



**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO  
SOLAR MEDIANTE UN CONCENTRADOR DE LENTES  
FRESNEL**

**LUIS ÁNGEL RUBIO GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
SECCIONAL MONTERÍA  
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
MONTERÍA-CÓRDOBA**

**2019**



**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO  
SOLAR MEDIANTE UN CONCENTRADOR DE LENTES  
FRESNEL**

**LUIS ÁNGEL RUBIO GONZÁLEZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**ASESOR:**

**MARIO ANDRÉS PALACIO VEGA**

**INGENIERO MECÁNICO MSc**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**MONTERÍA-CÓRDOBA**

**2019**

# DEDICATORIA

*Edilma y Miguel*

*No tengo palabras para agradecerles todo lo que me han brindado y soportado para que yo pueda alcanzar mi formación como profesional, ustedes son la razón por la cual siempre doy lo mejor de mí en cada cosa que hago.*

# AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

La Universidad Pontificia Bolivariana por ser la base para mi formación profesional e integral y por los incentivos recibidos, ya que ellos fueron de gran ayuda para mí en los momentos más difíciles de mi carrera.

Al excelente profesor Mario Palacio MSc por su guía, apoyo y enseñanzas compartidas en mi proceso formativo y por su disposición. Su calidad humana y búsqueda constante de la excelencia motivaron a dar lo mejor de mí en la realización de este trabajo.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte, especialmente al profesor Mauricio Carmona Ph.D. por facilitarme los bancos de experimentación y las herramientas necesarias para llevar a cabo la validación de esta investigación.

A los ingenieros Javier Sánchez, Katerín Osorio, Diego Camargo, Claudia Pérez, Oswald Morales, Hernán Ramos, Daniel Espinosa, porque gracias a sus enseñanzas y buenos consejos no solo aportaron a mi formación como profesional, sino a convertirme en una mejor persona.

A mi hermano Miguel Ángel, quien me brindó su apoyo en uno de los momentos más difíciles de mi carrera y gracias a ello pude seguir con más fuerza.

A mis compañeros y amigos Edwin Negrete, José Negrete, Andrés Cogollo, Olga Ruiz, Omar Villalobos, Ezequiel Llanos, por su apoyo, por compartir enseñanzas y sobre todo por su amistad.

A mis tías Deisy y Dianys por su apoyo, acogida y por brindarme consejos en los momentos difíciles. No tendré como pagarles todo lo que han hecho por mí, estaré infinitamente agradecido con ustedes.

# CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN .....	10
1.2. ESTADO DEL ARTE.....	11
1.3. OBJETIVOS .....	15
1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....	15
1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	15
2. METODOLOGÍA.....	16
2.1. MODELO TÉRMICO .....	17
2.1.1. ECUACIONES DE MODELO TÉRMICO.....	18
2.1.2. ECUACIONES DE SEGUIMIENTO SOLAR.....	22
2.2. MODELO CAD DE PLATAFORMA EXPERIMENTAL.....	24
2.2.1. SOPORTE BASE:.....	25
2.2.2. TUBERÍA .....	26
2.2.3. LENTE FRESNEL .....	26
2.2.4. SOPORTE SUPERIOR.....	27
2.2.5. ENSAMBLAJE DE LOS COMPONENTES.....	29
2.3. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO.....	30
2.3.1. EXPERIMENTACIÓN .....	30
2.3.2. ESTACIÓN METEOROLÓGICA.....	30
2.3.3. UNIDAD DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	31
2.3.4. ROTÁMETRO .....	33
2.3.5. SITIO DE EXPERIMENTACION.....	33
2.3.6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	34
3. RESULTADOS.....	36
3.1. MODELO TÉRMICO .....	36
3.1.2. VARIABLES DE ENTRADA .....	37
3.1.3. PARÁMETROS DE ENTRADA .....	38

3.1.4. VARIABLES DE SALIDA.....	39
3.2. PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR.....	40
3.3. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO.....	42
3.3.1. CONDICIONES EXPERIMENTALES .....	42
3.3.2. SEGUIMIENTO SOLAR .....	45
3.3.3. RESULTADOS Y VALIDACION EXPERIMENTAL .....	47
3.3.4. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO TÉRMICO.....	50
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	54
5. BIBLIOGRAFÍA .....	56

# NOMENCLATURA

## CARACTERES LATINOS

$L$	Longitud
$D$	Diámetro
$A$	Área
$k$	Conductividad térmica
$Re$	Número de Reynolds
$Pr$	Número de Prandtl
$Nu$	Número de Nusselt
$Ra$	Número de Rayleigh
$V$	Velocidad
$\nu$	Viscosidad cinemática
$\dot{Q}$	Flujo de Calor
$\dot{q}$	Flujo de calor por unidad de área
$h$	Coeficiente de transferencia de calor
$T$	Temperatura
$C_p$	Calor específico
$g$	Gravedad
$n$	Eficiencia
$h_s$	Ángulo horario

## CARACTERES GRIEGOS

$\tau$	Transmisividad
$\alpha$	Absorbancia
$\varepsilon$	Emisividad
$\beta$	Coeficiente de expansión volumétrica
$\sigma$	Constante de Stephan Boltzmann
$\delta_s$	Declinación solar
$\alpha_s$	Ángulo de altura solar

# ABSTRACT

In this work presents the evaluation of energy performance of a prototype of a solar collector with Fresnel lens as concentration system. For this, a thermal model was performed experimentally and that allowed the analysis of energy performance parameters as well the orientation of the solar tracking system. The thermal component of the model consists of proposing an energy balance using semi-empirical heat transfer equations in a prototype of solar heating that use a Fresnel lens concentrator. Variables of external operating conditions such as solar radiation, temperature (fluid inlet and environment), fluid flow and wind speed enter the thermal component of the model, which allow the estimation of response variables such as: heat transfer between components, temperatures and system efficiency. The tracking component of the model consists of programming general solar tracking equations, which based on the geographical position (latitude and longitude), date and time of the tests, determines the angles at which the Fresnel lens must be located to follow the path of the sun and capture as much radiation as possible, ensuring solar radiation focus on the collector receiver. For the validation and subsequent performance analysis, a prototype of a solar collector with a fresnel lens was built with which tests were carried out on an experimental platform instrumented under real operating conditions. The results obtained show a heating of the work fluid of between 3 and 4 ° C and an accumulated efficiency of the solar collector of 14%.

# RESUMEN

En este trabajo se presenta la evaluación de rendimiento energético de un prototipo de colector solar con lente de Fresnel como sistema de concentración. Para ello se constituyó y validó experimentalmente un modelo térmico que permitió el análisis de parámetros de rendimiento energético y la orientación del sistema de seguimiento solar. El componente térmico del modelo consiste en el planteamiento de un balance de energía mediante ecuaciones semi-empíricas de transferencia de calor en un prototipo de calentamiento solar que emplea un concentrador de lentes Fresnel. En el componente térmico del modelo ingresan variables de condiciones externas de operación como la radiación solar, temperatura (entrada de fluido y ambiente), caudal de fluido y velocidad del viento, que permiten la estimación de variables respuesta como: transferencia de calor entre componentes, temperaturas y eficiencia del sistema. El componente de seguimiento del modelo consiste en la programación de ecuaciones generales de seguimiento solar, que a partir de la posición geográfica (latitud y longitud), fecha y hora de pruebas, determinan los ángulos en los cuales se debe ubicar el lente Fresnel para seguir la trayectoria del sol y captar la mayor radiación posible, garantizando el enfoque de radiación solar en el receptor del colector. Para la validación y posterior análisis de rendimiento se construyó un prototipo de colector solar con lente de fresnel con el cual se realizaron pruebas en una plataforma experimental instrumentada bajo condiciones reales de operación. Los resultados obtenidos muestran un calentamiento del fluido de trabajo de entre 3 y 4 °C y una eficiencia acumulada del colector solar del 14%.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

El calor hace posible muchos procesos dentro de la industria, tales como la esterilización, pasteurización, destilación, secado, lavado y limpieza. En efecto, el consumo de energía térmica a nivel industrial supera el consumo de energía eléctrica (Payback, 2017). En el caso de Colombia, el sector industrial colombiano consume aproximadamente el 25% de la energía total del país, donde juega un papel importante el uso de la energía térmica asociado al consumo de energéticos como carbón mineral, gas natural, derivados del petróleo y biomasa, los cuales representan el 78% del consumo de este sector. El 22% restante está representado por consumo de energía eléctrica tomada de la red o mediante sistemas de autogeneración y cogeneración (DNP, 2017). En el caso del sector alimentos, la mayoría de uso de combustible se emplea en calentamiento indirecto por medio de generación de vapor y en menor proporción para el calentamiento directo, principalmente en procesos de cocción y secado. El subsector de alimentos para animales es la excepción porque en este sector todo el consumo térmico es debido a la generación de vapor (UPME, 2014)

Estas fuentes de energía mencionadas provienen de fuentes agotables y con complejidad para su obtención, por lo cual tenderán a subir su precio a tal punto de no ser factible su utilización, sumado a ello la implementación de este tipo de recursos energéticos genera gases contaminantes a la atmosfera. Sin embargo, existe la posibilidad de obtener ese calor por medio del aprovechamiento de la energía proporcionada por el Sol, evitando emitir gases contaminantes a la atmosfera.

La energía solar se presenta en la tierra en forma de radiación, este tipo de energía se puede aprovechar para ser transformada en energía térmica mediante diversos métodos. Uno de estos métodos es la captación mediante sistemas de concentración solar. Un concentrador recibe la radiación de sol y permite alcanzar altas temperaturas en un punto específico o a lo largo de una línea, estas temperaturas pueden ser aprovechadas para su transformación en otro tipo de energía, con lo cual se amplía su rango de utilización.

Los lentes de Fresnel son uno de los métodos empleados para la concentración solar, esta tecnología se caracteriza por su bajo peso y una menor complejidad técnica en su construcción respecto a otras tecnologías de concentración como campos de heliostatos o colectores cilindro-parabólicos (CCP), los cuales se caracterizan por emplear extensas área en su construcción.

El objetivo de los lentes Fresnel es concentrar la energía solar y enfocarla para aumentar su temperatura y así con la aplicación de distintas estrategias se puede lograr su conversión en energía útil. Una de las maneras en las cuales se puede convertir este tipo de energía es a través de la transferencia de calor a un fluido de trabajo, el cual se puede calentar a una temperatura deseada o generar vapor para aprovecharlo en diversos procesos domésticos e industriales.

Las principales ventajas de este tipo de lentes frente a las demás tecnologías de concentración solar son: su sencilla instalación y bajo costo. Sin embargo, la utilización de estos dispositivos como sistemas de aprovechamiento de energía solar térmica ha sido poco estudiado en la literatura científica especializada, lo cual deja vía libre a la experimentación de estrategias para la concentración solar con este tipo de concentradores.

La presente investigación busca principalmente, realizar y evaluar el rendimiento térmico de un sistema de calentamiento solar empleando un concentrador de lentes Fresnel. Para ello se construirá un prototipo a pequeña escala y se llevará a cabo la simulación del comportamiento térmico de este mediante el uso del Software MATLAB-Simulink. Después de esto se llevarán a cabo pruebas experimentales de dicho sistema para hacer un análisis de las respuestas ofrecidas por el modelo planteado, así se logrará comprobar su funcionalidad, del mismo modo que se sabrá qué tan eficiente es el uso de este tipo de tecnología en cuanto a la captación de energía solar.

## 1.2. ESTADO DEL ARTE

El interés de esta investigación se ubica en el estudio de la aplicación de los receptores lineales de Fresnel, ya que estos últimamente han empezado a despertar el interés en los investigadores debido a su sencillez, bajo costo y variedad de aplicaciones. Dentro de estos investigadores se encuentra (Zhu, Wendelin, Wagner, & Kutscher, 2013), quien realizó un recuento histórico del uso de los sistemas lineales Fresnel en aplicaciones de concentración solar para la generación de calor útil de media y alta temperatura, además, realizó una estimación de costos y rendimiento para lentes Fresnel lineales, resaltando la ventaja de estos frente a los otros sistemas de concentración debido a que estos tienen bajo costo y facilidad en la instalación. Así mismo (Kumar, Shrivastava, & Untawale, 2015), resalta el crecimiento de las tecnologías de concentración solar dentro de los tipos de energía renovable. Su trabajo considera a los sistemas de lentes Fresnel como una alternativa prometedora en la recolección de calor industrial, ayudando a la reducción de costos de inversión y mantenimiento, los cuales pueden reducirse aún más con avances

tecnológicos del diseño del lente. En la Figura 1 se muestran los estudios realizados ligados a la aplicación de lentes Fresnel en sistemas de concentración de energía solar, donde se puede observar que en los últimos años se ha tomado fuerza en el tema, pero el número de trabajos publicados es bajo respecto a otras tecnologías de aprovechamiento de energía solar térmica.

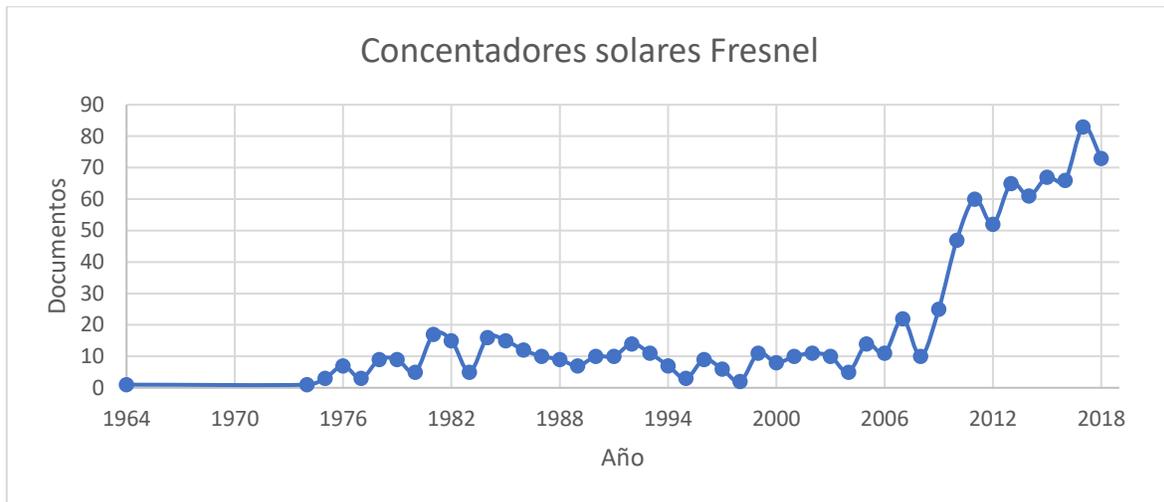


Figura 1: Cantidad de documentos publicados referentes a aplicación de lentes Fresnel hasta diciembre de 2018. Fuente: Fabricación propia a partir de datos de Scopus. (Scopus, 2018).

Dentro de los investigadores que han logrado buenos resultados en múltiples aplicaciones de lentes Fresnel se encuentra (Ma, Zheng, & Liu, 2019), el cual realizó una optimización y validación experimental de un sistema de lentes Fresnel cilíndricos que consta de un área de 20 m<sup>2</sup> para un sistema de generación de vapor de media temperatura. En las pruebas experimentales bajo condiciones de operación de 0.2 y 0.5 MPa se logró una producción de vapor promedio que varía entre 6.82 y 6.1 Kg/h, trabajando con radiaciones de 610 a 700 W/m<sup>2</sup>, esto resulta en una eficiencia de concentración solar de 32 y 30% respectivamente.

