4280,1 | 4353,6 | 2217,8 |
| Eficiencia | 0,66 | 0,66 | 0,73 | 0,71 | 0,67 | 0,84 | 0,64 | 0,75 | 0,73 | 0,87 | 0,86 |
| Eficiencia General | 73,84% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 23. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1 m y reflectancia 0.712.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 234,5 | 525,4 | 617,8 | 654,6 | 620,6 | 291,0 | 523,5 | 589,1 | 542,4 | 466,4 | 292,3 |
| Espejo 2 | 238,4 | 422,8 | 485,4 | 518,2 | 550,6 | 374,1 | 385,5 | 487,7 | 565,0 | 487,4 | 273,8 |
| Espejo 3 | 238,4 | 463,8 | 560,4 | 500,1 | 676,6 | 526,5 | 242,7 | 627,8 | 687,0 | 508,4 | 225,7 |
| Espejo 4 | 246,1 | 431,0 | 432,4 | 541,0 | 499,3 | 606,2 | 637,7 | 217,3 | 641,8 | 483,2 | 236,8 |
| Espejo 5 | 180,7 | 439,2 | 441,3 | 395,5 | 564,6 | 588,9 | 613,9 | 579,5 | 605,7 | 428,6 | 299,7 |
| Espejo 6 | 249,9 | 369,4 | 317,7 | 391,0 | 438,6 | 571,6 | 613,9 | 622,9 | 262,2 | 395,0 | 292,3 |
| Espejo 7 | 238,4 | 492,6 | 586,9 | 622,8 | 121,3 | 602,7 | 528,3 | 613,3 | 488,1 | 470,6 | 266,4 |
| Espejo 8 | 215,3 | 439,2 | 591,3 | 304,6 | 625,2 | 575,0 | 509,2 | 555,3 | 542,4 | 428,6 | 255,3 |
| Espejo 9 | 219,1 | 365,3 | 516,3 | 336,4 | 653,2 | 613,1 | 480,7 | 463,6 | 406,8 | 479,0 | 292,3 |
| Espejo 10 | 184,5 | 504,9 | 428,0 | 545,5 | 620,6 | 571,6 | 423,6 | 502,2 | 397,7 | 369,8 | 307,1 |
| Tubo 1 | 906 | 1.955 | 1.327 | 1.458 | 1.474 | 1.302 | 1.312 | 1.501 | 1.609 | 1.538 | 779 |
| Tubo 2 | 308 | 1.029 | 1.659 | 1.732 | 1.661 | 1.511 | 1.431 | 1.573 | 1.813 | 1.369 | 1.595 |
| Energía total | 2245,3 | 4453,7 | 4977,3 | 4809,7 | 5370,5 | 5320,6 | 4958,9 | 5258,8 | 5139,1 | 4517,1 | 2741,8 |
| Energía útil | 1214,2 | 2983,6 | 2986,1 | 3190,3 | 3134,2 | 2813,0 | 2743,4 | 3074,2 | 3421,2 | 2906,7 | 2374,1 |
| Eficiencia | 0,54 | 0,67 | 0,60 | 0,66 | 0,58 | 0,53 | 0,55 | 0,58 | 0,67 | 0,64 | 0,87 |
| Eficiencia General | 62,72% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 24. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1 m y reflectancia 0.92.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 281 | 435 | 538 | 573 | 709 | 291 | 676 | 488 | 565 | 500 | 307 |
| Espejo 2 | 269 | 460 | 441 | 577 | 658 | 478 | 504 | 599 | 615 | 550 | 274 |
| Espejo 3 | 273 | 484 | 560 | 627 | 691 | 599 | 286 | 642 | 488 | 563 | 263 |
| Espejo 4 | 215 | 423 | 543 | 573 | 513 | 533 | 585 | 184 | 583 | 462 | 281 |
| Espejo 5 | 242 | 443 | 494 | 518 | 523 | 603 | 642 | 570 | 551 | 458 | 263 |
| Espejo 6 | 331 | 345 | 485 | 505 | 523 | 499 | 619 | 512 | 267 | 483 | 233 |