En 2018, Zhao llevó a cabo la modelación y simulación de un sistema que emplea lentes de Fresnel para realizar la esterilización regenerativa del suelo, con el fin de dejarlo con buen rendimiento para los cultivos. Esto se llevó a cabo en un tubo circular al cual se le evaluó el rendimiento térmico del sistema a través del uso del Software MATLAB, llevando a cabo el comportamiento del sistema bajo distintas radiaciones y diámetros de tubería en las cuales obtiene que para una radiación de 1000 W/m<sup>2</sup> y 160 mm de diámetro de tubería, el análisis arroja una temperatura máxima del suelo de 85°C (Zhao, Zheng, Ma, & Jin, 2018).

En 2019 Muraledharan implementó un concentrador de lentes Fresnel en un alambique convencional para mejorar el sistema de destilación de agua salina, el cual emplea como fluido de trabajo Therminol-55 para transferir calor al agua. La intensidad solar registrada en las pruebas experimentales osciló entre 764 y 770 W/m<sup>2</sup>, con ello se logró obtener una temperatura máxima del agua salina de 99.4°C con una concentración del 0.1% de nano partículas en el fluido, la cual es 8 °C mayor que el sistema sin modificar. La producción final de agua dulce de los sistemas sin modificar es 3480 ml/m<sup>2</sup>, mientras que modificado, varió de 7404 a 12190 ml/m<sup>2</sup>, lo cual representó un incremento aproximado del 250.27%; con ello se puede corroborar que el sistema modificado con concentrador de lente Fresnel es más eficiente en cuanto a la producción final de agua dulce que un sistema sin modificar (Muraleedharan, Singh, Udayakumar , & Suresh, 2019).

Para la implementación de los colectores de concentración solar es necesario emplear un tipo de seguimiento para permitir que este mantenga enfocados los rayos solares. Esto se hace con diversos grados de precisión y modos de seguimiento. Los sistemas de seguimiento pueden clasificarse mediante la forma de su movimiento. Esto puede ser en un solo eje o sobre los dos ejes (Kalogirou, 2009).

En cuanto al seguimiento en un solo eje, en 2013 Sen implementó un sistema de seguimiento para espejos lineales Fresnel que consiste en un mecanismo de cuatro barras que sigue la trayectoria del sol de este a oeste. Este sistema fue realizado para generar vapor de agua a una presión ajustada automáticamente, a pequeña escala como se espera. Con un área de reflector de 5 m<sup>2</sup> produjeron 2.4 kg/h de vapor a una presión de 1.5 Bar, aumentando el área del reflector a 13 m<sup>2</sup> y produciendo 6.3 Kg/h a igual presión (Sen, y otros, 2013).

Para el caso de seguimiento completo, el ángulo en el cual inciden los rayos solares sobre un vector normal a la superficie en todo momento debe ser igual a cero. Teniendo en cuenta este tipo de seguimiento en 2017 Perini realizó un prototipo teórico y experimental de seguimiento solar con sistema de doble eje para un concentrador Fresnel lineal, basado en un algoritmo que usa la ubicación del sitio y la hora solar mediante GPS. Con este prototipo se alcanzaron temperaturas de aproximadamente 90°C, la cual se puede mejorar reduciendo las pérdidas de absorción del tubo receptor y utilizando un diseño mejorado del lente. El autor resalta que el seguimiento de doble eje genera costos adicionales, sin embargo, determina que este sistema puede ser realizado con software de código abierto y hardware (Perini, Tonnellier, King, & Samson, 2017).

En cuanto a las estrategias por mejorar el diseño de los lentes, Zheng llevó a cabo el diseño y análisis experimental para un lente Fresnel en forma cilíndrica, simulando la curvatura de los Colectores cilindro-parabólicos (CCP). Con este diseño encuentra que esta lente supera algunas deficiencias de los CCP como la resistencia al viento, además de esto, producen una reducción de la potencia de funcionamiento de los motores de seguimiento (Zheng, Feng, Su, & Da, 2014).

Hasta ahora muchos autores han realizado sus investigaciones utilizando espejos para crear el efecto Fresnel, pero no se han creado modelos numéricos que permitan predecir el comportamiento de estos ante variables de operación dinámicas, ni se han realizado pruebas experimentales con sistemas de lentes planos. Debido a ello la presente investigación propone un modelo térmico resuelto a través de soluciones numéricas en el software MATLAB-Simulink® que predice el comportamiento tanto de variables asociadas a la transferencia de calor, como al seguimiento solar de un prototipo de concentrador de lente Fresnel lineal de Polimetilmetacrilato (PMMA), los cuales son livianos, tienen bajo costo y son prácticos en aplicaciones de baja escala. Además, se presenta una evaluación de rendimiento mediante pruebas experimentales en condiciones reales de operación. En este prototipo será usado para el calentar una tubería por la cual se hace pasar un fluido de trabajo, para su calentamiento y se llevarán a cabo pruebas experimentales, con lo cual se validará la funcionalidad del modelo térmico planteado.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar el rendimiento térmico de un sistema de calentamiento solar implementando un concentrador de lente de Fresnel.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Establecer un modelo teórico para la estimación del rendimiento térmico y parámetros de seguimiento de un sistema de calentamiento solar que emplea un lente de Fresnel.
- Diseñar y construir un prototipo de colector solar que utilice lente de Fresnel lineal como sistema de concentración.
- Analizar el rendimiento térmico del prototipo de colector solar con lente de Fresnel mediante la evaluación de resultados experimentales en modelo térmico.

## 2. METODOLOGÍA.

La presente investigación toma como base un planteamiento lógico-deductivo, ya que se parte de un principio general de un fenómeno, el cual es la radiación solar, y se lleva a la aplicación en un caso particular, la concentración solar mediante un lente Fresnel.

Para la realización de esta investigación se hizo necesario seleccionar las ecuaciones que gobiernan la interacción de la transferencia de calor entre los distintos componentes de un sistema térmico compuesto por un lente de Fresnel y un receptor, la cual fue una tubería de cobre; así mismo la selección de un tipo de seguimiento solar para la aplicación de este.

Con la selección de las ecuaciones de gobierno se planteó el análisis teórico para la solución de los sistemas componentes del modelo (térmico y seguimiento). Para el sistema térmico se planteó un balance de energía en el receptor del sistema de calentamiento solar (tubería), con ello se pudo evidenciar el gran número de variables y ecuaciones implicadas en estudio, en consecuencia, se realizó una simulación ajustada a las variables y las ecuaciones que rigen el comportamiento térmico del sistema en cuestión, con el fin de obtener predicciones del sistema real que se está evaluando.

En cuanto al sistema de seguimiento, se consultó bibliografía referente a la dinámica solar, obteniendo las ecuaciones descritas en el numeral 2.1.2, las cuales son ecuaciones generales, usadas en esta investigación para la obtención de los ángulos solares necesarios para emplear la técnica de seguimiento.

Mediante el uso del software MATLAB-Simulink, se llevó a cabo la programación de las ecuaciones de gobierno del sistema térmico y el de seguimiento, con lo cual se obtienen dos sistemas aptos para la simulación de su comportamiento en estado transitorio, que tienen como finalidad la evaluación del rendimiento térmico del prototipo de colector solar, además de cuantificar variables que no son medibles de forma experimental. Esto será validado mediante pruebas en condiciones reales con la comparación de datos arrojados por el modelo planteado. El sistema térmico es capaz de predecir el comportamiento de los flujos de calor, las temperaturas y eficiencia térmica en cada instante de tiempo, con ello se contará con un estimativo de comparación con los datos que se obtengan a nivel experimental. El sistema de seguimiento da como respuesta los ángulos en los cuales se debe ubicar el lente de Fresnel para obtener la mayor captación de radiación posible.

Los componentes físicos de este sistema se realizaron mediante un CAD en el software Solidworks® 2018, teniendo en cuenta datos técnicos referentes al lente de Fresnel, como las dimensiones y la distancia focal, la cual debía ser de 300mm (datos del fabricante) para que el enfoque de los rayos solares se diera de una manera óptima, además de ello este software sirvió como ayuda para simular el movimiento que tendría en el sistema de seguimiento la plataforma experimental. Después de tener las medidas correspondientes de los componentes del sistema, se llevó a cabo su materialización mediante la aplicación de procesos de manufactura como fresada, torneado, corte, taladrado, esmerilado y luego se aplicó soldadura para unir las piezas componentes. Posteriormente se llevaron a cabo las pruebas experimentales del prototipo bajo condiciones reales de operación, que para el fin de la validación del modelo térmico, se empleó en una plataforma equipada con sensores de medición de condiciones ambientales como la velocidad del viento, radiación solar y temperatura ambiente, también se realizó la medición de parámetros propios de operación como la temperatura de entrada de fluido y flujo volumétrico de este, los cuales permitieron evaluar el rendimiento térmico del prototipo de colector solar. En los siguientes subcapítulos se describen a detalle cada uno de los pasos ya mencionados.

## 2.1. MODELO TÉRMICO

La modelación de un sistema de calentamiento en el que está implicado un reflector y un receptor representa un reto debido a las distintas variables implicadas en este. Se ha de tener en cuenta que, para realizar un análisis de este sistema, los elementos que lo constituyen están expuestos múltiples variables que cambian en el tiempo. Dichas variables son la radiación solar, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la temperatura de entrada del fluido de trabajo. Teniendo en cuenta las condiciones anteriores, se hace necesario que dicho sistema sea analizado en estado transitorio para que la evaluación del análisis teórico coincida con el tipo de ambiente al cual se encuentra expuesto.

El modelo térmico realizado tiene la capacidad de evaluar la eficiencia de un sistema de calentamiento solar utilizando un colector lineal de lentes Fresnel bajo condiciones de operaciones estables y dinámicas. Sumado a ello este modelo tiene la facultad de analizar el comportamiento térmico de las variables implicadas en el receptor y analizar el comportamiento de este bajo distintas variables externas. Este modelo se compone de dos sistemas: uno térmico, usado para la solución de ecuaciones de transferencia de calor y la obtención de variables asociadas a la temperatura, flujos de calor y eficiencia, el otro sistema es de seguimiento, el cual es usado para la solución de ecuaciones de seguimiento

solar y la obtención de los ángulos en los que se debe ubicar el lente Fresnel para mantener los rayos solares enfocados.

### 2.1.1. ECUACIONES DE MODELO TÉRMICO

El modelo térmico desarrollado fundamenta sus bases en los mecanismos de transferencia de calor presentes en el balance de energía realizado al receptor del sistema. En la Figura 2 se puede observar el flujo de calor por radiación  $\dot{q}_s$  incidente en el lente Fresnel, donde parte de este calor es absorbido por el mismo, mientras que el resto es transmitido al receptor, el cual es una tubería por la cual se hace pasar un fluido. La tubería absorbe la radiación  $\dot{Q}_{absorbido}$  transmitida por el lente, incrementa su energía interna, lo cual hace que aumente su temperatura y genere un flujo de calor hacia el fluido que pasa por la tubería y transfiera calor hacia los alrededores por convección y radiación.

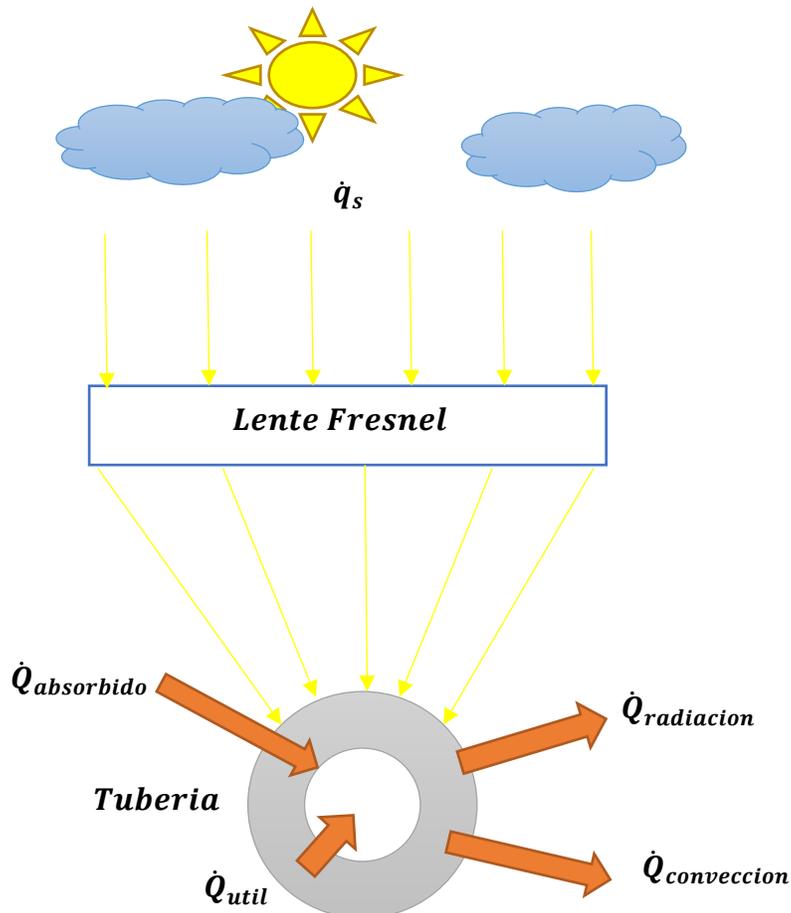


Figura 2: Modelo térmico.

Fundamentos del modelo térmico:

- La tubería es un sistema de masa concentrada.
- Las propiedades térmicas del material, del fluido de trabajo y el aire exterior no varían en el tiempo.
- Se asume un flujo completamente desarrollado.

$$\dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale} = \frac{dE_{sistema}}{dt} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\dot{Q}_{absorbido} - \dot{Q}_{radiacion} - \dot{Q}_{conveccion} - \dot{Q}_{util} = mC_p \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\dot{Q}_{absorbido} = \tau \alpha F_c \dot{q}_s A_{ilum} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\dot{Q}_{radiación} = \varepsilon A_T \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\dot{Q}_{conveccion} = h_{ext} A_T (T_s - T_\infty) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\dot{Q}_{util} = h_{int} A_{int} (T_s - T_{in}) \quad \text{Ecuación 6}$$

La razón de transferencia de calor absorbida por la tubería  $\dot{Q}_{absorbido}$  depende de las propiedades ópticas del lente y de la superficie del receptor. En ello se tiene en cuenta otro parámetro importante, el cual es el factor de concentración, que determina cuánto está aumentando la concentración de calor el lente Fresnel. Este parámetro es definido en la Ecuación 7:

$$F_c = \frac{A_{lente}}{A_{iluminada}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde  $A_{lente}$  y  $A_{iluminada}$  son el área del lente Fresnel y el área iluminada por este respectivamente.

La razón de transferencia de calor cedida al ambiente por la tubería por medio de radiación  $\dot{Q}_{radiación}$  depende de la emisividad de la tubería  $[\varepsilon]$ , del área de transferencia de calor de calor  $[A_T]$ , de la constante de Stephan Boltzmann y de la variación de la temperatura entre la tubería y el ambiente (Cengel, 2007).