| Espejo 7 | 215 | 423 | 627 | 546 | 163 | 561 | 595 | 551 | 560 | 466 | 337 |
| Espejo 8 | 188 | 505 | 596 | 405 | 597 | 603 | 666 | 555 | 533 | 483 | 285 |
| Espejo 9 | 211 | 398 | 618 | 345 | 565 | 648 | 519 | 507 | 520 | 416 | 255 |
| Espejo 10 | 223 | 447 | 481 | 677 | 471 | 520 | 485 | 430 | 434 | 340 | 300 |
| Tubo 1 | 1060 | 1708 | 2234 | 2210 | 1778 | 1945 | 1527 | 2082 | 2356 | 1769 | 983 |
| Tubo 2 | 597 | 1646 | 1924 | 1869 | 2035 | 1858 | 2028 | 1549 | 2062 | 2085 | 1743 |
| Energía total | 2449 | 4363 | 5383 | 5346 | 5412 | 5334 | 5578 | 5037 | 5117 | 4723 | 2797 |
| Energía útil | 1657 | 3354 | 4158 | 4079 | 3812 | 3803 | 3555 | 3631 | 4418 | 3855 | 2726 |
| Eficiencia | 0,68 | 0,77 | 0,77 | 0,76 | 0,70 | 0,71 | 0,64 | 0,72 | 0,86 | 0,82 | 0,97 |
| Eficiencia General | 76,46% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 25. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.712.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 246 | 448 | 534 | 679 | 647 | 233 | 639 | 536 | 531 | 555 | 248 |
| Espejo 2 | 252 | 469 | 674 | 549 | 573 | 412 | 519 | 620 | 597 | 523 | 245 |
| Espejo 3 | 252 | 417 | 545 | 483 | 510 | 580 | 229 | 528 | 585 | 523 | 293 |
| Espejo 4 | 197 | 486 | 519 | 561 | 554 | 516 | 504 | 176 | 520 | 541 | 254 |
| Espejo 5 | 204 | 396 | 440 | 526 | 506 | 554 | 597 | 580 | 581 | 498 | 245 |
| Espejo 6 | 281 | 347 | 415 | 455 | 499 | 569 | 639 | 657 | 216 | 523 | 248 |
| Espejo 7 | 207 | 424 | 577 | 592 | 171 | 660 | 601 | 500 | 527 | 544 | 263 |
| Espejo 8 | 243 | 413 | 530 | 377 | 584 | 542 | 564 | 464 | 504 | 445 | 278 |
| Espejo 9 | 178 | 396 | 541 | 318 | 655 | 510 | 552 | 508 | 474 | 434 | 236 |
| Espejo 10 | 162 | 448 | 397 | 655 | 599 | 583 | 534 | 472 | 516 | 342 | 329 |
| Tubo 1 | 908 | 1.723 | 1.862 | 1.318 | 1.623 | 1.566 | 1.733 | 1.405 | 1.960 | 1.320 | 848 |
| Tubo 2 | 324 | 1.236 | 1.790 | 1.396 | 1.753 | 1.713 | 1.545 | 1.706 | 1.756 | 1.801 | 1.544 |
| Energía total | 2221,5 | 4243,5 | 5172,0 | 5194,5 | 5298,5 | 5159,0 | 5377,0 | 5043,9 | 5051,0 | 4927,6 | 2635,9 |
| Energía útil | 1231,9 | 2959,2 | 3652,1 | 2714,0 | 3376,0 | 3278,8 | 3277,4 | 3110,3 | 3715,8 | 3121,0 | 2391,4 |
| Eficiencia | 0,55 | 0,70 | 0,71 | 0,52 | 0,64 | 0,64 | 0,61 | 0,62 | 0,74 | 0,63 | 0,91 |
| Eficiencia General | 65,96% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 26. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.92.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 294 | 371 | 465 | 594 | 740 | 233 | 825 | 444 | 553 | 595 | 260 |