El flujo de calor cedido al ambiente por la tubería por medio de convección  $\dot{Q}_{conveccion}$  depende del área de transferencia de calor, la variación de temperatura de la tubería y el ambiente, y del coeficiente de transferencia de calor exterior (Incropera & DeWitt, 1999), esta razón se analiza a continuación:

El coeficiente de transferencia de calor exterior  $h_{exterior}$  se analiza por convección externa forzada y convección natural, ya que depende de la variación de las velocidades del viento sobre la tubería y el cambio de la densidad del fluido adyacente a la tubería (Cengel, 2007). Este coeficiente se expresa de la siguiente manera:

$$h_{exterior} = \frac{Nu_{aire} * k_{aire}}{D_t}$$

Ecuación 8

$k_{aire}$  y  $D_t$  representan la conductividad del aire y diámetro de la tubería.  $Nu_{aire}$  Representa el número de Nusselt del aire exterior a la tubería, este parámetro puede ser calculado mediante la Ecuación 9 (Cengel, 2007):

$$Nu_{aire} = 0.3 + \frac{0.62 Re_{aire}^{\frac{1}{2}} * Pr_{aire}^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr_{aire}}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} * \left[1 + \left(\frac{Re_{aire}}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}}$$

Ecuación 9

Donde  $Pr_{aire}$  es el número de Prandtl del aire exterior.  $Re_{ext}$  Es el número de Reynolds del aire, el cual se calcula mediante la Ecuación 10 (Incropera & DeWitt, 1999):

$$Re_{aire} = \frac{V_{viento} * D_t}{v_{aire}}$$

Ecuación 10

$V_{viento}$  y  $v_{aire}$  representan la velocidad del viento y la viscosidad cinemática del aire respectivamente.

En el caso en que la velocidad del viento sea nula [ $V_{viento} = 0$ ] el comportamiento del sistema debe cambiar a un estado de transferencia de calor por convección natural, así se define un nuevo número de Nusselt (Cengel, 2007).

$$Nu_{aire} = \left[0.6 + \frac{0.387 Ra_{D_{aire}}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr_{aire}}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{1}{4}}}\right]^2$$

Ecuación 11

$$Ra_{D_{aire}} = \frac{g * \beta * (T_s - T_{\infty}) * L_c^3}{v_{aire}^2}$$

Ecuación 12

Donde  $g$ ,  $\beta$  y  $L_c$  definen la aceleración de la gravedad, coeficiente de expansión volumétrica y la longitud característica de la tubería.

El flujo de calor cedido de la tubería al fluido de trabajo depende del área de transferencia de calor interior de la tubería, la variación entre la temperatura superficial de la tubería y la de entrada del fluido, así mismo del coeficiente de transferencia de calor por convección al interior de la tubería, este coeficiente se define a continuación:

El coeficiente de convección dentro de la tubería  $h_{interior}$  definido en la Ecuación 13 varía según las perturbaciones internas del fluido, es decir, si se tiene un fluido laminar o turbulento (Carmona & Palacio, 2019).

$$h_{interior} = \frac{Nu_{int} * k_{fluido}}{D_t} \quad \text{Ecuación 13}$$

Para saber en qué estado se encuentra el fluido que atraviesa la tubería es necesario conocer el número de Reynolds del fluido de trabajo, el cual es un parámetro adimensional que representa el estado en el que se encuentra un fluido en movimiento (Incropera & DeWitt, 1999) . Este parámetro se expresa de la siguiente manera:

$$Re_{interior} = \frac{V_{prom} * D_{tin}}{v_{fluido}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde  $V_{prom}$ ,  $D_{tin}$  y  $v_{fluido}$  representan la velocidad promedio del fluido, diámetro interior de la tubería y la viscosidad cinemática del fluido respectivamente.

Sí:

- $Re < 2300$  entonces se tiene un flujo laminar
- $Re > 2300$  entonces se tiene un flujo turbulento

El número adimensional  $Nu_{int}$  representa el número de Nusselt al interior de la tubería, este parámetro puede tomar valores distintos, esto depende las condiciones en las cuales se encuentre el fluido a través de la tubería (Cengel, 2007). Si el flujo es laminar se usa la ecuación 15, en cambio, si es turbulento se emplea la ecuación 16.

$$Nu_{interior} = 3.66 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$Nu_{interior} = 3.66 + \frac{0.065 * \frac{D_{tin}}{L_t} * Re_{int} * Pr_{fluido}}{1 + 0.04 \left[ \frac{D_{tin}}{L_t} * Re_{int} * Pr_{fluido} \right]^{\frac{2}{3}}} \quad \text{Ecuación 16}$$

$Pr_{fluido}$ ,  $k_{fluido}$ ,  $L_t$  y  $D_{tin}$  representan el número de Prandtl del fluido, conductividad térmica del fluido, longitud y diámetro interior de la tubería respectivamente.

La acumulación de energía en la tubería está dada por su masa, calor específico y los cambios en la temperatura superficial y la ambiente, presentados en el balance de energía de la ecuación 2 (Incropera & DeWitt, 1999).

$T_s, T_{in}, T_{\infty}$ . En cada caso representan las temperaturas superficial de la tubería, la de entrada de fluido a la tubería y la de los alrededores respectivamente.

La eficiencia del sistema está dada por el calor útil obtenido del sistema y la energía suministrada a través de la radiación incidente en el lente (Carmona & Palacio, 2019). Esta es calculada mediante la Ecuación 17:

$$n = \frac{\int_0^t \dot{Q}_{util} dt}{\int_0^t \dot{q}_s * A_{lente} dt} \quad \text{Ecuación 17}$$

### 2.1.2. ECUACIONES DE SEGUIMIENTO SOLAR

Contar con seguimiento solar implica que la energía captada por un receptor será mayor, comparada con un sistema estático, por ello es importante contar con una forma de seguimiento que permita tener el mejor aprovechamiento de la radiación solar. Dado que los colectores solares emplean concentración, es indispensable realizar seguimiento solar debido a que estos dispositivos operan exclusivamente con radiación solar directa. Por tal motivo en esta investigación se realizará la aplicación de las ecuaciones para la obtención de los ángulos de seguimiento solar en dos ejes que son descritos en este apartado.

La trayectoria solar es un fenómeno repetitivo que cumple un ciclo en 365 días. Siendo el 1 de enero de cada año el día 1(uno) y el 31 de diciembre el día 365(trescientos sesenta y cinco); a lo largo de todo este ciclo entre los movimientos relativos de la Tierra y el Sol se describen múltiples parámetros que puede evidenciar una persona que observe el Sol desde la tierra, estos parámetros son los llamados ángulos solares, los cuales son la guía indispensable para realizar cualquier modelo de seguimiento solar. A continuación, se detallarán cada uno de estos ángulos:

Ángulo horario( $h_s$ ): Es la distancia que existe entre el meridiano que contiene a un observador y el meridiano que contiene al sol. Este ángulo se incrementa 15 grados cada hora y está definido por la Ecuación 18 (Goswami, 2015):

$$h_s = (AST - 12) * 15^\circ \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde  $AST$  se define como el tiempo solar aparente, el cual se utiliza para expresar la hora del día y está basado en el movimiento angular aparente del Sol, el  $AST$  es calculado mediante la Ecuación 19 (Kalogirou, 2009):

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde  $LST$ ,  $SL$  y  $LL$  son el tiempo local estándar (Hora local), Longitud estándar y Longitud local respectivamente.  $ET$  Se define como la ecuación de tiempo y se expresa en la Ecuación 20 (Kalogirou, 2009):

$$ET = 9.8 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad \text{Ecuación 20}$$

$$B = (N - 81) * \frac{360}{364} \quad \text{Ecuación 21}$$

La ecuación de tiempo está representada en minutos y depende de número del día en el año  $N$ . El número del día en el año se representa en la Tabla 1

Tabla 1 Número del día en el año. Adaptado de Kalogirou. (Kalogirou, 2009).

Mes	Número del día(N)
Enero	i
Febrero	i+31
Marzo	i +59
Abril	i +90
Mayo	i +120
Junio	i +151
Julio	i +181
Agosto	i +212
Septiembre	i +243
Octubre	i +273
Noviembre	i +304
Diciembre	i +334

Donde (i) representa el día en un mes seleccionado, con ello se obtiene el número del día en el año. Cabe hacer la aclaración de que en caso de tener un año bisiesto se añadirá un día más a partir de marzo.

Angulo de declinación solar( $\delta_s$ ): Es el ángulo formado por los rayos solares con el plano ecuatorial de la tierra. Este ángulo toma valores positivos cuando el sol se encuentra por encima del ecuador y negativos cuando está por debajo (Goswami, 2015). La declinación solar se representa mediante la ecuación 22:

$$\delta_s = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde  $N$  representa el número del día expresado en la Tabla 1

Ángulo de altura solar ( $\alpha_s$ ): Es la distancia entre los rayos solares y un plano horizontal (Goswami, 2015). Este ángulo es expresado en la Ecuación 23:

$$\sin(\alpha_s) = \sin(L) \sin(\delta_s) + \cos(L) \cos(\delta_s) \cos(h_s) \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde  $L$ ,  $\delta_s$  y  $h$  representan la latitud local, el ángulo de declinación solar y el ángulo horario respectivamente.

Ángulo azimutal ( $a_s$ ): Es el ángulo que forman los rayos solares medidos en un plano horizontal desde el sur para el hemisferio norte y desde el norte para el hemisferio sur. Este ángulo se representa en la Ecuación 24 (Goswami, 2015):

$$\sin(a_s) = \frac{\cos(\delta_s) \sin(h_s)}{\cos(\alpha_s)} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde  $\delta_s$ ,  $h$  y ( $\alpha$ ) representan los ángulos de declinación, horario y altura solar respectivamente.

## 2.2. MODELO CAD DE PLATAFORMA EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se detallan los elementos físicos del prototipo de colector solar Fresnel, mediante la realización de un CAD de cada elemento y posterior ensamble de estos, empleando el Software Solidworks 2019®.

La obtención de las medidas de cada uno de los elementos componentes se basan en datos dados en la compra del lente, en ella se definen:

- Medidas del Lente Fresnel.
- Material.
- Distancia focal.

El modelo CAD consta de los 4 elementos nombrados a continuación:

- Soporte base.
- Tubería.
- Lente Fresnel.
- Soporte superior

En los siguientes subcapítulos se detallan cada uno de los componentes nombrados.

### 2.2.1. SOPORTE BASE:

El soporte base mostrado en la Figura 3, es la base del sistema, soporta todo el peso de la estructura. Este componente está realizado en perfiles L de acero galvanizado y tiene soldados en cada uno de sus extremos dos cilindros de acero de  $\varnothing 2''$  y espesor 10mm, que sirven como guía para soportar la tubería receptora, porque cuenta con una perforación de  $\frac{1}{2}''$  en el centro de este; así mismo para realizar el seguimiento solar, ya que cuenta con dos perforaciones en la parte superior e inferior, donde entran dos tornillos de 6mm sujetados con tuercas.

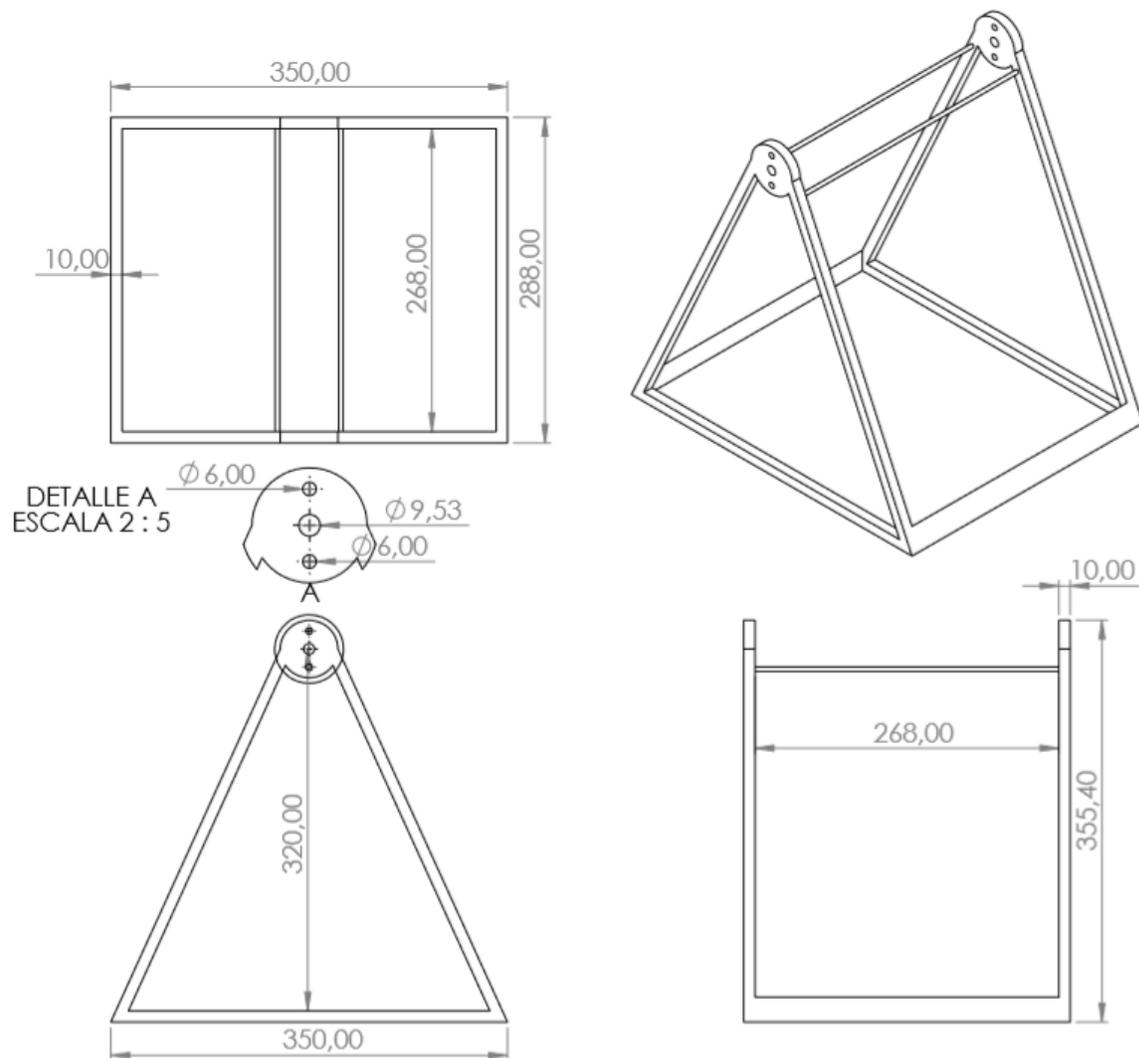


Figura 3: Modelo CAD del soporte base.

### 2.2.2. TUBERÍA

La tubería de este sistema, mostrada en la Figura 4 se encarga de recibir la radiación procedente del lente Fresnel. Este componente atraviesa los agujeros de  $\frac{1}{2}$ " presentes en los cilindros de acero que están soldados al soporte base. El diámetro de la tubería es de  $\frac{3}{8}$ " y el material es cobre, ya que posee buena conductividad térmica y es fácil conseguir comercialmente. Esta tubería fue pintada de color negro para incrementar su absorbancia.

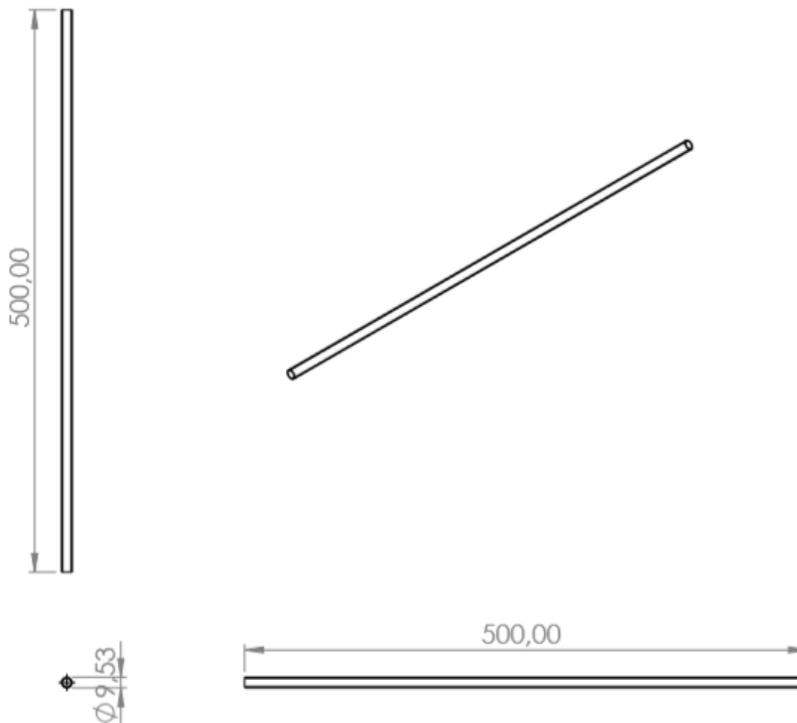


Figura 4: Modelo CAD de tubería del sistema

### 2.2.3. LENTE FRESNEL

El lente Fresnel es el componente más importante del sistema. Este se encarga de recibir los rayos solares y concentrarlos a lo largo de la tubería descrita en el numeral 3.1. Este elemento se encuentra descansando en el soporte superior de la estructura a una distancia determinada por la distancia focal dada por el fabricante (300mm). El material del lente es Polimetilmetacrilato (PMMA), el cuál es un polímero plástico transparente que se obtiene de la polimerización del monómero metilmetacrilato. Las principales características de este material son: propiedades ópticas excepcionales, rigidez, transparencia y dureza, lo cual lo hace uno de los polímeros preferidos en muchas aplicaciones de los sectores de automoción, iluminación, construcción y medicina

(Resinex, 2019). En la Figura 5 se puede apreciar el modelo CAD del lente Fresnel y sus correspondientes medidas.

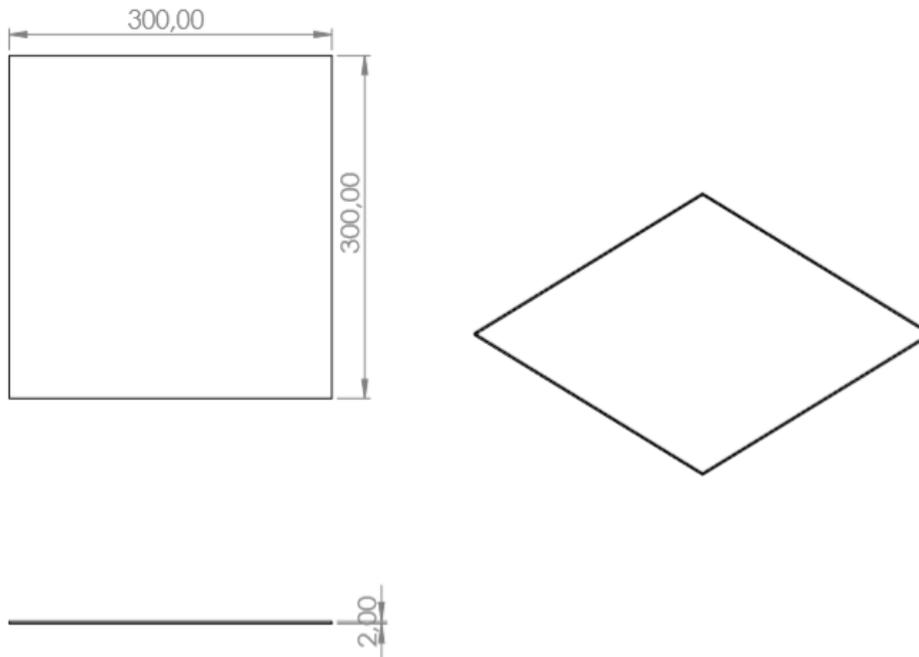


Figura 5: Modelo CAD del lente Fresnel.

#### 2.2.4. SOPORTE SUPERIOR

El soporte superior es el encargado de soportar el lente de Fresnel y mantenerlo en una posición plana, conservando una distancia focal hasta la tubería de 300 mm para garantizar que la tubería estará enfocada en cada momento en el que se hace el seguimiento solar. Este elemento al igual que el soporte base, se encuentra hecho de perfiles L de acero galvanizado, en su parte inferior tiene soldados dos cilindros de acero de  $\varnothing 2''$  y espesor 10 mm, los cuales tienen ranuras circulares y una perforación en su centro, tal como se muestra en la Figura 6, estas ranuras junto con los agujeros que poseen los cilindros del soporte base sirven para realizar el seguimiento solar, hacer que la tubería pase a través de ellos y a la vez dejar toda la estructura en una posición fija al momento de dejarla en un ángulo deseado.

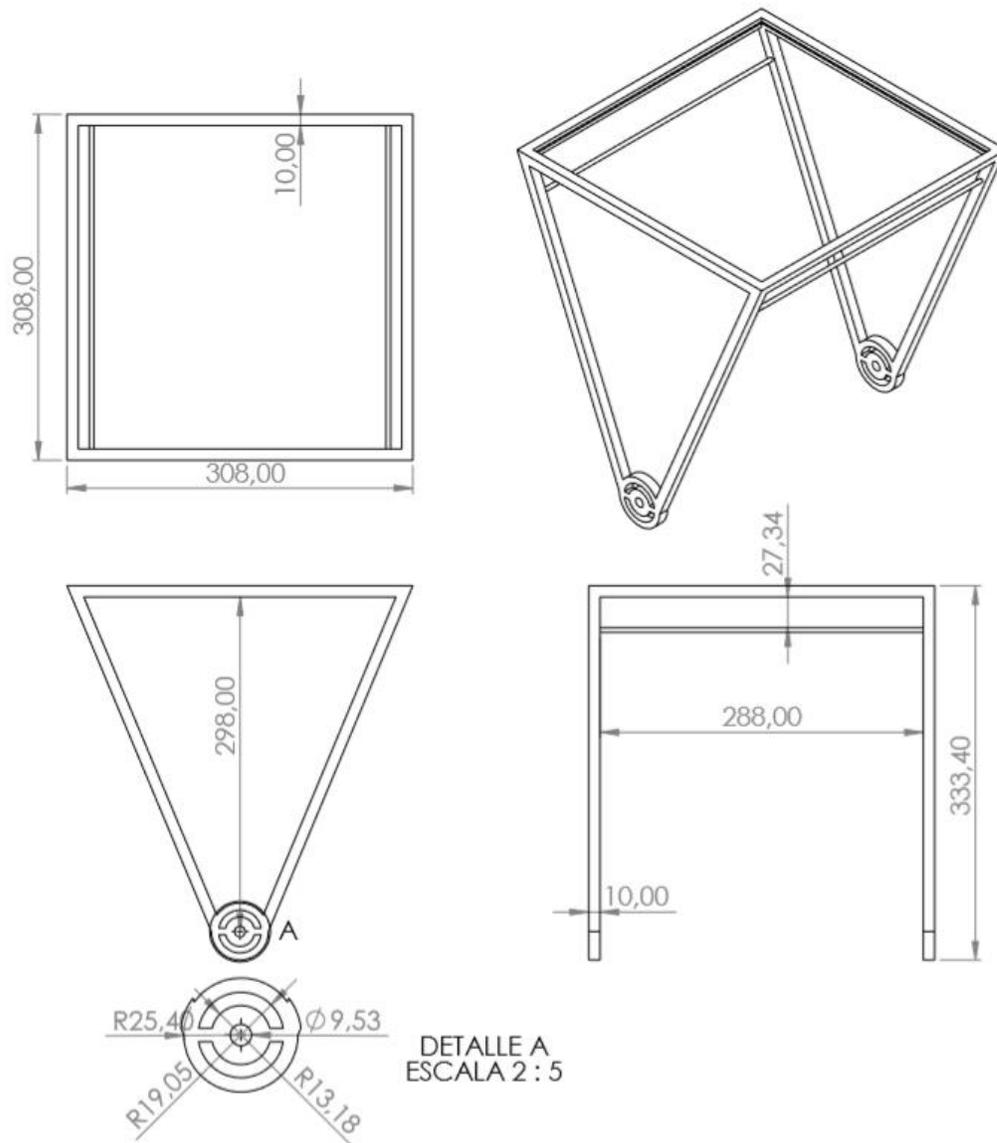


Figura 6: Modelo CAD del soporte superior.

### 2.2.5. ENSAMBLAJE DE LOS COMPONENTES

Después de la realización de cada uno de los componentes de la plataforma experimental, se procede a la unión de cada una de estas piezas, para verificar su funcionamiento. El ensamble de dicha plataforma se puede apreciar en la Figura 7, en la cual se pueden observar los 4 componentes descritos en capítulos anteriores. El empleo del software Solidworks 2018® permitió simular el movimiento del sistema de seguimiento, con ello se verificó la funcionalidad parcial de dicho dispositivo, y así mismo tener una base para la materialización de este.

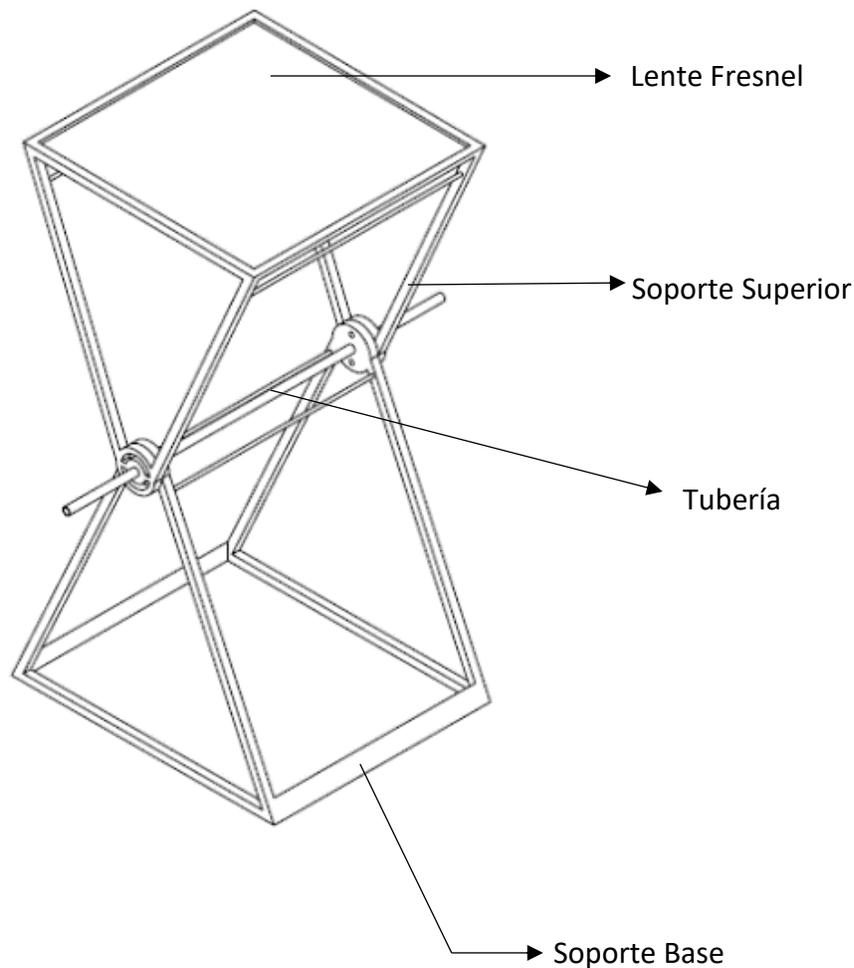


Figura 7: Ensamblaje de componentes CAD para plataforma de experimentación.

## 2.3. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO

### 2.3.1. EXPERIMENTACIÓN

Los ensayos realizados en la plataforma experimental contaron con tres dispositivos de instrumentación para la medición de variables tanto de entrada, como de salida:

- Unidad de adquisición de datos
- Estación meteorológica
- Rotámetro.

En la Tabla 2 se puede observar las variables que miden cada uno de estos equipos y las unidades en las cuales miden cada uno de ellos.

*Tabla 2 Variables y muestreo de equipos usados en plataforma experimental.*

Instrumento	Muestreo	Variable	Unidades
Unidad de adquisición de datos	1min	Temperatura del lente (2 canales)	°C
		Temperatura de tubería (4 canales)	
		Temperatura de entrada de agua	
		Temperatura de salida de agua	
Estación meteorológica	10min	Radiación solar	W/m <sup>2</sup>
		Temperatura ambiente	°C
		Velocidad del viento	m/s
Rotámetro	Constante	Caudal	L/min

### 2.3.2. ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Para la experimentación fue necesario contar con equipo mostrado en la Figura 8, el cual es una estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2. Gracias a este equipo se pudieron recolectar datos de condiciones ambientales externas.

Este equipo fue ubicado cerca de la plataforma experimental para mayor precisión en cuanto a variables como la radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento. Así mismo es capaz de medir otro tipo de variables como la presión atmosférica, humedad y radiación UV que debido al alcance de esta investigación no fueron tomados en cuenta. En la Tabla 3 se puede apreciar las especificaciones técnicas del equipo descrito.



Figura 8: Estación meteorológica.

Tabla 3 Especificaciones técnicas de estación meteorológica.

Equipos componentes	Especificación	Valor	Unidades de medida
Sensor de temperatura	Rango	40-65	°C
	Resolución	0.1	
	Precisión	±0.3	
Piranómetro	Rango	0-1800	W/m <sup>2</sup>
	Resolución	1	
	Precisión	±5	%
Anemómetro	Rango	0-89	m/s
	Resolución	0.4	
	Precisión	±5	%

### 2.3.3. UNIDAD DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la medición de datos de temperatura se utilizó una unidad de adquisición Applent AT4532, como se aprecia en la Figura 9. Este equipo se utilizó para registrar datos de 8 termopares tipo k, ubicados en distintos componentes de la plataforma experimental. Se instalaron 2 termopares en el lente Fresnel, 4 en la tubería receptora, 1 en la entrada de agua a la tubería y 1 en la salida de esta. Las conexiones de los termopares también se

pueden apreciar en la Figura 9 y las especificaciones de este equipo se muestran en la Tabla 4.