| Espejo 2 | 285 | 510 | 613 | 612 | 685 | 527 | 679 | 762 | 649 | 591 | 245 |
| Espejo 3 | 289 | 435 | 545 | 605 | 520 | 661 | 270 | 541 | 416 | 579 | 341 |
| Espejo 4 | 173 | 477 | 652 | 594 | 570 | 454 | 462 | 149 | 472 | 517 | 301 |
| Espejo 5 | 273 | 400 | 493 | 689 | 468 | 567 | 625 | 571 | 529 | 532 | 214 |
| Espejo 6 | 372 | 324 | 634 | 587 | 594 | 496 | 644 | 539 | 219 | 640 | 197 |
| Espejo 7 | 187 | 364 | 616 | 519 | 230 | 614 | 677 | 449 | 606 | 539 | 332 |
| Espejo 8 | 212 | 475 | 534 | 500 | 558 | 568 | 737 | 464 | 496 | 501 | 310 |
| Espejo 9 | 172 | 431 | 647 | 326 | 566 | 539 | 596 | 556 | 605 | 377 | 206 |
| Espejo 10 | 195 | 397 | 446 | 814 | 455 | 530 | 612 | 404 | 563 | 314 | 321 |
| Tubo 1 | 1062 | 1506 | 3135 | 1997 | 1958 | 2338 | 2016 | 1948 | 2870 | 1519 | 1070 |
| Tubo 2 | 628 | 1977 | 2076 | 1507 | 2148 | 2107 | 2188 | 1679 | 1998 | 2743 | 1687 |
| Energía total | 2451,7 | 4183,6 | 5644,7 | 5840,7 | 5386,7 | 5189,0 | 6126,1 | 4879,3 | 5108,5 | 5186,5 | 2727,5 |
| Energía útil | 1690,3 | 3483,1 | 5210,9 | 3503,7 | 4105,9 | 4444,9 | 4204,5 | 3627,8 | 4868,1 | 4262,1 | 2756,5 |
| Eficiencia | 0,69 | 0,83 | 0,92 | 0,60 | 0,76 | 0,86 | 0,69 | 0,74 | 0,95 | 0,82 | 1,01 |
| Eficiencia General | 80,72% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 27. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.92.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 218 | 405 | 555 | 519 | 663 | 219 | 611 | 582 | 569 | 544 | 311 |
| Espejo 2 | 197 | 417 | 569 | 604 | 646 | 443 | 397 | 649 | 575 | 483 | 295 |
| Espejo 3 | 189 | 518 | 542 | 638 | 587 | 641 | 204 | 683 | 682 | 550 | 308 |
| Espejo 4 | 218 | 436 | 469 | 543 | 501 | 617 | 639 | 152 | 649 | 505 | 303 |
| Espejo 5 | 241 | 423 | 496 | 509 | 543 | 609 | 682 | 561 | 624 | 454 | 248 |
| Espejo 6 | 331 | 392 | 364 | 515 | 467 | 577 | 582 | 632 | 180 | 496 | 289 |
| Espejo 7 | 209 | 445 | 618 | 597 | 158 | 654 | 593 | 548 | 550 | 434 | 264 |
| Espejo 8 | 279 | 439 | 542 | 324 | 690 | 539 | 597 | 602 | 502 | 460 | 275 |
| Espejo 9 | 197 | 439 | 645 | 287 | 625 | 601 | 572 | 477 | 440 | 431 | 251 |
| Espejo 10 | 180 | 427 | 469 | 597 | 573 | 563 | 525 | 450 | 418 | 454 | 297 |
| Tubo 1 | 756 | 1.808 | 1.823 | 1.745 | 1.325 | 1.954 | 1.576 | 1.661 | 1.660 | 1.903 | 1.021 |
| Tubo 2 | 480 | 1.588 | 1.773 | 1.711 | 1.859 | 1.633 | 1.809 | 1.576 | 1.821 | 1.887 | 1.601 |