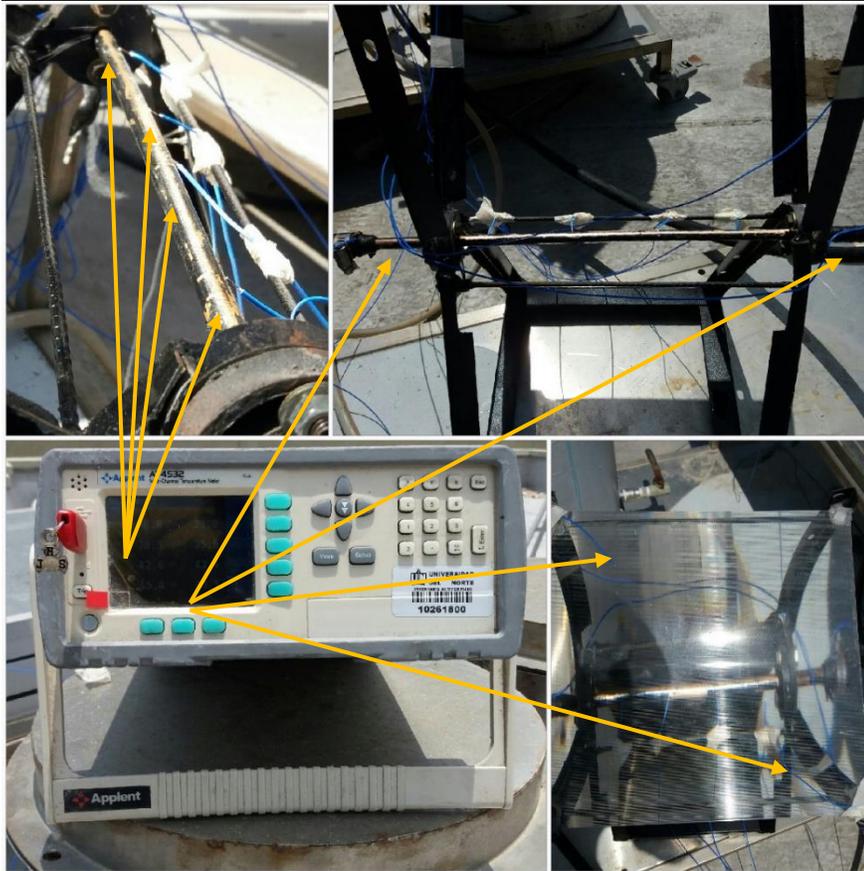


Figura 9: Unidad de adquisición de datos.

Tabla 4: Especificaciones técnicas de la Unidad de adquisición de datos.

Equipos componentes	Especificación	Valor	Unidades de medida
Sensor de temperatura	Rango	200-1300	°C
	Resolución	0.1	
	Precisión	1	

### 2.3.4. ROTÁMETRO

Se empleó un rotámetro Dwyer RMB 83 SSV para la regulación del caudal y su continuidad durante cada una de las pruebas realizadas. Este equipo se puede observar en la Figura 10 y sus especificaciones técnicas se dan en la Tabla 5

Tabla 5: Especificaciones técnicas del rotámetro.

Especificación	Valor	Unidades de medida
Rango	0-1.2	L/min
Resolución	0.05	
Precisión	±3	%



Figura 10: Rotámetro

### 2.3.5. SITIO DE EXPERIMENTACION

Las pruebas experimentales fueron llevadas a cabo en la zona norte de la ciudad de Barranquilla-Colombia, específicamente en las instalaciones de la Universidad del Norte, la cual en sus coordenadas geográficas presenta las siguientes características: Latitud 10.9878 y Longitud 74° 47' 20'' W.

La plataforma de experimentación se ubicó en un lugar abierto, sin objetos que pudieran generar sombras, como puede observar en la Figura 11. Las pruebas se realizaron durante los días 21 y 23 de agosto del año 2019, que en número de día para la conversión en el modelo de seguimiento corresponden a 233 y 235 respectivamente.



*Figura 11: Ubicación de plataforma experimental.*

### **2.3.6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

La obtención de la medición de variables dadas por la plataforma experimental se logró gracias a un monitoreo constante del funcionamiento de los equipos de medición y la ubicación de los ángulos de altura solar y azimutal. En cada una de las pruebas realizadas se llevó a cabo el protocolo descrito a continuación:

Antes de la prueba

- Obtención de ángulos de seguimiento a partir del modelo.
- Configuración de fecha, hora y muestreo de la Unidad de adquisición de datos.
- Definición de caudal de trabajo en Rotámetro.
- Configuración de estación meteorológica.
- Ubicación inicial de enfoque del Lente en la tubería
- Verificación de marcación y ubicación de termopares.
- Inicio de muestreo.

Durante la prueba

- Seguimiento y ubicación de los ángulos de altura solar y azimutal.
- Verificación de caudal.
- Verificación de registro de datos en Unidad de adquisición de datos.

Al terminar pruebas

- Obtención de datos registrados por Unidad de adquisición de datos.
- Obtención de datos registrados por estación meteorológica.
- Desconexión de equipos de trabajo.

Las pruebas realizadas no presentan uniformidad en cuanto al tiempo de muestreo debido a interrupciones realizadas por situaciones ambientales adversas como lluvia y corrientes fuertes de viento. En estos casos se hacía la desconexión y desmontaje de la plataforma experimental para evitar daños en su estructura.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. MODELO TÉRMICO

El modelo térmico descrito en el numeral 2.1, fue implementado en el software MATLAB-Simulink, programando cada una de las ecuaciones descritas en el mismo capítulo para los dos sistemas a realizar (térmico y seguimiento).

El sistema térmico realizado cuenta con un subsistema, al que se ingresan las variables de entrada, las cuales son datos propios del parámetro que se está evaluando, en una máscara se ingresan los parámetros de entrada, que son características y propiedades propias de los componentes del sistema y en otro subsistema se encuentra contenido el balance de energía realizado del modelo térmico descrito en el numeral 2.1.1. El sistema térmico es capaz de calcular cada uno de los flujos de calor presentes en la tubería, las temperaturas y la eficiencia del sistema. En la Figura 12 se pueden ver detallados cada uno de los sistemas descritos:

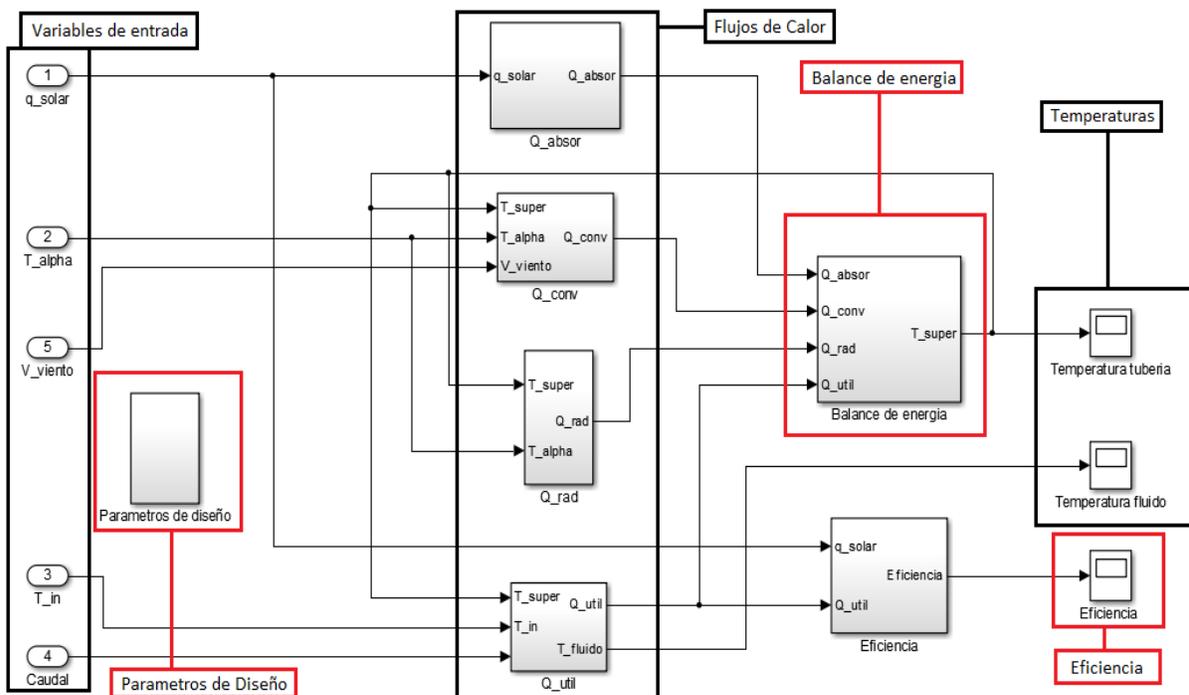


Figura 12: Modelación del sistema térmico en el Software MATLAB-Simulink

Por otra parte, se encuentra la implementación del sistema de seguimiento, el cual también es un subsistema al que entran parámetros geográficos propios del lugar donde se va a evaluar y mediante las ecuaciones descritas en el numeral 2.1.2, el sistema arroja

variables de salida, estas son los ángulos de altura solar y azimutal, con ello se puede conocer la forma en qué se debe posicionar el prototipo de la plataforma experimental que incluye al lente de Fresnel. En la Figura 13 se puede observar el sistema descrito:

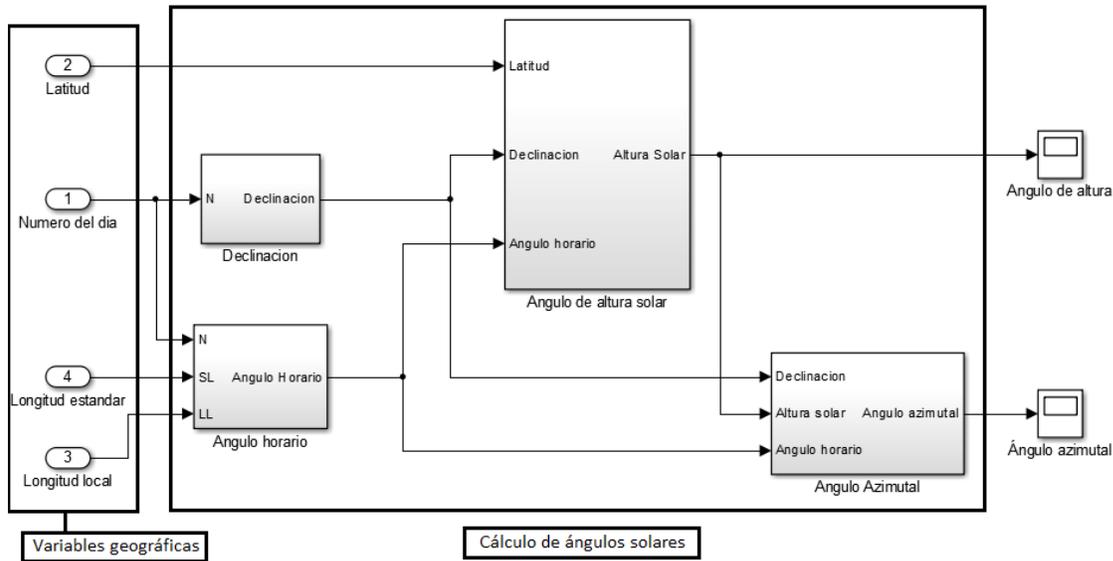


Figura 13: Modelación del sistema de seguimiento en el software MATLAB-Simulink.

### 3.1.2. VARIABLES DE ENTRADA

En la Tabla 6 pueden observar las distintas variables de entrada al modelo realizado en MATLAB-Simulink, estas variables rigen las condiciones de operación del modelo actuando de forma dinámica dependiendo las condiciones ambientales.

Tabla 6 Variables de entrada

Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor
Radiación solar	$\dot{q}_s$	W/m <sup>2</sup>	Según condiciones experimentales
Temperatura ambiente	$T_\infty$	°C	
Velocidad del viento	$V_{viento}$	m/s	
Temperatura de entrada de fluido	$T_{in}$	°C	Se utilizó 0.05 como caudal de trabajo
Caudal de fluido (Fijo)	$Caudal$	L/min	
Número del día	N	Adimensional	Según fecha y hora
Hora local	-	Hora: minutos	
Latitud	L	°	Según ubicación geográfica
Longitud local	LL	°	
Longitud estándar	SL	°	

### 3.1.3. PARÁMETROS DE ENTRADA

Los parámetros de entrada son aquellos factores que permanecen constantes durante la realización de una prueba. Estos parámetros pertenecen a las dimensiones, características y propiedades de los materiales empleados en el modelo. En Tabla 7 se pueden observar dichos parámetros.

Tabla 7 Parámetros de entrada.

Parámetro	Valor
<b>Lente Fresnel</b>	
Transmisividad	0.75
Dimensiones	0.3x0.3x0.002 [m]
Factor de Concentración	11.54
<b>Tubería [Cobre]</b>	
Longitud	0.3 [m]
Diámetro externo	0.009525[m]
Diámetro interior	0.009025 [m]
Densidad	8800 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Calor específico	420 [J/Kg°C]
Emisividad	0.3
Absorbancia	0.7
<b>Aire Exterior</b>	
Número de Prandtl	0.7282
Viscosidad cinemática	0.00001755 [m <sup>2</sup> /s]
Conductividad térmica	0.02699 [W/m°C]
Coeficiente de expansión volumétrica	0.0033144 [1/K]
<b>Fluido de trabajo [Agua]</b>	
Numero de Prandtl	6.14
Viscosidad cinemática	0.000013436 [m <sup>2</sup> /s]
Conductividad térmica	0.01847 [W/m°C]
Densidad	999 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Calor específico	4180 [J/Kg°C]
<b>Constantes</b>	
Aceleración de la gravedad	9.81 [m/s <sup>2</sup> ]
Constante de Stephan Boltzmann	0.0000000567 [W/m <sup>2</sup> °C]

### 3.1.4. VARIABLES DE SALIDA

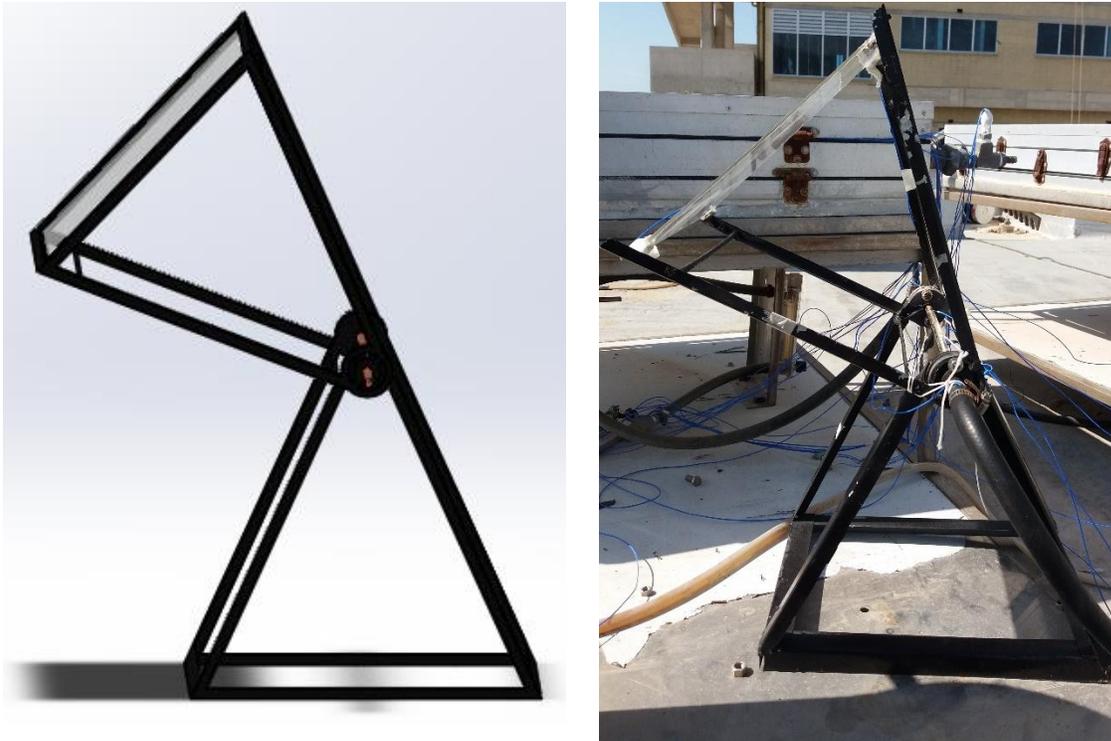
Al ingresar las variables y parámetros de entrada al modelo, este se encarga de establecer el comportamiento térmico del sistema concentrador-colector y entregar como variables de salida las temperaturas, los flujos de calor y la eficiencia térmica del sistema según el modelo. Todas las variables son calculadas en función del tiempo y se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8 Variables de salida

Variable	Nomenclatura	Unidades
<b>Temperaturas</b>		
Temperatura superficial de la tubería	$T_s$	°C
Temperatura de salida de fluido	$T_{fluido}$	°C
<b>Flujos de calor</b>		
Flujo de calor absorbido por la tubería	$\dot{Q}_{absor}$	W
Flujo de calor transmitido a los alrededores por convección	$\dot{Q}_{conv}$	W
Flujo de calor rechazado a los alrededores por radiación	$\dot{Q}_{rad}$	W
Flujo de calor transmitido al fluido	$\dot{Q}_{util}$	W
<b>Eficiencia</b>		
Eficiencia térmica del sistema	$n$	%
<b>Ángulos</b>		
Angulo de altura solar	$h$	°
Angulo azimutal	$a_s$	°

## 3.2. PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR

Con el uso del software Solidworks 2018® además de realizar el modelo CAD del prototipo para la experimentación, sirvió para simular el comportamiento de los ángulos de seguimiento (Altura solar y azimutal). Esto se puede ver corroborado en la Figura 14, donde se muestran los prototipos CAD y el prototipo experimental con la configuración en modelo de seguimiento para los ángulos antes mencionados.