| Energía total | 2257,2 | 4341,6 | 5269,4 | 5134,1 | 5453,2 | 5463,8 | 5401,8 | 5335,2 | 5189,1 | 4810,4 | 2841,6 |
| Energía útil | 1236,2 | 3396,6 | 3595,9 | 3456,6 | 3184,6 | 3587,6 | 3384,7 | 3237,1 | 3481,1 | 3790,4 | 2622,5 |
| Eficiencia | 0,55 | 0,78 | 0,68 | 0,67 | 0,58 | 0,66 | 0,63 | 0,61 | 0,67 | 0,79 | 0,92 |
| Eficiencia General | 68,56% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 28. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.1 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.712.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 260 | 335 | 484 | 454 | 757 | 219 | 789 | 481 | 593 | 583 | 327 |
| Espejo 2 | 223 | 454 | 517 | 673 | 771 | 566 | 519 | 797 | 626 | 545 | 295 |
| Espejo 3 | 216 | 541 | 542 | 801 | 599 | 729 | 240 | 699 | 484 | 609 | 359 |
| Espejo 4 | 190 | 428 | 589 | 575 | 515 | 543 | 587 | 128 | 590 | 483 | 360 |
| Espejo 5 | 323 | 427 | 555 | 666 | 502 | 623 | 714 | 552 | 568 | 485 | 217 |
| Espejo 6 | 438 | 366 | 556 | 665 | 556 | 503 | 587 | 520 | 183 | 606 | 231 |
| Espejo 7 | 189 | 382 | 660 | 523 | 213 | 609 | 668 | 492 | 631 | 431 | 334 |
| Espejo 8 | 244 | 505 | 546 | 431 | 659 | 565 | 781 | 602 | 493 | 519 | 307 |
| Espejo 9 | 190 | 479 | 771 | 294 | 540 | 635 | 617 | 521 | 563 | 374 | 219 |
| Espejo 10 | 217 | 378 | 527 | 742 | 435 | 512 | 602 | 385 | 456 | 418 | 290 |
| Tubo 1 | 885 | 1580 | 3068 | 2645 | 1599 | 2919 | 1834 | 2304 | 2432 | 2190 | 1289 |
| Tubo 2 | 930 | 2541 | 2057 | 1846 | 2278 | 2009 | 2562 | 1552 | 2072 | 2874 | 1750 |
| Energía total | 2490,0 | 4294,4 | 5748,1 | 5824,8 | 5550,0 | 5506,0 | 6102,4 | 5176,7 | 5187,4 | 5053,0 | 2938,3 |
| Energía útil | 1814,8 | 4121,1 | 5125,2 | 4491,6 | 3877,0 | 4927,2 | 4396,2 | 3855,7 | 4503,0 | 5064,3 | 3038,4 |
| Eficiencia | 0,73 | 0,96 | 0,89 | 0,77 | 0,70 | 0,89 | 0,72 | 0,74 | 0,87 | 1,00 | 1,03 |
| Eficiencia General | 84,68% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 29. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1 m y reflectancia 0.712.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 219,1 | 435,8 | 461,9 | 558,0 | 575,2 | 322,7 | 704,1 | 655,8 | 607,7 | 509,7 | 272,1 |
| Espejo 2 | 247,4 | 435,8 | 481,7 | 562,2 | 674,6 | 521,8 | 380,4 | 539,3 | 586,9 | 469,9 | 327,9 |
| Espejo 3 | 233,3 | 473,7 | 461,9 | 558,0 | 571,1 | 616,4 | 433,0 | 608,3 | 645,2 | 521,7 | 265,1 |
| Espejo 4 | 212,1 | 390,3 | 533,0 | 495,1 | 637,3 | 525,1 | 639,3 | 319,2 | 628,5 | 477,9 | 258,2 |
| Espejo 5 | 219,1 | 413,0 | 465,9 | 570,6 | 521,4 | 544,7 | 607,0 | 612,6 | 395,4 | 493,8 | 282,6 |
| Espejo 6 | 250,9 | 360,0 | 442,2 | 390,2 | 517,3 | 600,1 | 566,5 | 608,3 | 382,9 | 529,6 | 272,1 |
| Espejo 7 | 187,3 | 488,8 | 600,1 | 562,2 | 322,8 | 567,5 | 554,3 | 465,9 | 497,0 | 493,8 | 230,3 |
| Espejo 8 | 226,2 | 344,8 | 679,1 | 159,4 | 612,5 | 590,3 | 586,7 | 379,6 | 474,5 | 481,8 | 254,7 |
| Espejo 9 | 187,3 | 435,8 | 529,0 | 616,8 | 550,4 | 486,0 | 469,4 | 444,4 | 457,9 | 374,3 | 272,1 |
| Espejo 10 | 194,4 | 416,8 | 232,9 | 600,0 | 567,0 | 525,1 | 461,3 | 470,2 | 416,2 | 358,4 | 254,7 |
| Tubo 1 | 892,9 | 1.322,1 | 926 | 1.413 | 996 | 1.256 | 1.363 | 1.375 | 1.527 | 1.246 | 797 |
| Tubo 2 | 574,0 | 1.504,4 | 1.639 | 2.170 | 1.917 | 1.393 | 1.972 | 1.479 | 1.878 | 1.677 | 1.553 |
| Energía total | 2177,1 | 4194,8 | 4887,7 | 5072,8 | 5549,6 | 5299,8 | 5401,9 | 5103,7 | 5092,4 | 4710,9 | 2689,7 |
| Energía útil | 1466,9 | 2826,5 | 2564,9 | 3583,6 | 2912,6 | 2648,6 | 3334,6 | 2854,6 | 3405,2 | 2922,4 | 2350,3 |
| Eficiencia | 0,67 | 0,67 | 0,52 | 0,71 | 0,52 | 0,50 | 0,62 | 0,56 | 0,67 | 0,62 | 0,87 |
| Eficiencia General | 63,12% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 30. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1 m y reflectancia 0.92.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 262 | 361 | 403 | 488 | 657 | 323 | 909 | 543 | 633 | 546 | 286 |
| Espejo 2 | 279 | 474 | 438 | 626 | 806 | 667 | 498 | 662 | 639 | 531 | 328 |
| Espejo 3 | 267 | 495 | 462 | 700 | 583 | 702 | 509 | 622 | 458 | 578 | 309 |
| Espejo 4 | 186 | 383 | 669 | 524 | 655 | 462 | 587 | 270 | 571 | 457 | 307 |
| Espejo 5 | 294 | 417 | 522 | 748 | 483 | 557 | 635 | 602 | 360 | 528 | 248 |
| Espejo 6 | 332 | 336 | 676 | 504 | 616 | 524 | 571 | 500 | 390 | 648 | 217 |
| Espejo 7 | 169 | 420 | 641 | 492 | 435 | 528 | 624 | 418 | 571 | 489 | 291 |
| Espejo 8 | 198 | 396 | 684 | 212 | 585 | 619 | 768 | 380 | 467 | 543 | 284 |
| Espejo 9 | 181 | 475 | 633 | 633 | 476 | 513 | 507 | 486 | 585 | 325 | 238 |
| Espejo 10 | 235 | 369 | 262 | 745 | 431 | 477 | 529 | 402 | 454 | 330 | 249 |
| Tubo 1 | 1045 | 1155 | 1559 | 2142 | 1201 | 1875 | 1586 | 1908 | 2237 | 1433 | 1006 |
| Tubo 2 | 1112 | 2407 | 1901 | 2342 | 2349 | 1713 | 2793 | 1456 | 2136 | 2554 | 1697 |
| Energía total | 2402,7 | 4125,4 | 5388,3 | 5673,1 | 5726,4 | 5372,4 | 6136,1 | 4885,4 | 5127,0 | 4975,1 | 2755,1 |
| Energía útil | 2157,0 | 3562,1 | 3460,0 | 4483,7 | 3550,0 | 3588,2 | 4379,1 | 3364,3 | 4373,3 | 3987,2 | 2703,2 |