*Figura 14: Prototipo CAD vs Experimental.*

Los componentes CAD del modelo descrito en el numeral 2.2, fueron la base para la constitución de la plataforma de experimentación mostrada en la Figura 15. Esta plataforma implicó conocimientos técnicos de los procesos de manufactura, mecánica de bancos y equipos disponibles para su realización, así mismo la selección de materiales ligeros y de fácil maniobrabilidad, dado que dicha plataforma tenía que ser móvil. En la margen inferior derecha de esta figura también puede observarse como el sistema garantiza la concentración de los rayos solares sobre la tubería receptora. En la Tabla 9 se pueden observar la descripción de cada uno de los componentes que hacen posible la realización del prototipo de colector solar.



Figura 15: Plataforma de experimentación.

Tabla 9: Componentes del prototipo de colector solar.

Nomenclatura	Descripción	Especificaciones
A	Lente Fresnel	PMMA( 300x300mm)
B	Soporte Base	Perfil L Acero Galvanizado Altura 350 mm - Ancho 400 mm
C	Soporte Superior	Perfil L Acero Galvanizado Altura 300 mm - Ancho 300mm
D	Tubería	Cobre 3/8" x 300 mm
E	Cilindros	Acero 2"x 10 mm
F	Escuadras	Acero 1"x1"

La plataforma experimental está constituida por un sistema de seguimiento de este a oeste, esto es dado gracias a dos cilindros de acero, uno que posee ranuras radiales y otras dos perforaciones por las cuales entran tornillos pasantes que permiten dejar un

ángulo de seguimiento fijo. El soporte base se encarga de sostener todo el peso de la estructura y contiene los cilindros de acero que tienen las perforaciones por las que pasan los tornillos. El soporte superior contiene 4 escuadras remachadas en cada esquina, en las cuales reposa el lente Fresnel, también tiene soldados los 2 cilindros de acero que poseen las ranuras radiales que permiten el seguimiento. El ensamblaje de los soportes base y superior garantiza el seguimiento del ángulo de altura solar, así mismo el movimiento lateral guiado desde el norte, permite el seguimiento del ángulo azimutal.

### 3.3. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO

El análisis para la validación del modelo presentado en el numeral 3.1 se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados obtenidos en las pruebas, usando el software MATLAB-Simulink e ingresando al modelo las variables de entrada y salida en condiciones reales de operación, graficando simultáneamente los valores dados por el modelo y los datos obtenidos en la experimentación.

Al inicio de cada una de las pruebas se tuvo como base la aplicación de los ángulos de seguimiento solar, facilitados por el sistema de seguimiento componente del modelo realizado. El seguimiento se realizó en dos ejes y los ángulos a seguir fueron los de altura solar y azimutal.

#### 3.3.1. CONDICIONES EXPERIMENTALES

En cada una de las pruebas realizadas se midieron las condiciones ambientales, esto con el objetivo de estudiar el comportamiento de la plataforma experimental ante condiciones externas y con ello observar la influencia de estas, en las variables de salida. La etapa de obtención de estas variables para las pruebas realizadas se muestra en la Tabla 10

*Tabla 10 Fechas y horas de experimentación.*

Prueba	Fecha	Hora
1	21-03-2019	10:15 am-11:51 am
2	23-03-2019	12:00 m-1:00 pm

Las condiciones externas de operación para cada uno de estos días son mostradas en las figuras( Figura 16 y Figura 17), donde se puede observar la radiación incidente en el lente Fresnel, la velocidad del viento, temperatura ambiente y la temperatura de entrada de agua al sistema para cada una de las pruebas.

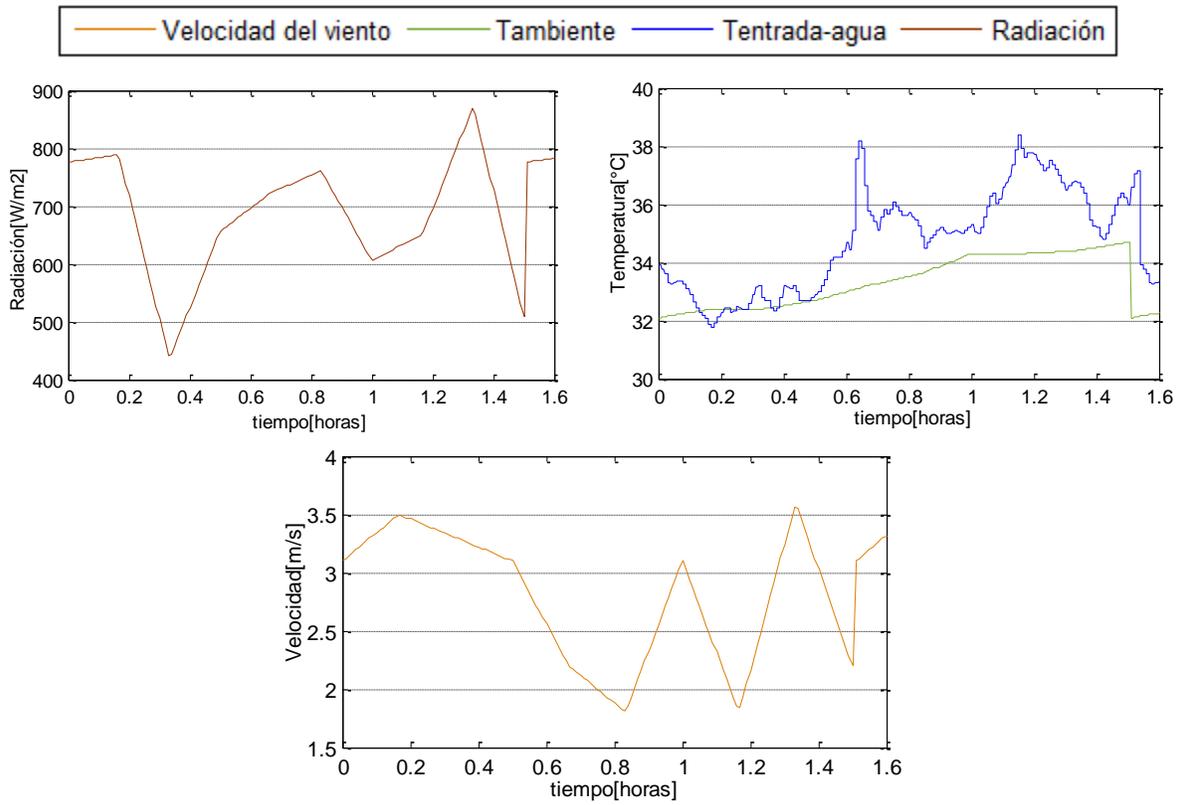


Figura 16: Condiciones externas de radiación, temperatura y velocidad del viento. Prueba 1.

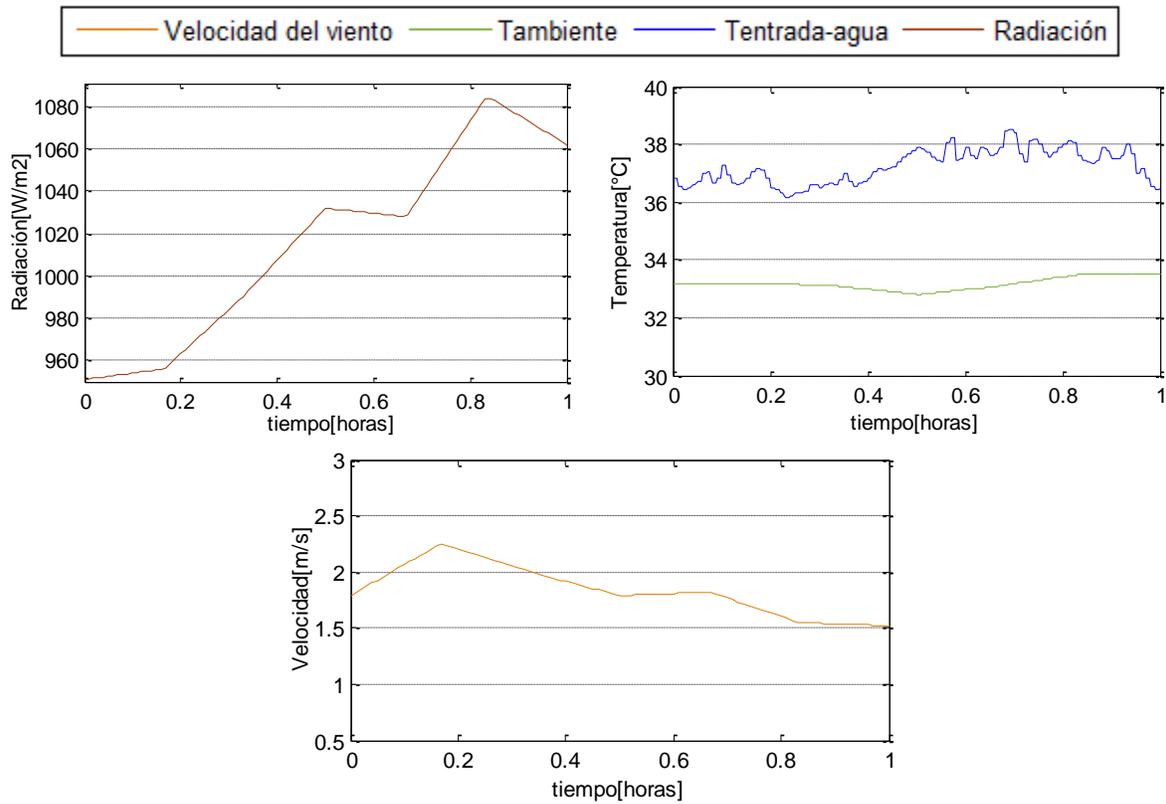


Figura 17: Condiciones externas de radiación, temperatura y velocidad del viento. Prueba 2.

### 3.3.2. SEGUIMIENTO SOLAR

El componente de seguimiento solar del modelo permitió obtener los ángulos para la realización del seguimiento en 2 ejes, en cada una de las pruebas realizadas. A continuación se detallaran cada una de ellas:

La primera prueba fue realizada el día 21 de agosto de 2019, que convertido a número de día en año normal corresponde a  $N=233$ . Con este valor, las coordenadas geográficas del lugar de experimentación y la hora en la que se realizó la prueba, el componente de seguimiento del modelo calculó los ángulos en los cuales se ubicó el lente Fresnel. Dichos ángulos son altura solar (Figura 18) y azimutal (Figura 19). Para establecer estos ángulos se ubicaron los puntos cardinales debajo de la plataforma experimental para luego estimar la variación de los ángulos con respecto a estos. Con ello se obtuvo el ángulo azimutal, que se tomó como base para la obtención del ángulo de altura solar. Cabe resaltar que los ángulos azimutal y altura solar toman como referencia los puntos cardinales Norte y Este respectivamente.

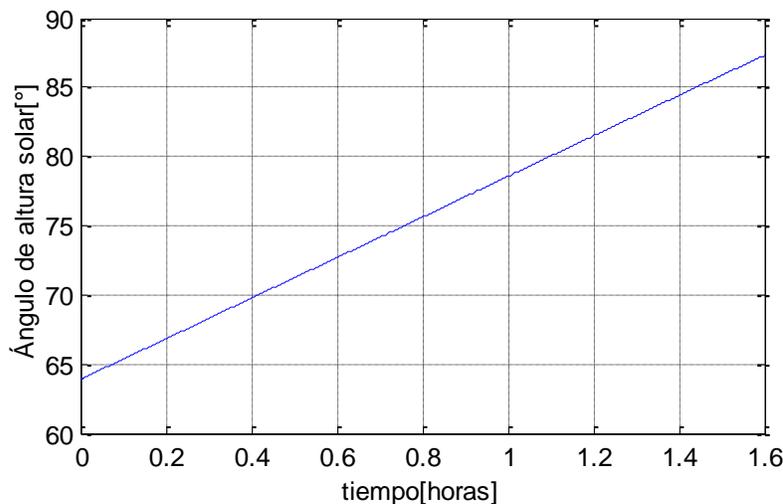


Figura 18: Ángulo de altura solar para el día 233.

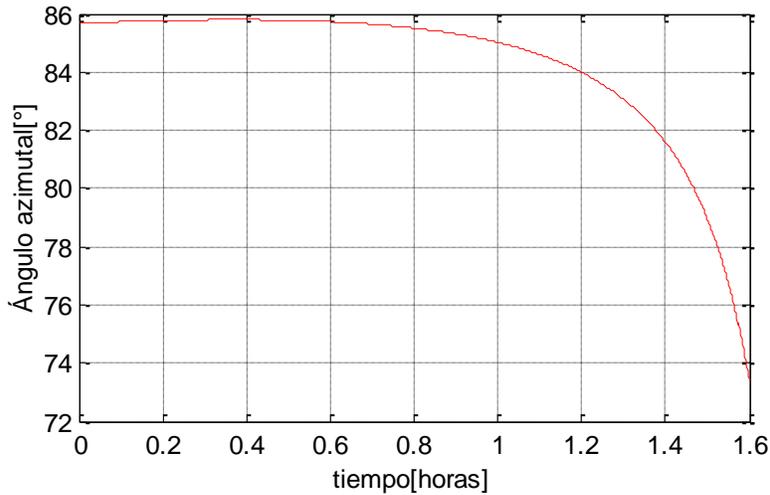


Figura 19: Ángulo azimutal para el día 233.

Con el objetivo de corroborar el funcionamiento del modelo y la correspondencia del sistema de seguimiento según la dinámica solar, se realizó una segunda prueba el día 23 de agosto de 2019, que corresponde a número de día N=235 en un año normal, siguiendo el procedimiento experimental se obtienen los ángulos de altura solar (Figura 20) y azimutal (Figura 21) correspondientes a este día.