| Eficiencia | 0,90 | 0,86 | 0,64 | 0,79 | 0,62 | 0,67 | 0,71 | 0,69 | 0,85 | 0,80 | 0,98 |
| Eficiencia General | 77,45% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 31. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.712.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 222 | 433 | 583 | 591 | 497 | 274 | 604 | 603 | 531 | 546 | 313 |
| Espejo 2 | 254 | 471 | 576 | 562 | 609 | 478 | 444 | 624 | 643 | 485 | 287 |
| Espejo 3 | 201 | 395 | 569 | 601 | 669 | 570 | 430 | 578 | 576 | 502 | 307 |
| Espejo 4 | 219 | 440 | 440 | 508 | 532 | 586 | 583 | 334 | 559 | 452 | 287 |
| Espejo 5 | 201 | 360 | 440 | 544 | 528 | 523 | 604 | 655 | 348 | 455 | 201 |
| Espejo 6 | 248 | 287 | 416 | 450 | 549 | 567 | 597 | 624 | 425 | 449 | 245 |
| Espejo 7 | 251 | 379 | 673 | 547 | 285 | 608 | 522 | 606 | 534 | 529 | 328 |
| Espejo 8 | 210 | 436 | 639 | 166 | 627 | 581 | 540 | 509 | 534 | 482 | 245 |
| Espejo 9 | 166 | 452 | 526 | 576 | 535 | 539 | 458 | 463 | 488 | 422 | 272 |
| Espejo 10 | 171 | 427 | 200 | 695 | 553 | 614 | 575 | 453 | 390 | 355 | 346 |
| Tubo 1 | 782 | 1.916 | 1.402 | 1.625 | 1.440 | 1.713 | 1.581 | 1.844 | 1.479 | 2.054 | 1.084 |
| Tubo 2 | 569 | 1.648 | 1.863 | 1.971 | 1.843 | 1.779 | 1.560 | 1.383 | 1.966 | 1.893 | 1.368 |
| Energía total | 2143,3 | 4079,8 | 5061,5 | 5240,1 | 5384,4 | 5338,6 | 5356,9 | 5449,6 | 5027,9 | 4676,8 | 2829,8 |
| Energía útil | 1351,5 | 3563,4 | 3265,0 | 3596,2 | 3283,4 | 3492,4 | 3141,1 | 3227,8 | 3445,0 | 3947,0 | 2452,1 |
| Eficiencia | 0,63 | 0,87 | 0,65 | 0,69 | 0,61 | 0,65 | 0,59 | 0,59 | 0,69 | 0,84 | 0,87 |
| Eficiencia General | 69,76% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 32. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1.4 m y reflectancia 0.92.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 265,3 | 358,7 | 507,8 | 516,8 | 567,5 | 273,7 | 779,6 | 499,0 | 552,7 | 585,0 | 329,0 |
| Espejo 2 | 287,0 | 512,5 | 523,7 | 625,9 | 728,0 | 611,1 | 581,1 | 765,7 | 699,6 | 548,2 | 286,5 |
| Espejo 3 | 230,2 | 412,4 | 569,4 | 754,5 | 682,9 | 648,2 | 505,7 | 591,8 | 409,4 | 556,1 | 357,6 |
| Espejo 4 | 191,4 | 431,1 | 551,7 | 537,7 | 546,7 | 515,8 | 534,8 | 282,5 | 507,5 | 432,3 | 340,3 |
| Espejo 5 | 269,5 | 363,3 | 492,3 | 712,6 | 488,9 | 534,8 | 632,0 | 644,1 | 316,7 | 486,5 | 176,1 |
| Espejo 6 | 328,6 | 267,5 | 635,9 | 581,0 | 654,5 | 494,6 | 601,4 | 512,5 | 432,5 | 548,8 | 195,5 |
| Espejo 7 | 227,0 | 325,3 | 718,2 | 479,5 | 384,0 | 566,3 | 588,0 | 544,2 | 613,2 | 524,2 | 414,4 |