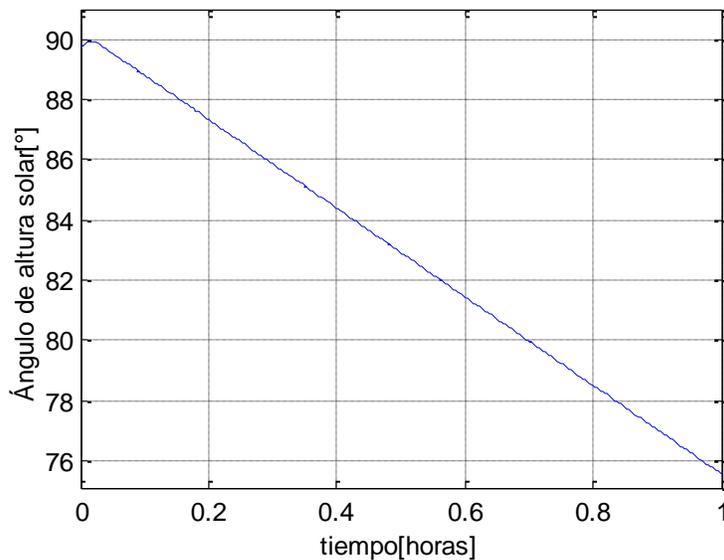


Figura 20: Ángulo de altura solar para el día 235.

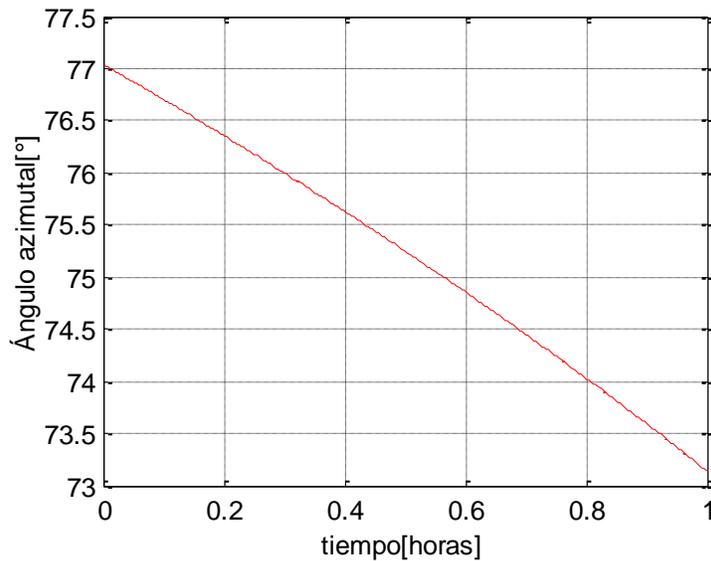


Figura 21: Ángulo azimutal para el día 235.

### 3.3.3. RESULTADOS Y VALIDACION EXPERIMENTAL

En esta sección se presenta la validación experimental del modelo mediante los resultados experimentales obtenidos con el prototipo de colector solar fresnel. Para ello se compararon los resultados registrados en la operación del dispositivo en condiciones reales con los estimados por el modelo térmico.

En la Figura 22 y Figura 23 se puede apreciar el comparativo experimental-modelo para la temperatura superficial de la tubería y la temperatura de salida de agua. Puede observarse cómo en ambos casos el modelo reproduce aceptablemente el comportamiento térmico de ambas variables a lo largo de la prueba.

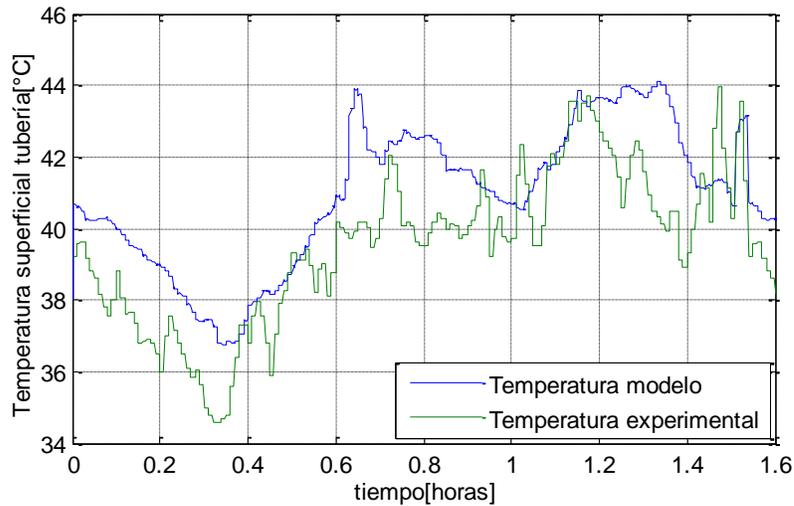


Figura 22: Temperaturas superficial de tubería (modelo vs experimental). Día 233.

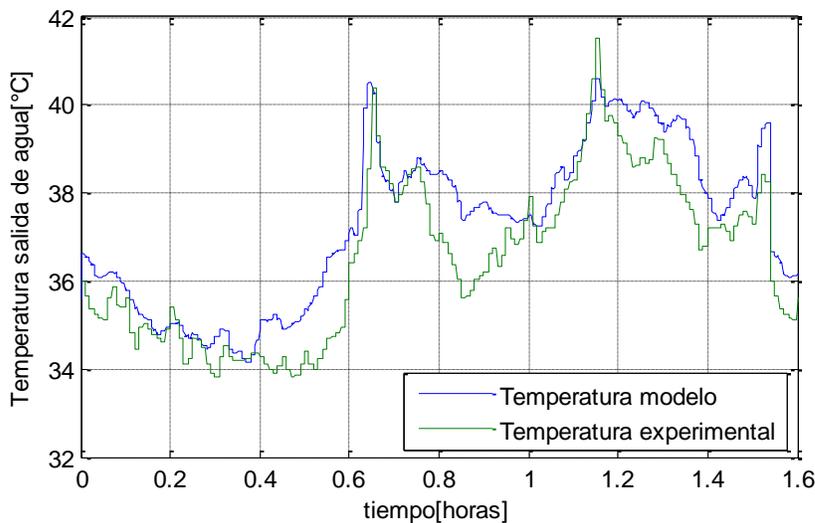


Figura 23: Temperaturas de salida de agua (modelo vs experimental). Día 235.

Para la prueba 2 del día 23 de agosto de 2019, las siguientes figuras muestran el comparativo entre el modelo y lo obtenido experimentalmente para la temperatura superficial de la tubería (Figura 24) y la de salida de agua (Figura 25). Las temperaturas promedio de la tubería dada por el modelo y la experimental fueron 46.31 y 45.26°C respectivamente. En cuanto a las temperaturas de salida de agua del modelo y experimental se obtuvieron 40.93 y 40.48°C respectivamente. Puede observarse nuevamente que en ambos casos el modelo estima acertadamente el comportamiento del sistema.

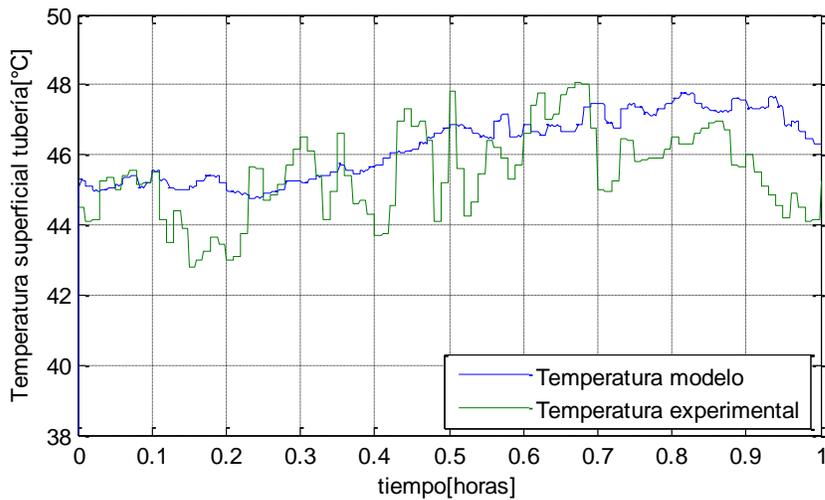


Figura 24: Temperaturas superficial de tubería (modelo vs experimental). Día 235.

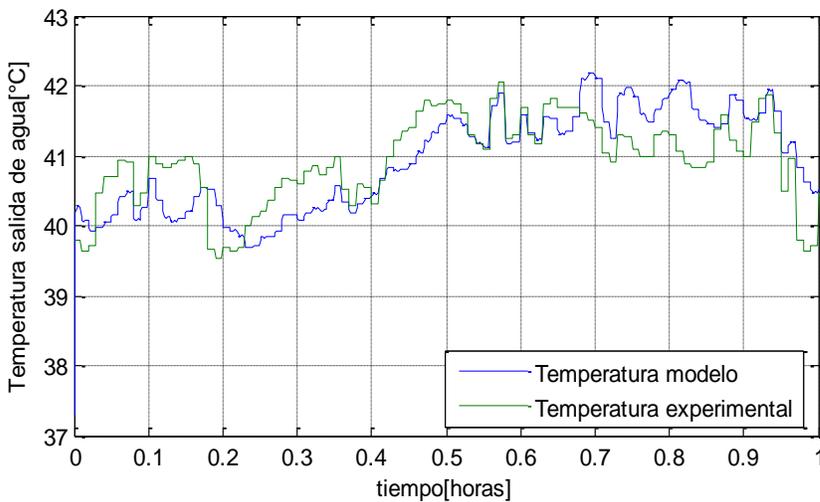


Figura 25: Temperaturas de salida de agua (modelo vs experimental). Día 235.

Por otra parte, la eficiencia térmica acumulada del modelo y la experimental, para las dos pruebas realizadas son mostradas en la Figura 26, en la que se puede ver plasmado la correspondencia de la eficiencia del modelo y la experimental. Se puede observar que en la prueba 1 la eficiencia presenta un menor valor al compararlo con su eficiencia teórica dado por el modelo, esto es debido a que en el primer día de pruebas se presentaron condiciones de operación de velocidad de viento y radiación con mayores fluctuaciones respecto a las de la prueba 2 donde fueron mucho más estables.

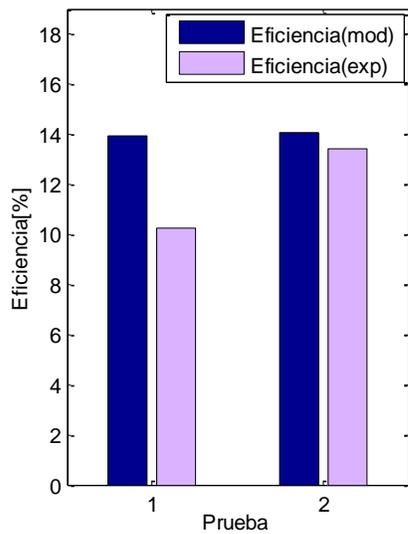


Figura 26: Eficiencia térmica (modelo vs experimental).

Por otra parte, se realizó el análisis estadístico comparando los valores de la temperatura superficial de la tubería y la de salida de agua dadas por el modelo y las obtenidas en la experimentación. Se evaluó el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE) para determinar con qué variaciones puede el modelo predecir la temperatura del sistema. Este análisis se muestra en la Tabla 11, del cual se puede decir que el modelo es capaz de estimar valores para la temperatura superficial de la tubería con diferencias máximas de 1.83 °C y la temperatura de salida de agua con 0.96 °C de diferencia.

Análisis Estadístico				
	Prueba 1		Prueba 2	
Parámetro	MAE	RMSE	MAE	RMSE
Temperatura superficial de tubería[°C]	1.55	1.83	1.23	1.55
Temperatura de salida de agua[°C]	0.78	0.96	0.45	0.57

Tabla 11: Análisis estadístico para la temperatura.

### 3.3.4. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO TÉRMICO

Con el objetivo de comparar el calor útil obtenido en cada una de las pruebas, se muestran las temperaturas del agua en la entrada y salida del sistema, mostradas en la Figura 27, para la prueba 1 y en la Figura 28 para la prueba 2. De estas figuras se puede notar que en la prueba 2 se presenta mayor uniformidad en la temperatura, esto es debido principalmente a que en este día la velocidad del viento fue más estable que en el primer día de pruebas, esto hace que las pérdidas por convección disminuyan y los datos

no sean dispersos. En la prueba 1 se obtuvo una diferencia de temperatura máxima de  $3.96^{\circ}\text{C}$ , en cambio en la prueba 2 este fue de  $4.03^{\circ}\text{C}$ .

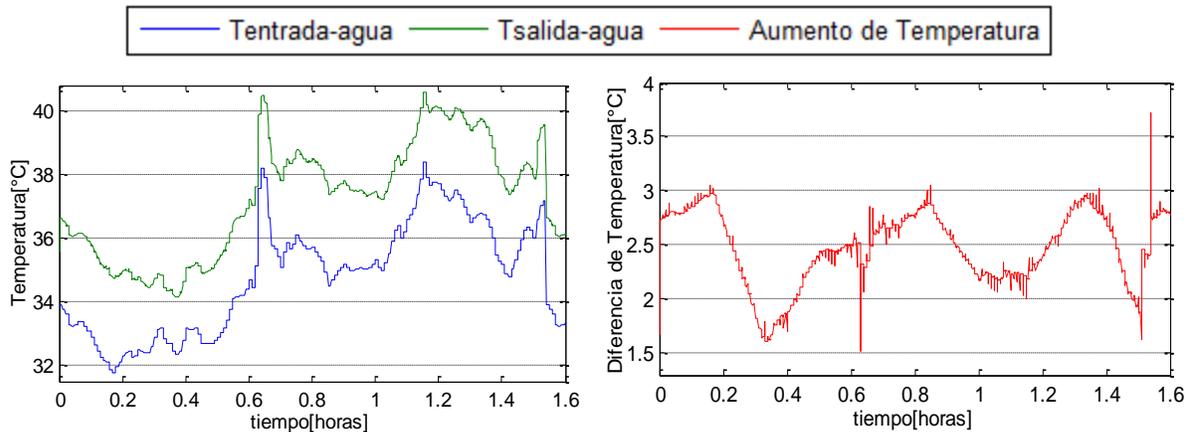


Figura 27: Cambio de temperatura en el sistema. Prueba 1.

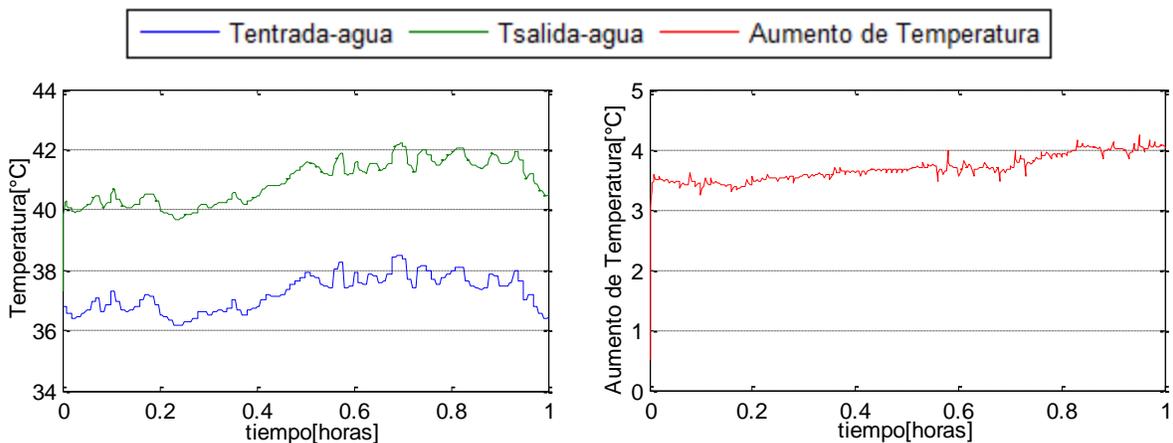


Figura 28: Cambio de temperatura en el sistema. Prueba 2.