| Espejo 8 | 183,7 | 501,6 | 644,1 | 220,1 | 598,8 | 608,6 | 706,5 | 508,7 | 525,2 | 543,5 | 273,6 |
| Espejo 9 | 159,7 | 492,9 | 629,6 | 591,8 | 462,6 | 569,6 | 494,5 | 506,9 | 624,0 | 366,3 | 237,4 |
| Espejo 10 | 207,2 | 378,2 | 224,5 | 863,1 | 419,9 | 558,0 | 659,5 | 387,6 | 425,5 | 326,6 | 337,3 |
| Tubo 1 | 915,6 | 1673,8 | 2360 | 2462,5 | 1737,7 | 2558,0 | 1840,0 | 2558,4 | 2167,1 | 2363,6 | 1367,8 |
| Tubo 2 | 1102,5 | 2636,2 | 2161 | 2127,0 | 2258,2 | 2188,5 | 2209,8 | 1362,0 | 2235,8 | 2883,1 | 1495,0 |
| Energía total | 2349,6 | 4043,6 | 5497,2 | 5883,0 | 5533,7 | 5380,6 | 6083,1 | 5243,1 | 5106,1 | 4917,6 | 2947,5 |
| Energía útil | 2018,2 | 4310,0 | 4521,2 | 4589,6 | 3995,9 | 4746,4 | 4049,8 | 3920,5 | 4402,9 | 5246,6 | 2862,8 |
| Eficiencia | 0,86 | 1,07 | 0,82 | 0,78 | 0,72 | 0,88 | 0,67 | 0,75 | 0,86 | 1,07 | 0,97 |
| Eficiencia General | 85,87% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 33. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.712.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 232 | 418 | 618 | 557 | 567 | 347 | 631 | 606 | 666 | 551 | 321 |
| Espejo 2 | 240 | 567 | 593 | 645 | 609 | 520 | 420 | 667 | 615 | 495 | 283 |
| Espejo 3 | 214 | 484 | 493 | 573 | 671 | 645 | 365 | 549 | 612 | 466 | 306 |
| Espejo 4 | 243 | 435 | 481 | 472 | 537 | 605 | 580 | 296 | 654 | 530 | 308 |
| Espejo 5 | 195 | 429 | 432 | 482 | 603 | 577 | 686 | 660 | 346 | 476 | 270 |
| Espejo 6 | 238 | 361 | 423 | 478 | 491 | 500 | 586 | 559 | 464 | 463 | 257 |
| Espejo 7 | 224 | 461 | 676 | 675 | 203 | 605 | 551 | 532 | 533 | 500 | 337 |
| Espejo 8 | 198 | 481 | 514 | 144 | 508 | 597 | 628 | 502 | 452 | 409 | 249 |
| Espejo 9 | 188 | 386 | 539 | 626 | 619 | 570 | 564 | 435 | 512 | 377 | 252 |
| Espejo 10 | 232 | 406 | 131 | 567 | 580 | 542 | 497 | 475 | 395 | 329 | 337 |
| Tubo 1 | 937 | 1.859 | 1.483 | 1.754 | 1.379 | 1.247 | 1.542 | 1.641 | 2.157 | 1.819 | 1.067 |
| Tubo 2 | 397 | 1.704 | 2.124 | 1.813 | 1.773 | 1.518 | 1.773 | 2.128 | 2.102 | 2.124 | 1.577 |
| Energía total | 2205,3 | 4427,7 | 4899,7 | 5218,7 | 5386,9 | 5506,4 | 5507,4 | 5282,1 | 5248,0 | 4596,6 | 2919,5 |
| Energía útil | 1334,5 | 3563,8 | 3606,4 | 3566,8 | 3151,7 | 2765,3 | 3314,8 | 3769,0 | 4258,7 | 3943,1 | 2643,5 |
| Eficiencia | 0,61 | 0,80 | 0,74 | 0,68 | 0,59 | 0,50 | 0,60 | 0,71 | 0,81 | 0,86 | 0,91 |
| Eficiencia General | 70,97% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 34. Simulación en Tonatiuh con ancho de 0.12 m, largo 1.8 m y reflectancia 0.92.