Por otra parte, para la evaluación del desempeño térmico del dispositivo, se utilizó el modelo térmico validado previamente para estimar las razones de transferencia de calor que intervienen en el prototipo en cada una de las pruebas. En las figuras (Figura 29 y Figura 30) se muestran los resultados para el calor útil, por convección, por radiación y el absorbido por el receptor. En ambas figuras se aprecia que la transferencia de calor hacia el fluido de trabajo es superior a las pérdidas por convección y radiación en la tubería.

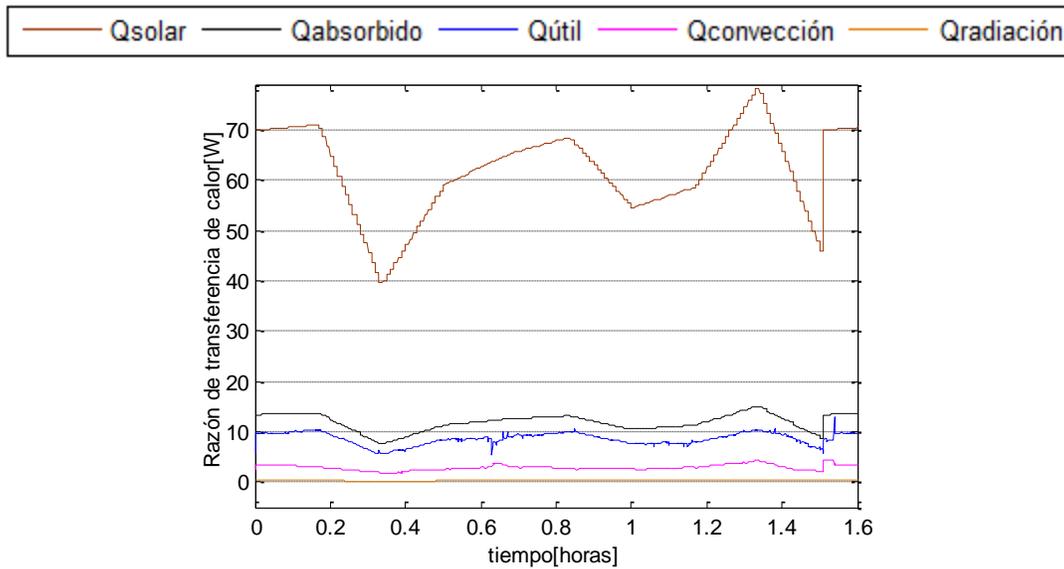


Figura 29: Flujos de calor presentes en modelo térmico. Prueba 1.

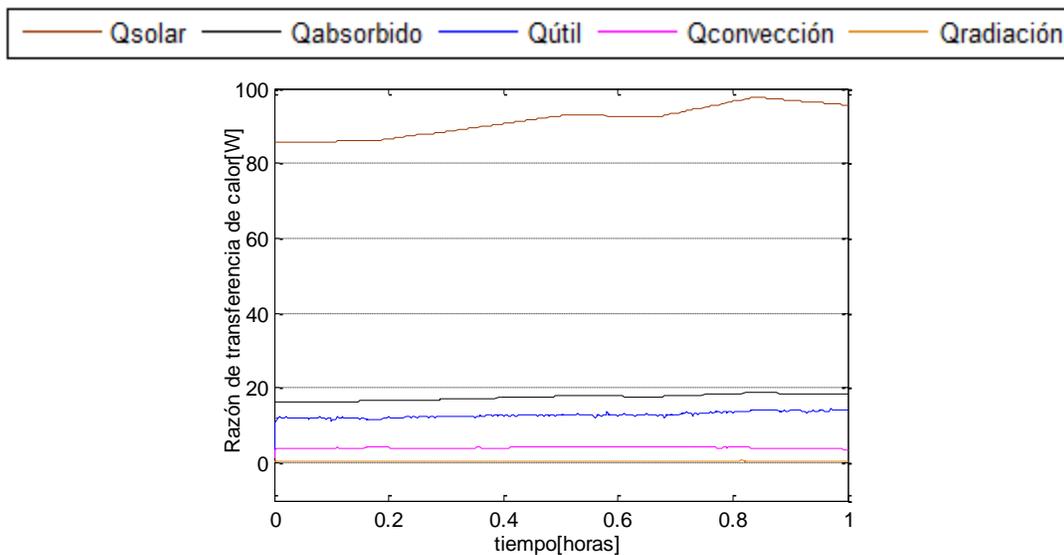
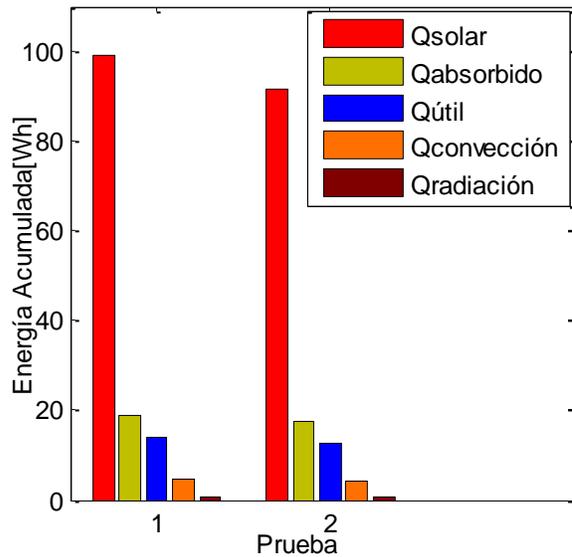


Figura 30: Flujos de calor presentes en modelo térmico. Prueba 2.

Ahora bien, con el modelo se logró determinar la energía total acumulada correspondiente a las razones de transferencia de calor para la prueba 1 (N=233) y prueba 2 (N=235). Los resultados son mostrados en la Figura 31, donde se puede observar la entrada de energía al sistema y las pérdidas asociada a los distintos modos de transferencia de calor.



Energía Acumulada [Wh]		
	Prueba 1	Prueba 2
$\dot{Q}_{solar}$	98.94	91.43
$\dot{Q}_{absor}$	19.03	17.58
$\dot{Q}_{útil}$	13.79	12.84
$\dot{Q}_{conv}$	4.66	4.097
$\dot{Q}_{rad}$	0.58	0.64

Figura 31: Energía acumulada- Modelo térmico.

En la gráfica y en la margen derecha de la Figura 31 se puede notar la gran diferencia que existe entre la radiación solar que absorbe la tubería con respecto a la que incide directamente en el lente. De esto se puede inferir que gran parte de esta energía térmica es rechazada a los alrededores por el mismo lente Fresnel y por la superficie del receptor. Por lo tanto, se puede decir que el seguimiento manual pudo haber influido a estas pérdidas debido a los posibles desenfocos que se pueden causar teniendo en cuenta que los escenarios en los cuales se realizaron las pruebas predominaron fuertes corrientes de viento, las cuales causaron inestabilidad en la estructura del prototipo de colector solar.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta investigación se realizó la evaluación de un sistema de calentamiento solar a través del empleo de un concentrador lineal de lentes Fresnel que cuenta con seguimiento solar en dos ejes. Esta evaluación se llevó a cabo de forma experimental y a través del planteamiento de un balance de energía y resolución de ecuaciones tanto de transferencia de calor, como de seguimiento solar de un modelo térmico resuelto en el entorno MATLAB-Simulink, el cuál es el factor principal y diferenciador, ya que a la fecha no se ha realizado un modelo de este tipo, empleado a concentradores lineales Fresnel.

Para cumplir con los objetivos planteados, se realizó un prototipo a pequeña escala, en el cual se pudo dar seguimiento solar a un concentrador lineal de lentes Fresnel. Este prototipo sirvió para la realización de pruebas experimentales en las cuales se registraron las condiciones ambientales y de operación en las cuales se encontraba. Por otra parte, se llevó a cabo la implementación del modelo térmico del prototipo, que tiene la capacidad de predecir el comportamiento de este ante condiciones reales de operación y también obtener los ángulos en los cuales se debe ubicar el lente Fresnel para mantener enfocados los rayos solares. Este modelo permite estimar variables como temperaturas, razones de transferencia de calor entre los componentes principales del sistema, como también la energía acumulada en cada uno de ellos y eficiencia térmica total del sistema. Del mismo modo se pueden obtener los ángulos de seguimiento solar como la altura solar y azimutal.

La validación del modelo se llevó a cabo mediante la comparación de los datos obtenidos en la experimentación con los datos predichos por este. El seguimiento solar fue exitoso, ya que los ángulos arrojados por el sistema de seguimiento del modelo correspondieron con los ángulos en los que se ubicó el prototipo de colector solar, lo cual fue muy útil en las pruebas para mantener los rayos enfocados en la tubería. Los resultados obtenidos para el sistema térmico correspondientes y su variación están dados principalmente por la incertidumbre existente en los equipos usados para la medición de estas variables, los cuales hacen que los errores en el muestreo se propaguen a través del modelo, presentando acumulación y generando incertidumbre en cuanto a los resultados arrojados en las variables de salida. Otros autores como (Palacio, 2018) han realizado análisis de incertidumbre en el modelado matemático de un sistema de calentamiento de agua con acumulación de energía térmica, en el cual se usaron los mismos equipos de medición empleados en esta investigación. En dicha investigación el autor obtiene que la incertidumbre de dichos equipos afecta las temperaturas de salida del modelo en  $\pm 2^\circ \text{C}$ . Así pues, las variables de salida del sistema térmico del modelo planteado se encuentran

entre los rangos aceptables, ya que, al predecir la temperatura superficial de la tubería y de salida de agua con diferencias de 1.83 °C 0.96 °C respectivamente, se puede afirmar que las desviaciones del modelo pueden ser atribuidas a la propagación de incertidumbre de los instrumentos.

En cuanto al colector solar desarrollado, se obtuvo conversión energía térmica entre 12.84 y 13.79 Wh durante las pruebas de experimentales, consiguiendo una eficiencia térmica acumulada del 14%, con incrementos de temperatura del fluido de trabajo de entre 3-4 °C para el caudal de trabajo utilizado. De manera que el sistema sí se logró utilizar un prototipo de colector solar con lente de fresnel para la conversión de energía solar térmica.

Por otra parte, gracias al modelo térmico se logró identificar grandes diferencias entre la energía solar incidente en el lente con la transmitida por el lente hacia la tubería. En efecto, de los entre 73.85 y 79.91 Wh que llegaron al lente durante las pruebas, 13.8 y 12.6 Wh fueron absorbidos por la tubería, de los cuales sólo se están transfiriendo al fluido de trabajo 12.84 - 13.79 Wh. Esto representa valores entre 10-15 % del total de la energía solar incidente que se podría aprovechar como calor útil. Así pues, para mejorar el desempeño del sistema térmico se recomienda utilizar materiales de mayor calidad en cuanto a propiedades ópticas, usar un lente con mayor factor de concentración, mayor transmisividad y menor absorbancia. También se recomienda implementar tubos de vacío en la tubería receptora, el propósito de disminuir las pérdidas de calor asociadas a la convección y así incrementar la eficiencia térmica del sistema y lograr mayores temperaturas de salida. El modelo térmico desarrollado en esta investigación podrá ser utilizado como una herramienta de evaluación estas posteriores configuraciones, modificaciones y prototipos de colectores solares fresnel.

En cuanto al sistema de seguimiento, en futuras investigaciones se podría implementar la programación de las ecuaciones en sistemas de código abierto que permitan su programación y, a través de servomotores, se genere un sistema automático de seguimiento solar que ayudaría a que las pruebas se realizaran de una mejor forma sin estar presentes cerca del prototipo de colector solar en todo momento. De este modo se podrían evitar factores de sombra y desenfoque que afecten la transferencia de calor entre los componentes del sistema.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Carmona, M., & Palacio, M. (2019). Thermal modelling of a flat plate collector with latent heat storage validated with experimental data in outdoor conditions. *Solar Energy*, 14.
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de Calor y masa*. University of Nevada, Reno: Mc Graw Hill.
- DNP. (2017). *Departamento Nacional de Planeacion*. Obtenido de DNP: <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Energia/MCV%20-%20Energy%20Demand%20Situation%20VF.pdf>
- Goswami, Y. D. (2015). *Principles of solar engineering. Third Edition*. United States: CRC Press. Taylor & Francis Group.
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor, 4a. ed.* Mexico: Prentice Hall.
- Kalogirou, S. A. (2009). *Solar energy engineering: Processes and systems*. United States of America: Academic Press.
- Kumar, V., Shrivastava, R., & Untawale, S. (2015). Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15.
- Ma, X., Zheng, H., & Liu, S. (2019). Optimization on a cylindrical Fresnel lens and its validation in a medium-temperature solar steam generation system. *Renewable Energy*, 12.
- Muraleedharan, M., Singh, H., Udayakumar, M., & Suresh, S. (2019). Modified active solar distillation system employing directly absorbing Therminol 55–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano heat transfer fluid and Fresnel lens concentrator. *Desalination*, 7.
- Payback, S. (2017). *Calor solar para la industria*. Obtenido de [www.solrico.com: http://www.solrico.com/fileadmin/solrico/media/doc/Solar\\_payback/Calor\\_Solar\\_Para\\_La\\_Industria\\_Solar\\_Payback\\_April\\_2017.pdf](http://www.solrico.com: http://www.solrico.com/fileadmin/solrico/media/doc/Solar_payback/Calor_Solar_Para_La_Industria_Solar_Payback_April_2017.pdf)
- Perini, S., Tonnellier, X., King, P., & Samson, C. (2017). Theoretical and experimental analysis of an innovate dual-axis tracking linear Fresnel lenses concentrated solar thermal collector. *Solar Energy*, 12.

- Resinex. (2019). *Resinex*. Obtenido de Resinex: <https://www.resinex.es/tipos-de-polimeros/pmma.html>
- Sen, P., Ashustosh, K., Bhuwanesh, K., Engineer, Z., Hedge, S., Sen, P., & Davies, P. (2013). Lineal Fresnel mirror solar concentrator with tracking. *Procedia Engineering*, 6.
- UPME. (6 de 2014). *MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA* . Recuperado el 13 de 3 de 2019, de [http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INFORME\\_III\\_Caracterizacion\\_energetica\\_VerPub.pdf](http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INFORME_III_Caracterizacion_energetica_VerPub.pdf)
- Zhao, Y., Zheng, H., Ma, X., & Jin, R. (2018). Regenerative solar soil sterilizing system with the Fresnel lens concentrator. *Applied Thermal Engineering*, 9.
- Zheng, H., Feng, C., Su, Y., & Da, J. (2014). Design and experimental analysis of a cylindrical compound Fresnel solar concentrator. *Solar Energy*, 12.
- Zhu, G., Wendelin, T., Wagner, M., & Kutscher, C. (2013). History, current state, and future of lineal Fresnel concentrating solar collectors. *Solar Energy*, 14.