| | 7:00 | 8:00 | 9:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Espejo 1 | 278,1 | 346,0 | 538,4 | 487,3 | 647,5 | 347,3 | 814,8 | 502,0 | 693,5 | 590,9 | 337,5 |
| Espejo 2 | 271,4 | 616,2 | 539,5 | 719,0 | 727,8 | 664,0 | 549,2 | 818,9 | 668,7 | 559,0 | 282,7 |
| Espejo 3 | 245,0 | 505,1 | 493,0 | 719,2 | 685,2 | 733,6 | 429,7 | 561,8 | 434,5 | 515,6 | 356,0 |
| Espejo 4 | 212,6 | 426,8 | 603,5 | 499,5 | 552,1 | 532,1 | 532,3 | 250,3 | 593,9 | 506,7 | 366,2 |
| Espejo 5 | 262,0 | 433,3 | 484,0 | 631,0 | 557,7 | 590,7 | 717,5 | 649,3 | 315,4 | 508,9 | 236,5 |
| Espejo 6 | 314,5 | 336,6 | 646,3 | 617,3 | 585,3 | 436,1 | 590,8 | 459,5 | 471,9 | 566,3 | 204,9 |
| Espejo 7 | 202,8 | 395,5 | 721,3 | 591,1 | 273,3 | 562,9 | 620,6 | 477,8 | 612,2 | 495,9 | 425,5 |
| Espejo 8 | 173,3 | 552,7 | 518,2 | 191,5 | 484,8 | 625,9 | 821,6 | 501,9 | 444,4 | 461,5 | 278,2 |
| Espejo 9 | 180,9 | 421,1 | 644,6 | 642,6 | 534,9 | 601,8 | 608,5 | 475,3 | 654,4 | 327,6 | 220,0 |
| Espejo 10 | 280,8 | 360,2 | 147,1 | 703,7 | 440,2 | 492,9 | 569,1 | 406,5 | 430,5 | 302,9 | 328,6 |
| Tubo 1 | 1096,9 | 1624,5 | 2496 | 2658,2 | 1663,4 | 1862,7 | 1794,0 | 2276,7 | 3158,8 | 2092,7 | 1346,0 |
| Tubo 2 | 769,5 | 2727,1 | 2463 | 1956,1 | 2172,4 | 1866,8 | 2511,8 | 2094,9 | 2391,2 | 3235,7 | 1723,0 |
| Energía total | 2421,4 | 4393,6 | 5335,8 | 5802,3 | 5488,8 | 5587,3 | 6254,2 | 5103,2 | 5319,5 | 4835,3 | 3036,1 |
| Energía útil | 1866,4 | 4351,6 | 4959,4 | 4614,3 | 3835,8 | 3729,5 | 4305,8 | 4371,6 | 5550,0 | 5328,4 | 3069,1 |
| Eficiencia | 0,77 | 0,99 | 0,93 | 0,80 | 0,70 | 0,67 | 0,69 | 0,86 | 1,04 | 1,10 | 1,01 |
| Eficiencia General | 86,85% | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia.