	<b>GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS</b>	<b>CÓDIGO</b>	FO-GS-15
		<b>VERSIÓN</b>	02
<b>ESQUEMA HOJA DE RESUMEN</b>		<b>FECHA</b>	03/04/2017
		<b>PÁGINA</b>	1 de 1
<b>ELABORÓ</b>	<b>REVISÓ</b>	<b>APROBÓ</b>	
Jefe División de Biblioteca	Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad	

## RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): DAVID ALEXANDER                      APELLIDOS: MURILLO SEPULVEDA

NOMBRE(S): DENNYS JEFFERSON                      APELLIDOS: ARENALES CARRILLO

FACULTAD: INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA MECANICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): ALBERTO                                      APELLIDOS: FALLA ARIAS

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): DISEÑO DE UN CALENTADOR DE AGUA CON ENERGIA SOLAR CON FINES INVESTIGATIVOS PARA INGENIERIA MECANICA

### RESUMEN

El presente proyecto escrito se formula para describir el diseño y proceso a ejecutar con agua y energía solar; temática que ya ha sido trabajada por diferentes investigadores, pero en el caso presente, se han introducido variables nuevas como diseño eficaz y radiación solar. La importancia de este proyecto recae en el rendimiento y la calidad que entrega el equipo al ser utilizado, ya que, mediante la aplicación de procesos térmicos se puede optimizar el uso el recurso solar. Su objetivo principal en Diseñar un calentador de agua que utilice energía solar para su funcionamiento, tendrá como alcance ser iniciativa e incentivar a la creación de nuevos calentadores utilizando la energía solar, reduciendo así el costo de las mismas. Es una investigación aplicada para generar conocimiento en el diseño de un calentador solar con fines investigativos para ingeniería mecánica a mediano plazo. El uso de energías limpias como lo es la energía solar nos ayuda a depender menos de los combustibles fósiles que le causan daños irreparables al medio ambiente. En su realización se utilizaron los softwares: Solidwork educativo para dibujar las piezas, Ansys en donde se realizó los cálculos de fuerzas y peso de los elementos del calentador, y Microsoft office Excel para hacer los cálculos logrando así integrar todo nuestro aprendizaje.

PALABRAS CLAVE: diseño, energía solar, calentador, variables, cálculos.

CARACTERÍSTICAS: PÁGINAS: 99 PLANOS: 0 ILUSTRACIONES: 31 CD ROOM: 0

OPIA NO

DISEÑO DE UN CALENTADOR DE AGUA CON ENERGIA SOLAR CON FINES  
INVESTIGATIVOS PARA INGENIERIA MECANICA

DAVID ALEXANDER MURILLO SEPULVEDA

DENNYS JEFFERSON ARENALES CARRILLO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

DISEÑO DE UN CALENTADOR DE AGUA CON ENERGIA SOLAR CON FINES  
INVESTIGATIVOS PARA INGENIERIA MECANICA

DAVID ALEXANDER MURILLO SEPULVEDA

Cód.1121595

DENNYS JEFFERSON ARENALES CARRILLO

Cód.1121941

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero mecánico

Director:

ALBERTO FALLA ARIAS

Ingeniero mecánico

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

# CARTA DE SUSTENTACION

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: CÚCUTA, 21 DE DICIEMBRE 2020

HORA: 4:00 p.m.

LUGAR: VIRTUAL GOOGLE MEET

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA MECANICA

Título de la Tesis: "DISEÑO DE UN CALENTADOR DE AGUA CON ENERGÍA SOLAR CON FINES INVESTIGATIVOS PARA INGENIERÍA MECÁNICA"

Jurados: Ing. FAUSTINO MORENO GAMBOA  
Ing. GONZALO DE LA CRUZ ROMERO GARCIA

Director: ING. ALBERTO FALLA ARIAS

Nombre del estudiante	Código	Calificación	
		Letra	Número
DENNYS JEFFERSON ARENALES CARRILLO	1121941	Cuatro, Dos	4.2
DAVID ALEXANDER MURILLO SEPULVEDA	1121595	Cuatro, Dos	4.2

**APROBADA**

  
Ing. FAUSTINO MORENO CARRILLO

  
Ing. GONZALO DE LA CRUZ ROMERO GARCÍA

  
Vo.Bo. GONZALO DE LA CRUZ ROMERO GARCÍA  
Coordinador Comité Curricular  
Ingeniería Mecánica

## REPRODUCCION PARCIAL



### CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO

Cúcuta,


Señores  
BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS  
Ciudad


Cordial saludo:

DAVID ALEXANDER MURILLO SEPULVEDA identificado(s) con la C.C.Nº 1090478623 y DENNYS JEFFERSON ARENALES CARRILLO identificado (s) con la C.C Nº 1090422362 autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado DISEÑO DE UN CALENTADOR DE AGUA CON ENERGIA SOLAR CON FINES INVESTIGATIVOS PARA INGENIERIA MECANICA presentado y aprobado en el año 2020 como requisito para optar al título de INGENIERIA MECANICA ; autorizo(amos) a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que **“los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores”**, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

  
FIRMA Y CEDULA  
1090478623

  
1090422362

## Resumen

El presente proyecto escrito se formula para describir el diseño y proceso a ejecutar con agua y energía solar; temática que ya ha sido trabajada por diferentes investigadores, pero en el caso presente, se han introducido variables nuevas como diseño eficaz y radiación solar. Sin embargo, la importancia de este proyecto recae en el rendimiento y la calidad que entrega el equipo al ser utilizado, ya que, mediante la aplicación de procesos térmicos se puede optimizar el uso el recurso solar. Presenta su objetivo principal en Diseñar un calentador de agua que utilice energía solar para su funcionamiento, tendrá como alcance ser iniciativa e incentivar a la creación de nuevos calentadores utilizando la energía solar, reduciendo así el costo de las mismas. Realizamos una investigación aplicada para generar conocimiento en el diseño de un calentador solar con fines investigativos para ingeniería mecánica a mediano plazo. En el departamento de norte de Santander ubicado en la región nororiental de Colombia se cuenta con una intensidad de radiación promedio mensual de  $594.1965 \text{ w/m}^2$  según SAM. Se consultaron fuentes como papers, artículos científicos y libros. El uso de energías limpias como lo es la energía solar nos ayuda a depender menos de los combustibles fósiles que le causan daños irreparables al medio ambiente. Para hacer este proyecto se utilizaron los softwares: Solidwork educativo para dibujar las piezas, Ansys en donde se realizó los cálculos de fuerzas y peso de los elementos del calentador, y Microsoft office Excel para hacer los cálculos logrando así integrar todo nuestro aprendizaje

**Palabras claves:** diseño, energía solar, calentador, variables, fuentes, cálculos.

## Abstract

This written project is formulated to describe the design and process to be executed with water and solar energy; subject that has already been worked on by different researchers, but in the present case, new variables such as effective design and solar radiation have been introduced. However, the importance of this project lies in the performance and quality that the equipment delivers when used, since, by applying thermal processes, the use of the solar resource can be optimized. It presents its main objective in Designing a water heater that uses solar energy for its operation, it will have the scope of being an initiative and incentivizing the creation of new heaters using solar energy, thus reducing their cost. We carry out applied research to generate knowledge in the design of a solar heater for research purposes for mechanical engineering in the medium term. In the department of Norte de Santander located in the northeastern region of Colombia there is an average monthly radiation intensity of  $594.1965 \text{ w / m}^2$  according to SAM. Sources such as papers, scientific articles and books were consulted. The use of clean energies such as solar energy helps us to depend less on fossil fuels that cause irreparable damage to the environment. To carry out this project, the softwares were used: Educational Solidwork to draw the parts, Ansys where the force and weight calculations of the heater elements were performed, and Microsoft office Excel to do the calculations, thus integrating all our learning

**Keywords:** design, solar energy, heater, variables, sources, calculations.

## **Dedicatoria**

### **Dennys Jefferson Arenales Carrillo**

A Dios por ser el forjador, guía y estandarte en mi vida.

A mis padres Denis Arenales Quintero e Isneyde Carrillo Cristancho quienes me apoyaron y dedicaron su juventud a cuidarme y enseñarme.

A mi abuela Iscelina Cristancho, a mis abuelos Heraclio Arenales y Virginia Quintero quienes siempre estuvieron pendientes de mí y han sido parte fundamental en mi crianza.

A mis hermanos, mi hermana Sandra Zenith Arenales Carrillo y Alejo Osneider Arenales Carrillo quienes siempre están presentes y son mi motivación día a día.

A mis familiares y amigos que siempre estuvieron apoyándome durante el proceso de mis estudios, y en especial a mi amiga Eddy Magaly Caceres Galvis que me recibió en su casa y me brindo el apoyo necesario para iniciar mi carrera profesional.

### **David Alexander Murillo Sepúlveda**

Dedico el presente trabajo a mis padres John Jairo Murillo Quintero y Elizabeth Sepúlveda Florez por guiarme hacia el camino de la ciencia y los valores éticos, a mi amor Natalia Ascencio por ser un apoyo en cada obstáculo presentado durante mi vida universitaria y a mis hermanos e hijo los cuales me motivaron para lograr esta meta y son mi inspiración para seguir alcanzando mis objetivos.

## **Agradecimiento**

### **Dennys Jefferson Arenales Carrillo**

Agradezco a Dios por guiarme y cuidarme todos los días, a mis seres queridos, quienes han sido mis pilares para seguir adelante.

Mi mayor sentido de gratitud, a la Universidad Francisco de Paula Santander, por abrirme las puertas a un mundo de conocimiento, al Rector Hector Miguel Parra, y a los docentes que brindaron sus conocimientos y orientación profesional.

Agradezco a el ingeniero Gonzalo de la Cruz Romero García director del programa ingeniería mecánica, y a la doctora Mawency Vergel Ortega quienes me apoyaron en el crecimiento profesional y personal.

Debo de agradecer el apoyo al ingeniero Alberto Falla Arias por su información, disposición de tiempo para direccionamiento y objetividad del alcance de este proyecto.

Agradezco a mis amigos y compañeros de clase durante todos los niveles de Universidad, ya que gracias al compañerismo, amistad y trabajo en equipo han aportado en un alto porcentaje a mis sueños y metas profesionales.

Agradezco a todas aquellas personas que contribuyeron para alcanzar este gran logro



## **David Alexander Murillo Sepúlveda**

Agradezco a mis padres, a mis tías Sonia y Gladys Murillo por el apoyo en cada semestre cursado. De igual manera manifiesto mi gratitud con el ingeniero Alberto Falla Arias por sus enseñanzas, tiempo y compromiso con el presente proyecto, con la UFPS por ser la entidad educativa en la cual adquirí mis conocimientos, con los Ingenieros Gonzalo de la Cruz Romero García, Orlando Gutiérrez, Miguel Briceño y Alberto Falla por sus enseñanzas en las distintas disciplinas de ingeniería mecánica y por su ejemplar trabajo como docentes universitarios, que me han servido como referencia en el campo de la enseñanza.

## Tabla de Contenido

Introducción	18
1. Problema	19
1.1 Titulo	19
1.2 Planteamiento del problema	19
1.3 Formulación del Problema	19
1.4 Justificación	19
1.5 Objetivo	21
1.5.1 Objetivo General	21
1.5.2 Objetivos Específicos	21
1.6 Alcances y Delimitaciones	21
1.6.1 Alcances	21
1.6.2 Delimitaciones	22
2. Marco Teórico	23
2.1 Antecedentes	23
2.2 Estado del Arte	25
2.2.1 Calentador de Agua.	25
2.2.2 Radiación solar	25

2.2.3	Clasificación de los colectores solares en cuanto a la temperatura de trabajo	28
2.2.4	Componentes del colector cilíndrico parabólico	30
2.2.5	Criterios de diseño del calentador mediante un colector solar cilíndrico parabólico	32
2.2.6	Diseño del colector cilíndrico parabólico (CCP)	35
2.2.7	Pérdidas en un CCP	39
2.2.8	Rendimiento de un CCP	42
2.3	Glosario	44
2.4	Marco legal	45
2.4.1	Constitución política de Colombia 1991.	45
2.4.2	Marco regulatorio y normativo vigente para calentadores solares de agua	46
3.	Metodología	48
3.1	Tipo de estudio	48
3.2	Método De Investigación	48
3.3	Resultados esperados	48
4	Diseño del calentador solar	50
4.1	Selección del tipo de colector.	50
4.2	Funcionamiento del colector	50
4.3	Parámetros de diseño	51
4.3.1	Especificaciones	52
4.3.2	Condiciones del entorno	52

4.4 Estudio del recurso solar para Cúcuta-Norte de Santander	53
4.3.1 Cálculo de la radiación directa (Paredes C. , 2012)	58
4.5 Selección de los materiales	66
4.5.1 Reflector Solar	66
4.5.2 Tubo receptor	66
4.5.3 Seguimiento Solar	68
4.5.4 Controlador	69
4.6 Dimensiones del calentador solar	70
4.6.1 Reflector solar	70
4.6.2 Tubo receptor	72
4.6.3 Tubo al vacío	73
4.6.4 Estructura del calentador solar cilíndrico parabólico	74
4.6.5 Seguimiento solar	77
4.7 Análisis térmico del sistema de calentamiento	80
4.7.1 Cálculo del tiempo de calentamiento del agua en el tubo absorbedor hasta la temperatura de 60°C	81
4.7.2 Eficiencia térmica del calentador solar cilíndrico parabólico	89
4.7.3 Tanque de almacenamiento	92
5 Conclusiones	94
6 Recomendaciones	95

7. Referencias Bibliográficas

96

8. Anexos

98

## Lista de Figuras

Figura 1 Horizontal Irradiance, Global Tilt Irradiance and Direct Normal Irradiance	27
Figura 2 Diagrama esquemático de la geometría del concentrador	29
Figura 3 Clasificación en función del factor de concentración	29
Figura 4 Esquema del seguimiento solar a un eje de un CCP.	31
Figura 5 Esquema vector solar frente a vector normal a la superficie.	33
Figura 6 Representación de la parábola	36
Figura 7 Representación de la curva	36
Figura 8 Ángulo de abertura $\beta$ y de la distancia $l$	37
Figura 9 Angulo de aceptación de un CCP	39
Figura 10 Pérdidas ópticas de un CCP	40
Figura 11 Pérdidas en el tubo absorbedor de un CCP	40
Figura 12 Esquema del calentador solar	50
Figura 13 Datos de la ubicación en SAM para analizar el recurso solar desde 1998-2018.	53
Figura 14 Datos promedio de radiación en la UFPS desde 1998 a 2018(P50/P90) mediante SAM	54
Figura 15 Datos de la ubicación en SAM para analizar el recurso solar del 2018.	54
Figura 16 Datos promedio de radiación en la UFPS del 2018 mediante SAM	55
Figura 17 Radiación directa desde 1998 hasta 2018 en la UFPS	56
Figura 18 Radiación directa promedio del año 2018 para la UFPS	56
Figura 19 Perfil del reflector solar	71
Figura 20 Vista superior de la base	72
Figura 21 Especificaciones del tubo de cobre seleccionado	73

Figura 22 Especificaciones de la tubería de vidrio de borosilicato seleccionada	74
Figura 23 Propiedades físicas de la estructura del calentador	75
Figura 24 Geometría	76
Figura 25 Análisis estático de la armadura	76
Figura 26 Esfuerzo máximo en la estructura	77
Figura 27 Características de la cadena seleccionada (INTERMEC S.A.)	80
Figura 28 Flujos de transferencia de calor para el balance energético en el tubo absorbedor	81
Figura 29 Esquema del tubo absorbedor.	88
Figura 30 Datos analizados en el balance de energía del calentador	90
Figura 31 Análisis térmico del calentador solar	91

## Lista de tablas

Tabla 1 Tipo de Radiación solar	26
Tabla 2 Necesidades del calentador	52
Tabla 3 Parámetros	52
Tabla 4 Radiación directa promedio por mes del año 2018.	57
Tabla 5 Declinación media mensual del lugar de instalación	58
Tabla 6 Angulo horario a lo largo del día	59
Tabla 7 Radiación directa media y Angulo de incidencia solar de enero 2018	60
Tabla 8 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de febrero del 2018	60
Tabla 9 Radiación directa media y ángulo de incidencia del marzo 2018	61
Tabla 10 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de abril 2018	61
Tabla 11 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de mayo 2018	62
Tabla 12 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de junio 2018	62
Tabla 13 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de julio 2018	63
Tabla 14 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de agosto 2018	63
Tabla 15 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de septiembre 2018	64
Tabla 16 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de octubre 2018	64
Tabla 17 Radiación directa media y Angulo de incidencia solar de noviembre 2018	65
Tabla 18 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de diciembre 2018	65
Tabla 19 Materiales posibles a utilizar en el reflector solar	66
Tabla 20 Materiales posibles a utilizar para el tubo interno	67
Tabla 21 Pinturas de recubrimiento	67
Tabla 22 Alternativas para el seguimiento solar	68



Tabla 23 Alternativas para el controlador	69
Tabla 24 Especificaciones del diseño del calentador en cuanto a sus elementos	70
Tabla 25 Geometría seleccionada para el calentador solar	71

## **Introducción**

El presente proyecto escrito se formula para describir el diseño y proceso a ejecutar con agua y energía solar; temática que ya ha sido trabajada por diferentes investigadores, pero en el caso presente, se han introducido variables nuevas como diseño eficaz y radiación solar. Sin embargo, la importancia de este proyecto recae en el rendimiento y la calidad que entrega el equipo al ser utilizado, ya que, mediante la aplicación de procesos térmicos se puede optimizar el uso el recurso solar. Ejemplo de ello, presentamos el calentador solar que aumenta la temperatura del agua. Por ello, se espera que dicho proyecto pueda seguir siendo investigado, y usado en agua para el consumo humano, el proyecto se efectuará en el área metropolitana de Cúcuta, en la sede central de la universidad Francisco de Paula Santander.

La institución de educación superior Universidad Francisco de Paula Santander se caracteriza por formar profesionales integrales para la región, país y en todo el mundo. Para nosotros es de vital importancia trabajar con el recurso de energía solar para ser partícipes de la innovación y el desarrollo tecnológico en este aspecto.

## **1. Problema**

### **1.1 Título**

DISEÑO DE UN CALENTADOR DE AGUA CON ENERGIA SOLAR CON FINES INVESTIGATIVOS PARA INGENIERÍA MECÁNICA

### **1.2 Planteamiento del problema**

Debido al efecto invernadero y a la emisión de gases contaminantes provocados por la utilización de combustibles fósiles, es necesario evitar que sigamos destruyendo la capa de ozono y es importante el aprovechamiento de nuestras energías inagotables como lo son las energías renovables dando así una solución con los calentadores solares para combatir la contaminación que le hacemos al medio ambiente con los calentadores que se utilizan comúnmente. Ya que la energía solar es una fuente de energía amigable con el medio ambiente.

### **1.3 Formulación del Problema**

¿Cómo obtener agua caliente a partir del recurso disponible solar minimizando los costos en el consumo de energía?

### **1.4 Justificación**

Con este proyecto demostraremos que los calentadores de agua tradicionales los podemos sustituir con calentadores de energía solar ya que su funcionalidad no requiere de otro tipo de

energía que contamine el medio ambiente lo que generará un gran impacto social y ambiental.

Con el estudio se aportará un método de calentar agua apta para el uso humano en algunas regiones del país, aprovechando la disponibilidad de agua y la energía solar. Con este uso eficaz de los recursos disponibles, se contribuirá al desarrollo humano. El estudio también aprovecha la energía renovable y su eficiencia energética. Con ello, se logra un menor impacto ambiental y la disminución en los gastos económicos para la adquisición de agua para el uso humano en la población.

Mediante el calentador solar se quiere lograr un seguimiento solar que consiga la temperatura suficiente sin degradar el fluido de transferencia por lo que su eficiencia termodinámica es muy buena. Este estudio pretende hallar la eficiencia del colector con el fin de obtener mayor cantidad de agua caliente durante el día, la cual puede ser utilizada en varias aplicaciones en el área industrial, así como también en residencias.

Cabe agregar que el sistema de seguimiento solar sólo será a un eje, ya que implica menos costos mecánicamente hablando, por ejemplo, en la reducción de tuberías pasivas, y de sus consecuentes pérdidas térmicas. La decisión de usar la orientación que mayor irradiación proporciona (Hrushikesh Bhujangrao, 2016), se debe a que el sistema trabajará con temperaturas bajas-medias por lo que se necesita garantizar la energía demandada por el proceso de calentador.

Esta propuesta de colector solar puede ser utilizado para la investigación y práctica de los estudiantes de la Universidad Francisco de Paula Santander; haciendo énfasis a la carrera de ingeniería mecánica.

## 1.5 Objetivo

### 1.5.1 Objetivo General

Diseñar un calentador de agua que utilice energía solar para su funcionamiento.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Recolectar información de artículos y fuentes informativas.
- Definir los parámetros de diseño basados en cálculos ingenieriles del modelo escogido para la selección de componentes.
- Especificar los materiales a usar para el diseño del calentador.
- Diseñar el seguimiento solar del calentador mediante el CAD SolidWorks.
- Evaluar la eficiencia del proceso de calentador mediante análisis termodinámicos de la temperatura del agua entrante y saliente.

## 1.6 Alcances y Delimitaciones

### 1.6.1 Alcances

En esta investigación se quiere formular el colector solar para darle al fluido temperatura, analizando la temperatura de entrada y salida del agua por día, teniendo en cuenta el seguimiento del sol y la radiación absorbida.

En el modelamiento del sistema se tendrá en cuenta el análisis en estado estable para su debido estudio.

Este proyecto tendrá como alcance ser iniciativa e incentivar a la creación de nuevos

calentadores utilizando la energía solar, reduciendo así el costo de las mismas.

### **1.6.2 Delimitaciones**

El proyecto se realizará en un lapso de tiempo de cuatro meses a partir de la aprobación del anteproyecto por parte del comité curricular.

Y el lugar a realizar será la universidad Francisco de Paula Santander sede central Cúcuta-Norte de Santander.

## 2. Marco Teórico

A continuación, se describen los conceptos básicos más relevantes que dan las bases para el desarrollo de este proyecto de investigación.

### 2.1 Antecedentes

Un primer trabajo corresponde a Tzivanidis et al 2015 quienes publicaron un artículo científico titulado: “investigación de eficiencia térmica y óptica de un colector parabólico” mediante la revista ELSEVIER. El trabajo mencionado anteriormente diseña y simula un pequeño modelo de colector parabólico para diferentes condiciones de operación con el fin de predecir la eficiencia y los fenómenos de transferencia de calor. Se utilizaron energías renovables ya que son libres de efecto invernadero donde la energía solar se trata de aprovechar específicamente en los colectores solares que pueden producir altas temperaturas a más de 400°C con alta eficiencia térmica. (Tzivanidis, Bellos, Korres, Antonopoulos, & Mitsopoulos, 2015)

El segundo trabajo corresponde a Orosz et al 2016 quienes publicaron un artículo científico titulado: “diseño económico de pequeña escala del colector cilindro-parabólico para la fabricación y el despliegue en África” mediante la revista AIP conference proceedings. En este proyecto de investigación se llevó a cabo la geometría y construcción de un desalinizador con bajo costo. El desalinizador obtuvo un rendimiento óptico de 98% y rendimiento térmico 67% a 180 °C. Estos resultados fueron validados en las instalaciones de prueba establecidos en colaboración con las instituciones gubernamentales y académicas locales en Lesotho. Se demostraron las características claves (fabricación central, transpirabilidad, facilidad de montaje, de un solo rastreo eje). El costo

de la PTC es de aproximadamente 180 USD / m<sup>2</sup>. (Orosz, 2016)

Un tercer trabajo realizado por (Hrushikesh Bhujangrao, 2016), titulado: Diseño y Desarrollo de Prototipo Cilíndrico Parabólico Solar utilizado para el calentamiento de agua. El colector cilindro-parabólico se hace más eficiente al instalar el dispositivo de seguimiento solar, debido a que, en primer lugar el movimiento del colector es continuo, describiendo así una trayectoria muy cercana a la del sol, lo que garantiza un mejor aprovechamiento de la radiación solar” dicho por el autor, tiene relación con el proyecto planteado en el presente proyecto, el cual tiene como fin diseñar e implementar un colector cilindro parabólico con seguimiento solar para obtener agua desalada.

Otro estudio realizado por (Arsalan, Vinay Prakash, & Kumar Rai, 2015) donde se diseñó, fabricó, evaluó y comparó el rendimiento de dos diferentes PTC, para producir agua caliente, utilizando dos materiales reflectores diferentes. En PTC-1, el material reflector está hecho de lámina de espejo acrílico, y En PTC-2 el material reflector está hecho de chapa de acero inoxidable. Para ambos PTC, el resto de los materiales utilizados son los mismos. En los resultados obtenidos la eficiencia térmica instantánea obtenida por el concentrador con lámina de espejo acrílico fue del 13,67%, y el concentrador con acero inoxidable fue del 15.85%. Por tanto, es recomendable utilizar el acero inoxidable para el cilindro reflector ya que el reflector de acero es más eficiente en comparación con el ángulo de PTC-1 que tiene lámina de espejo acrílico.

Según (Soeprijanto & Al, 2018) con “Diseño e implementación de agua destiladora ecológica de agua de mar con concentrador solar parabólico y bomba fotovoltaica para islas aisladas.”, utilizó aluminio como material de la caldera debido a su excelente protección contra la corrosión y buena



conductividad térmica que se adapta a las costosas condiciones ambientales. Esta tiene como objetivo acelerar el proceso de conducción de calor de la caldera que calienta utilizando radiación solar reflejada a través del concentrador solar. Lo cual es útil para la selección de los materiales a utilizar en la construcción del desalinizador.

Como último trabajo (Çağlar, 2016) donde se pudo comparar los materiales reflexivos del cromo y la placa de aluminio para verificar cuál de los dos podría ser mejor utilizado en el panel reflexivo, y entre los dos compuestos presentó una mejor eficiencia el panel de aluminio para la placa reflector que la del cromo para su mayor reflectividad en el desalinizador.

## **2.2 Estado del Arte**

### **2.2.1 Calentador de Agua.**

Es un aparato termodinámico que emplea energía para elevar la temperatura del agua. Entre los usos domésticos y comerciales del agua caliente están la limpieza, las duchas, la calefacción y la cocción.

### **2.2.2 Radiación solar**

#### ***2.2.2.1 Nociones Básicas***

La radiación es un fenómeno físico que consiste en el transporte o la propagación de energía en forma de partículas u ondas, es decir la radiación es energía en tránsito de un lugar a otro. La

radiación solar es un flujo de energía emitido por el sol que se propaga en forma de ondas electromagnéticas a diferentes frecuencias viajando en el espacio hasta llegar a la tierra por medio de paquetes de energía llamados fotones que funcionan como vehículos que transportan la energía solar y esta es percibida en la tierra como luz y calor.

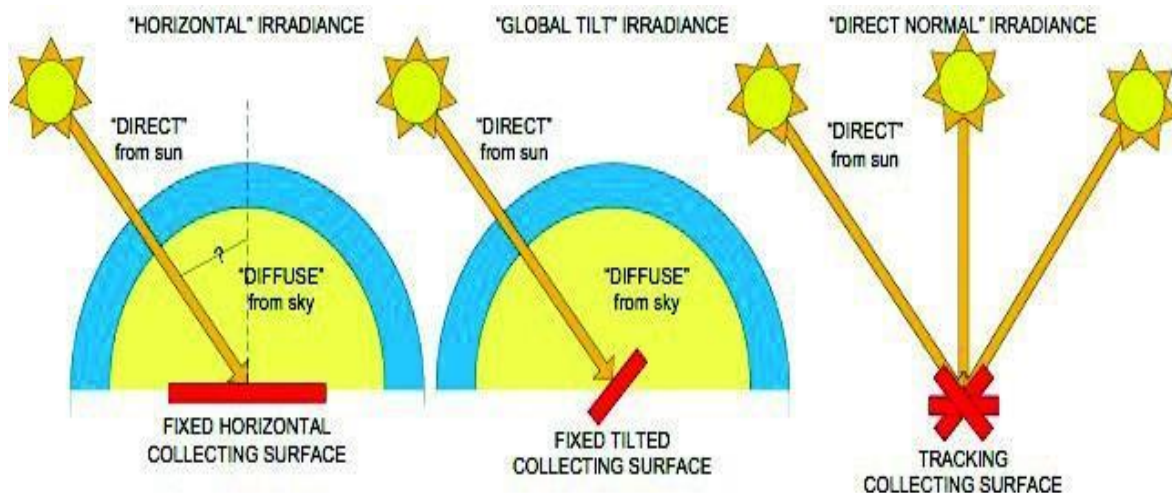
### 2.2.2.2 Tipos de Radiación

Tabla 1 Tipo de Radiación solar

Radiación	Característica
<b>Directa</b>	Es la que cae directamente del sol sin sufrir desviación en su trayectoria al pasar por la atmósfera.
<b>Difusa</b>	Es la que sufre un cambio de dirección al pasar por la atmosfera antes de llegar a la superficie terrestre. La desviación de los rayos solares se debe a que estos chocan con las moléculas y partículas que se encuentran en el aire.
<b>Reflejada</b>	Se provoca por los rayos reflejados por objetos en la tierra, estos pueden ser la luz reflejada por los lagos, suelo, paredes, etc.
<b>Total</b>	Es la radiación obtenida por todas las radiaciones, directa, difusa y reflejada, como se muestra en la figura 1.

Fuente: (Çağlar, 2016)

Figura 1 Horizontal Irradiance, Global Tilt Irradiance and Direct Normal Irradiance



Fuente: (Vashishtha, 2012)

### 2.2.2.3 Concentración de la radiación solar

La radiación del sol que alcanza el límite externo de la atmósfera es de  $1353 \text{ W/m}^2$  (Frank P. Incropera, 1999). Pero al ingresar a la atmósfera y tocar la superficie de la tierra la radiación puede llegar hasta poco más de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Con esto para aplicaciones que utilizan radiación solar directa se recurre a concentradores solares para mejorar su eficiencia. (Paredes C. , 2012)

Hay que tener claro los dos elementos básicos dentro del colector, el concentrador y el receptor. El primero constituye el sistema óptico, y es la parte del colector que dirige la radiación sobre el receptor. Éste es el elemento del sistema donde la radiación es absorbida y se transfiere la energía térmica al fluido. Por tanto, la razón de concentración superficial se define como el cociente del área de apertura del concentrador entre el área de absorción del receptor (Paredes C. , 2012)

$$C = \frac{\text{Área de apertura}}{\text{Área de absorción}} \quad 1)$$

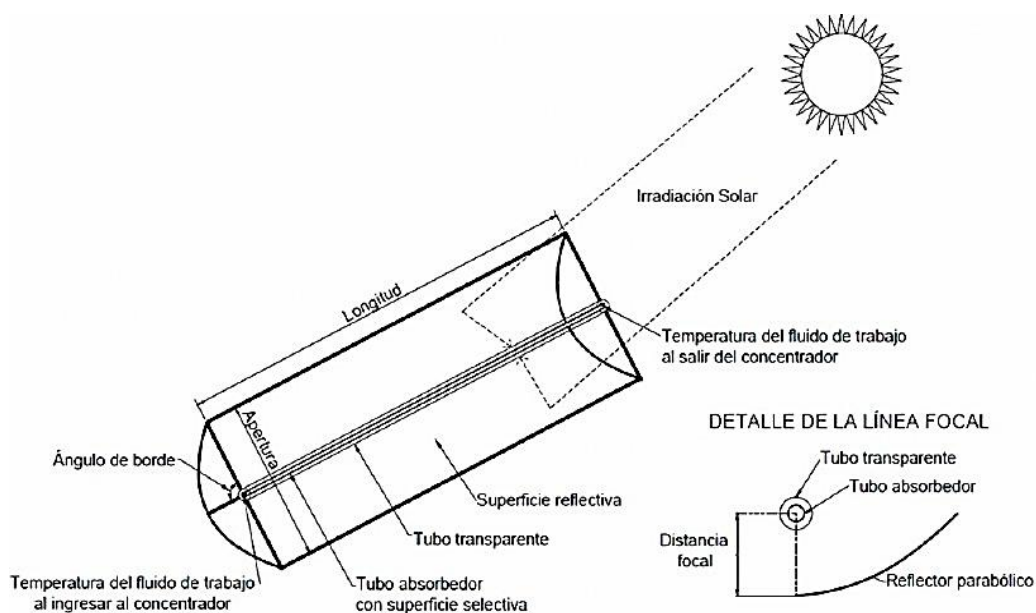
### **2.2.3 Clasificación de los colectores solares en cuanto a la temperatura de trabajo**

#### ***2.2.3.1 Colector cilíndrico parabólico (CCP)***

La principal característica de los CCP es que tienen un foco lineal y que transfieren la radiación solar directa al fluido a través de un tubo calentándolo y este se encuentra en el eje focal del mismo. Estos se los toma como colectores solares de media temperatura. (Paredes C. , 2012) Las temperaturas de trabajo promedio de diferentes colectores se evidencian en la figura 3.

Además, se tiene que la eficiencia en este tipo de colector tiene valores que van del 12,5% al 17% de la radiación solar, y son de las tecnologías de concentración más desarrolladas y con más aplicaciones comerciales actualmente. (Fabara, 2016)

Figura 2 Diagrama esquemático de la geometría del concentrador



Fuente: (Paredes C. , 2012)

Figura 3 Clasificación en función del factor de concentración

		Nombre	Croquis	Razón de concentración n "C"	Rango Temperatura alcanzada [C°]	
Estacionario	Absorbedor plano	Capatador plano de agua/aire		$C \leq 1$	$30 < T^{\circ} < 250$	
		Tubos de vacío		$C \leq 1$	$50 < T^{\circ} < 200$	
Seguidores	Seguimiento a un eje	Colector Parabólico Compuesto CPC		$1 < C < 15$	$70 < T^{\circ} < 300$	
		Colector Cilíndrico Parabólico CCP		$15 < C < 40$	$70 < T^{\circ} < 350$	
	Seguimiento a dos ejes	Absorbedores puntuales	Disco Parabólico		$100 < C < 1000$	$70 < T^{\circ} < 1500$
		Torre Central		$100 < C < 1500$	$150 < T^{\circ} < 1500$	

Fuente: (Paredes C. , 2012)

## **2.2.4 Componentes del colector cilíndrico parabólico**

En la figura 2 se pueden ver los elementos principales del conjunto del colector, de forma más detallada se definen del siguiente modo (Hrushikesh Bhujangrao, 2016)

### ***2.2.4.1 El Reflector Cilíndrico Parabólico***

Su misión es la de reflejar y concentrar sobre el Receptor la radiación solar directa incidente sobre la superficie. A grandes rasgos es un espejo curvo que forma en una de sus dimensiones una parábola, de forma que concentra sobre su línea focal toda la radiación reflejada. Algunos materiales utilizados son los espejos, aluminio y acero. (Arsalan, Vinay Prakash, & Kumar Rai, 2015).

### ***2.2.4.2 El tubo de absorción o Receptor***

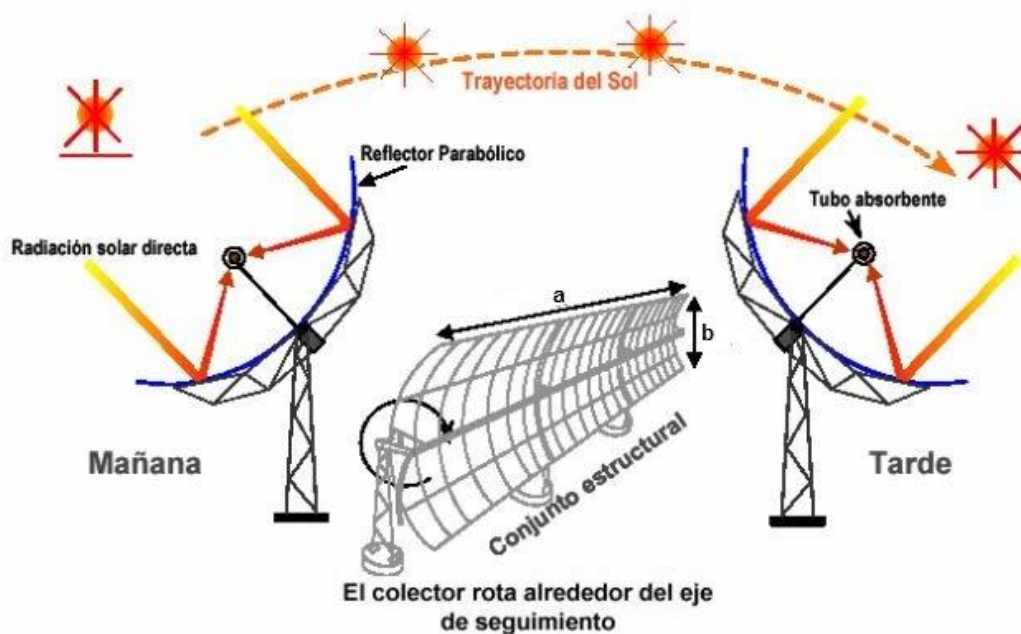
Este es el alma del CCP, ya que el rendimiento del CCP depende en sí de la capacidad termodinámica del absorbente. Este puede ser un solo tubo o de dos tubos concéntricos.

Cuando se tiene dos tubos concéntricos el tubo que se encuentra en el interior es metálico y tiene una absorbida mayor al 90% y con emisividades menores a 30% en el espectro infrarrojo, teniendo así un alto rendimiento térmico. Por otra parte, el tubo exterior es de cristal para reducir las pérdidas térmicas por convección del tubo metálico y protegerlo de las condiciones meteorológicas adversas que se puedan presentar. (Soeprijanto & Al, 2018)

### 2.2.4.3 El Sistema de Seguimiento Solar

Este sistema sirve para aprovechar de más horas de sol útil durante el día. El seguimiento solar en los CCP suele ser de Oeste a este, es decir, la base reflectora sigue al sol durante el día (figura 4). Añadir el seguimiento norte-sur mejora la captación de radiación, pero implica realizar una serie de conexiones complejas entre módulos. Por lo tanto, el sistema de seguimiento de un CCP se construye generalmente de un eje teniendo menos costos. (Çağlar, 2016).

Figura 4 Esquema del seguimiento solar a un eje de un CCP.



Fuente: (Paredes C. , 2012)

Este tipo de colectores tienen una eficiencia termodinámica muy buena en comparación con otros, y es por ello por lo que se usan en algunos procesos industriales como en la producción de acetona, el procesamiento de residuos, en la industria láctea, así como en la producción de electricidad,

donde existe gran madurez en investigación. Aun así, una de las mayores desventajas de este diseño de colector es que sólo hace uso de la radiación directa, siendo incapaz de captar la radiación difusa. Por culpa de ello los costes se incrementan, pues es necesario un instalar un sistema de seguimiento solar que necesita un aporte secundario de energía. (Paredes C. , 2012)

## **2.2.5 Criterios de diseño del calentador mediante un colector solar cilíndrico parabólico**

### ***2.2.5.1 Estudio del recurso solar para Cúcuta-Norte de Santander***

#### ***2.2.5.1.1 Parámetros necesarios***

- Ángulo cenital solar  $\theta$ : es el ángulo que forma la radiación directa del Sol con la vertical del lugar. Este ángulo varía a lo largo del día y depende de la latitud y de la declinación. (Paredes, 2012)
- Declinación  $\delta$ : es la posición angular del Sol al mediodía solar, respecto al plano del ecuador. Su valor varía entre  $\pm 23^\circ 15'$ . (Paredes, 2012)
- Ángulo horario  $\tau$ : es el desplazamiento angular del Sol respecto al mediodía, que es el momento del día donde más alto se encuentra el Sol en el cielo. Cada hora corresponde a  $15^\circ$  de longitud. (Paredes, 2012)
- Latitud  $\lambda$ : es la distancia angular que existe desde el plano del ecuador hasta un punto de la superficie terrestre



Al medio día solar el ángulo cenital es mínimo.

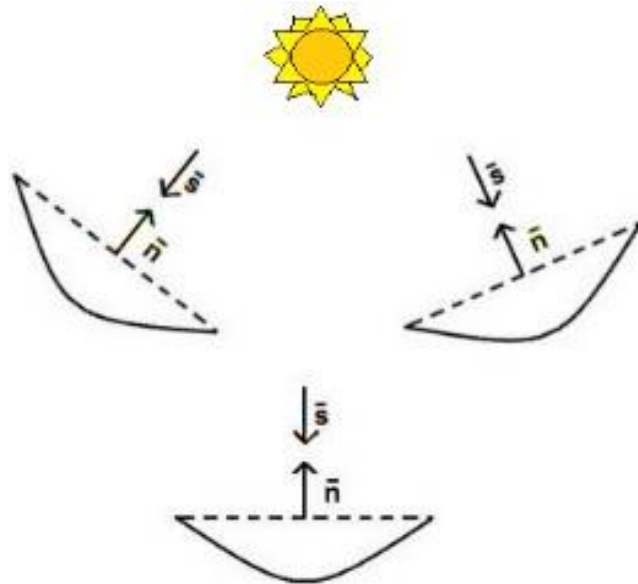
$$\tau = 12:00 \rightarrow \theta \text{ minimo} \quad 2)$$

La componente directa de la radiación  $I_o$  según la siguiente ecuación en condiciones normales (Paredes C. , 2012)

$$I_{o(\text{media})} = I_{o(\text{promedio mes})} * e^{\frac{-1}{3,8\cos(\tau-1,6)}} \quad 3)$$

Otro factor a tener en cuenta es la orientación del colector y el mecanismo que permita hacer un seguimiento lo más preciso posible. El seguimiento perfecto del Sol ocurrirá cuando el vector unitario ( $\vec{n}$ ), normal a la superficie de abertura del CCP, coincida con el vector unitario  $\vec{s}$  de la radiación directa; puesto que, de esta forma, el plano de abertura del colector será perpendicular a los rayos solares incidentes. (Paredes, 2012)

Figura 5 Esquema vector solar frente a vector normal a la superficie.



Fuente: (Paredes, 2012)

El ángulo  $\theta$ : es de gran importancia en este tipo de colectores puesto que es un factor multiplicativo de la radiación directa, dando como resultado la energía por unidad de superficie sobre el CCP (Paredes, 2012):

$$I_{ef} = I_o \cdot \cos\theta \quad 4)$$

Según la orientación y el tipo de seguimiento, se tiene diversos valores de  $\theta$ , como, por ejemplo (Paredes, 2012):

- Giro colector sobre eje horizontal Este-Oeste, con un ajuste diario: los vectores ( $\bar{n}$ ) y ( $\bar{s}$ ) tienen la misma dirección al mediodía de cada día.

$$\cos\theta = \text{Sen}\delta \cdot \text{Sen}\lambda + \text{Cos}\delta \cdot \text{Cos}\lambda \cdot \text{Cos}\tau \quad 5)$$

- Giro colector sobre eje horizontal Este-Oeste, con ajuste continuo de la altura de Sol:  $\bar{n}$  y  $\bar{s}$  forman un plano perpendicular a la superficie de abertura en todo momento.

$$\cos\theta = \sqrt{1 - \text{Cos}^2\delta \cdot \text{Sen}^2\tau} \quad 6)$$

- Giro colector sobre eje horizontal Norte-Sur con ajuste continuo.

$$\cos\theta = \sqrt{(\text{Sen}\lambda \cdot \text{Sen}\delta + \text{Cos}\lambda \cdot \text{Cos}\delta \cdot \text{Cos}\tau)^2 + \text{Cos}^2\delta \cdot \text{Sen}^2\tau} \quad 7)$$

- Giro sobre dos ejes perpendiculares, con ajuste continuo del seguimiento del sol de forma que siempre se cumpla que  $\bar{n} = \bar{s}$ . Por lo que  $I_{ef} = I_o$  y los rayos solares

inciden en todo momento normalmente al plano de abertura, paralelos al plano de simetría del colector.

$$\mathbf{Cos\theta = 1} \quad \mathbf{8)}$$

El valor que realmente es interesante conocer, puesto que es el que se utilizará finalmente, es el de  $I_{ef}$  (radiación efectiva en  $w/m^2$ ).

$$\mathbf{I_{ef} = I_o \cdot Cos\theta \cdot n_o} \quad \mathbf{9)}$$

$$\mathbf{n_o = R_{sr} \cdot t_{ca} \cdot \alpha \cdot d \cdot \gamma} \quad \mathbf{10)}$$

Donde  $n_o$  = rendimiento óptico,

$R_{sr}$  = reflectividad superficie reflectora  $t_{ca}$  = trasmisividad del cristal absorbedor ,

$\alpha$  = Absortividad del tubo absorbedor  $d$  = Reflectancia espectral  $f$  = Error óptico de reflexión

$\gamma$  = **Factor de interceptación**

## 2.2.6 Diseño del colector cilíndrico parabólico (CCP)

### 2.2.6.1 Lado recto y puntos máximos

La base reflectora es una parábola y para su diseño se debe calcular los parámetros del lado recto y los puntos máximos en X e Y de la parábola (figura 6) que va a formar, por lo que se realizan cálculos en función de diferentes distancias focales. Para realizar el cálculo del lado recto “ $Lr$ ”, se utiliza la fórmula del arco de una curva (figura 6), y con esta conocer la longitud de la misma.

Figura 6 Representación de la parábola

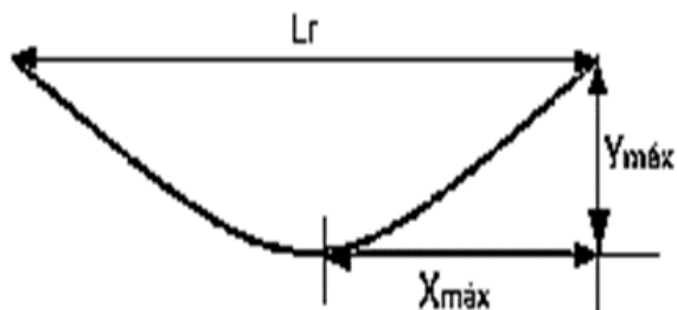
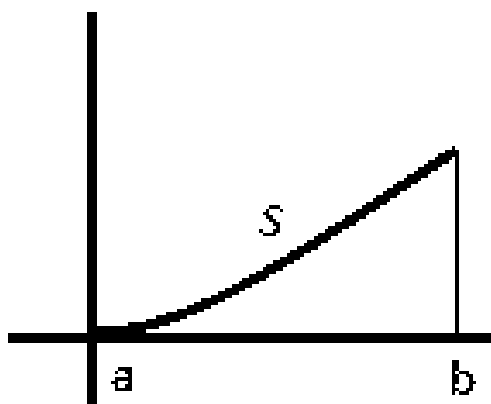


Figura 7 Representación de la curva

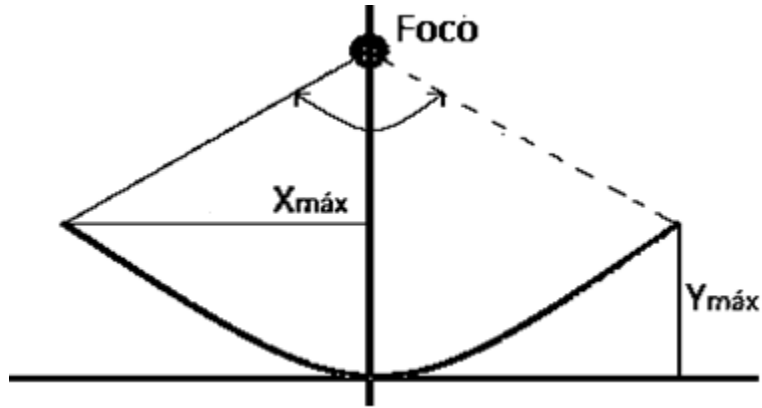


$$S = \int_a^b \sqrt{1 + f'(x)} dx \quad (11)$$

En la ecuación anterior se debe conocer la longitud de la curva ( $S$ );  $f'(x)$  es la derivada de la ecuación de la parábola. El límite  $a = 0$ , y el límite  $b$  es el punto a calcular, por lo que, operando, sustituyendo y despejando  $b$  se puede conocer el valor del punto máximo en  $X$  ( $X_{máx}$ ). Para obtener el punto máximo en  $Y$  ( $Y_{máx}$ ), se sustituye el valor de  $X_{máx}$  en la ecuación general de la parábola. (Tutorials Alternative Energy, 2018).

### 2.2.6.2 Cálculo del ángulo de abertura $\beta$ y de la distancia $l$

Figura 8 Ángulo de abertura  $\beta$  y de la distancia  $l$



Fuente: autores

Ya que se forma un triángulo rectángulo entre la distancia  $l$  con  $X_{m\acute{a}x}$ , se puede obtener el valor de  $\beta$  mediante la siguiente expresión:

$$\tan \frac{\beta}{2} = \frac{X_{max}}{F - Y_{max}} \quad (12)$$

Con el mismo principio de triángulo rectángulo se obtiene el valor de  $l$ .

$$l = \sqrt{X_{max}^2 + (F - Y_{max})^2} \quad (13)$$

### 2.2.6.3 Cálculo del diámetro del tubo receptor

El valor del diámetro mínimo que debe tener el tubo receptor depende especialmente de la distancia focal a través del valor de  $l$ , se obtiene mediante de la siguiente ecuación (Paredes C., 2012)

$$\phi_{min} = \frac{2 \cdot l \cdot \tan 16^\circ}{\cos \frac{\beta}{2}} \quad 14)$$

#### 2.2.6.4 Parámetros básicos de un CCP

- Razón de concentración geométrica [C] (Paredes C. , 2012).

$$C = \frac{A_a}{2 \cdot \pi \cdot r_{tr} \cdot L} \quad 15)$$

Siendo

$A_a$  = área de apertura;

$L$  = longitud del colector;

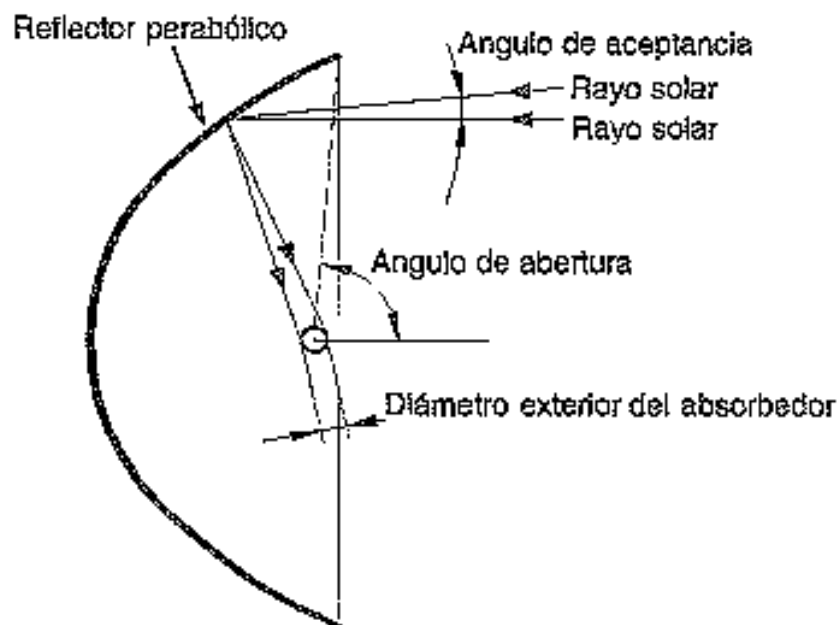
$r_{tr}$  = radio del tubo receptor

- Angulo de aceptancia [ $\phi$ ].

El ángulo de aceptancia es el máximo ángulo que pueden formar dos rayos en un plano transversal a la apertura del colector, de forma que ambos rayos reflejados intercepten al tubo receptor en su reflexión.

Teóricamente, el valor de la razón de concentración está en torno a 220, pero en la práctica se encuentra alrededor de 20. Por otro lado, el ángulo de aceptancia de los CCP's actuales es inferior a  $1^\circ$ , lo que se toma como límite para el error máximo que se puede cometer en el sistema de seguimiento solar. Y en cuanto a la temperatura, la temperatura ideal de trabajo se encuentra dentro del rango 150-400 °C. (Paredes, 2012)

Figura 9 Angulo de aceptación de un CCP



Fuente: (Carta Gonzales & Calero Pérez, 2013)

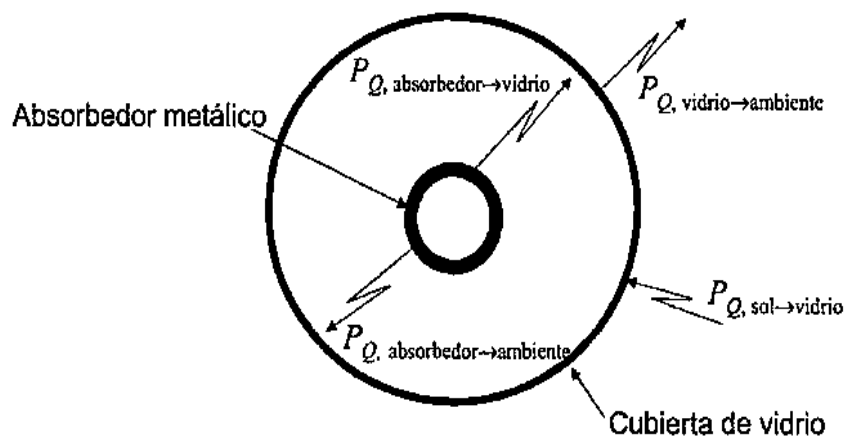
### 2.2.7 Pérdidas en un CCP

Cuando la radiación solar alcanza la superficie de un colector parabólico, se pierde una cantidad importante de ella debido a diferentes factores. El total de las pérdidas se puede dividir en tres grupos, que de mayor a menor importancia se ordenan según: pérdidas ópticas, térmicas y geométricas. (Hrushikesh Bhujangrao, 2016)

#### 2.2.7.1 Las pérdidas ópticas

Debidas a que la superficie reflexiva del concentrador no es un reflector perfecto, el vidrio del tubo absorbedor no es totalmente transparente, ni la superficie selectiva del tubo metálico es un absorbedor total provoca que, de la totalidad de radiación solar directa que incide sobre la superficie del concentrador parabólico, llegue solo una parte al fluido que circula por el tubo receptor.

Figura 10 Pérdidas ópticas de un CCP

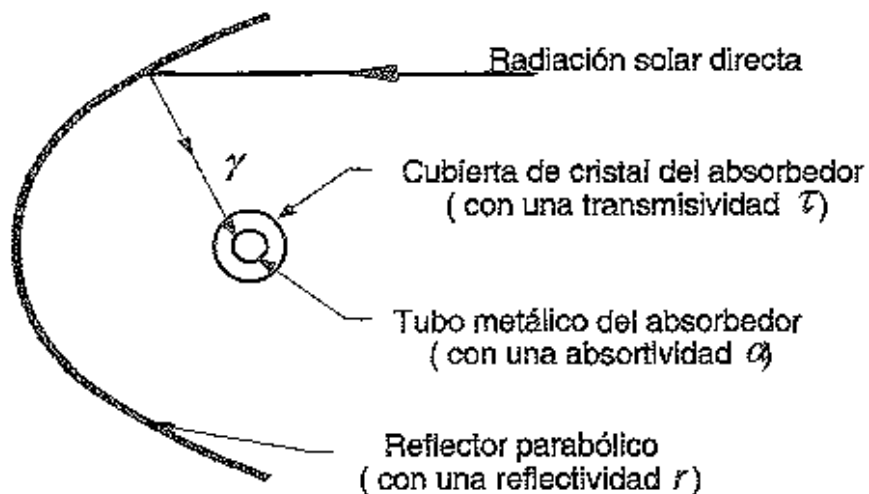


Fuente: (Carta Gonzales & Calero Pérez, 2013)

El rendimiento óptico del sistema de concentración, en función del tipo de superficie reflexiva y absorbidora es:

$$n_o = R_{sr} \cdot t_{ca} \cdot \alpha \cdot d \cdot \gamma \quad 16)$$

Figura 11 Pérdidas en el tubo absorbedor de un CCP



Fuente (Zarza, 2003)



### 2.2.7.2 Pérdidas geométricas

Debido a una disminución del área efectiva de captación de los colectores estas pérdidas se dividen en 2 grupos:

- Pérdidas debidas a la posición relativa de los colectores entre sí.
- Pérdidas inherentes a cada colector.

Por lo tanto, la superficie del colector se ve mermada por esto, y el valor de superficie pérdida define según las ecuaciones, (Paredes C. , 2012)

$$Se = Lr \cdot Le = Lr \cdot l \cdot \tan\theta \quad 17)$$

$$l = F + \left( F \cdot \frac{Lr^2}{48} \cdot F^2 \right) \quad 18)$$

donde:

*Se = Area perdida* *Lr = lado recto de la parabola* *Le = longitud efectiva del colector*

*F = distancia focal* *l = distancia media entre el foco y un punto en la superficie de la parabola*

*θ = angulo cenital solar*

### 2.2.7.3 Pérdidas térmicas

Especialmente se hallan relacionadas a dos elementos del sistema, el tubo absorbedor y las tuberías de fluido térmico. Las pérdidas asociadas están establecidas por pérdidas por conducción, por convección y por radiación de los diferentes medios que conforman el conjunto del tubo absorbedor, es decir, por el tubo metálico, la cubierta de cristal, y la atmosfera. (Ver figura 11). Si

bien cada una de las pérdidas asociadas se puede computar de forma independiente según las ecuaciones de transferencia de calor, en la práctica las pérdidas térmicas totales  $QL$  se engloban en un único coeficiente global. (Paredes C. , 2012)

Las perdidas térmicas totales es la suma de las perdidas térmicas del tubo absorbedor por conducción, convección y radiación.

$$Q_L = U_L \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot (T_{abs} - T_{amb}) \quad 19)$$

**Donde:**

$T_{abs}$  = *Temperatura media del tubo absorbente de cobre*  $T_{amb}$  = *temperatura ambiente*

$D$  = *diametro exterior del tubo de cobre*  $U_L$  = *coeficiente de perdidas*

$L$  = *longitud del tubo de cobre*

### 2.2.8 Rendimiento de un CCP

Debido a las pérdidas que existen en un CCP (sean ópticas, geométricas y térmicas) la energía térmica que proporciona un CCP se reduce a la energía que produce en condiciones ideales, (Soeprijanto & Al, 2018)

Se definen tres rendimientos diferentes y un parámetro para un CCP:

- Rendimiento óptico con un ángulo de incidencia de  $0^\circ$  ( $n_o \cdot 0^\circ$ ): Se toma en consideración todas las pérdidas ópticas que se dan en el CCP el cual tiene un ángulo de incidencia de  $0^\circ$ .
- Rendimiento térmico  $n_t$ : Se toma en cuenta todas las pérdidas térmicas que sufre el CCP.
- Modificador por ángulo de incidencia: Si se tiene un ángulo de incidencia diferente a cero

se toma en cuenta las pérdidas ópticas y geométricas que tienen lugar en el CCP y que no se consideran en  $n_o \cdot 0^\circ$ , (Paredes C. , 2012)

La energía solar incidente que existe sobre un CCP se puede hallar mediante la siguiente ecuación, (Paredes C. , 2012)

$$Q_{sol} = A_a \cdot I_{ef} \cdot \cos \theta \quad 20)$$

Donde:

$$Q_{sol} = \text{Energía solar incidente sobre el colector} \quad A_a = \text{área de apertura} \quad I_{ef} \\ = \text{radiación efectiva} \\ \theta = \text{ángulo cenital}$$

#### 2.2.8.1 La energía térmica útil suministrada por el colector

Viene dada, en términos de incremento entálpico que experimenta el fluido de trabajo en el colector, por (Paredes C. , 2012)

$$Q_{util} = \dot{Q}_m \cdot (h_{sal} - h_{ent}) \quad 21)$$

Donde:

$$Q_{util} = \text{Energía térmica útil suministrada por el colector} \quad \dot{Q}_m = \text{caudal masico del agua} \\ h_{sal} = \text{entalpía del agua a la salida del colector} \quad h_{ent} \\ = \text{entalpía del agua a la entrada del colector}$$

El rendimiento global del colector viene dado como el cociente entre la energía térmica útil suministrada por el colector y la energía solar incidente sobre el colector:

$$n = \frac{Q_{util}}{Q_{sol}} \quad 22)$$

### 2.3 Glosario

**Albedo:** Relación entre la intensidad de energía que refleja una superficie y la intensidad de energía que incide sobre ella.

**Cuerpo Negro:** Cuerpo que absorbe completamente las radiaciones que inciden sobre él.

**Intercambiador térmico:** es un radiador diseñado para transferir calor entre dos fluidos, o entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento

**Entalpía:** Magnitud termodinámica de un cuerpo, igual a la suma de su energía interna más el producto de su volumen por la presión exterior.

**Energía Renovable:** Energía cuyas fuentes se presentan en la naturaleza de modo continuo y prácticamente inagotable, ejemplo; la hidráulica, la solar o la eólica.

**Energía Solar:** Energía obtenida a partir de la radiación del sol y utilizada para usos térmicos mediante colectores o para generar electricidad con paneles fotovoltaicos.

**Equinoccio:** momentos del año en los que el Sol está situado en el plano del ecuador celeste. Ese día y para un observador en el ecuador terrestre, el Sol alcanza el cenit (el punto más alto en el cielo con relación al observador, que se encuentra justo sobre su cabeza, vale decir, a 90°). El paralelo de declinación del Sol y el ecuador celeste entonces coinciden.

**Latitud:** Distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado de la Tierra, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra.

**Líneas de solsticio:** Línea perpendicular a la línea de los equinoccios y contenida en el plano

de la eclíptica.

**Líneas de equinoccio:** Intersección entre el ecuador celeste y la línea eclíptica.

**Solsticio:** momentos del año en los que el Sol alcanza su mayor o menor altura aparente en el cielo, y la duración del día o de la noche son las máximas del año, respectivamente. Astronómicamente, los solsticios son los momentos en los que el Sol alcanza la máxima declinación norte ( $+23^{\circ} 27'$ ) o sur ( $-23^{\circ} 27'$ ) con respecto al ecuador terrestre.

**Meridiano:** Círculo máximo que pasa por los polos geográficos de la Tierra.

## 2.4 Marco legal

### 2.4.1 Constitución política de Colombia 1991.

**Artículo 27.** El Estado garantiza las libertades de enseñanza, aprendizaje, investigación y cátedra.

**Artículo 70.** El Estado tiene el deber de promover y fomentar el acceso a la cultura de todos los colombianos en igualdad de oportunidades, por medio de la educación permanente y la enseñanza científica, técnica, artística y profesional en todas las etapas del proceso de creación de la identidad nacional.

La cultura en sus diversas manifestaciones es fundamento de la nacionalidad. El estado reconoce la igualdad y dignidad de todas las que conviven en el país. El Estado promoverá la investigación, la ciencia, el desarrollo y la difusión de los valores culturales de la Nación

**Artículo 71.** La búsqueda del conocimiento y la expresión artística son libres. Los planes de

desarrollo económico y social incluirán el fomento a las ciencias y, en general, a la cultura. El Estado creará incentivos para personas e instituciones que desarrollen y fomenten la ciencia y la tecnología y las demás manifestaciones culturales y ofrecerá estímulos especiales a personas e instituciones que ejerzan estas actividades.

**Artículo 78.** La ley regulará el control de calidad de bienes y servicios ofrecidos y prestados a la comunidad, así como la información que debe suministrarse al público en su comercialización.

Serán responsables, de acuerdo con la ley, quienes en la producción y en la comercialización de bienes y servicios, atenten contra la salud, la seguridad y el adecuado aprovisionamiento a consumidores y usuarios.

El Estado garantizará la participación de las organizaciones de consumidores y usuarios en el estudio de las disposiciones que les conciernen. Para gozar de este derecho las organizaciones deben ser representativas y observar procedimientos democráticos internos.

#### **2.4.2 Marco regulatorio y normativo vigente para calentadores solares de agua**

El marco regulatorio y normativo vigente de los Calentadores Solares de Agua se compone por NORMAS VOLUNTARIAS de calidad en los sistemas e instalaciones.

- Ley 1665 del 2013. Por medio de la cual se aprueba el “Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena)”, hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009.
- Ley 1715 del 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables

no convencionales al Sistema Energético Nacional.

- DECRETO 2143 DE 2015. Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, Decreto 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo 111 de la Ley 1715 de 2014.
- Resolución 1283 de 2016. Por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables - FNCR y gestión eficiente de la energía para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11, 12, y 14 de la ley 1715 de 2014 y se adoptan otras determinaciones.
- Resolución 186 del 2012. Por la cual se adoptan Metas Ambientales, de que trata el literal j) del artículo 6° del Decreto 2532 de 2001 y el literal e) del artículo 4° del Decreto 3172 de 2003.
- Resolución 45 de 2016. Por la cual se establecen los procedimientos y requisitos para emitir la certificación y avalar los Proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), con miras a obtener el beneficio de la exclusión del IVA y la exención de gravamen arancelario de que tratan los artículos 12 y 13 de la Ley 1715 de 2014, y se toman otras determinaciones.
- DTESTV-2011. Dictamen Técnico de Energía Solar Térmica en Vivienda. “Especificaciones para los Sistemas de Calentamiento de Agua cuya Fuente de Energía sea la Radiación Solar y como respaldo un Calentador de Agua cuya Fuente de Energía sea el Gas LP o el Gas Natural, la Energía Eléctrica o cualquier otra Fuente de Energía”.

### **3. Metodología**

A continuación, se presenta el tipo de estudio y las diferentes fases que abarcará el diseño de investigación para su realización.

#### **3.1 Tipo de estudio**

Proyecto de Investigación - Sistematización del conocimiento

#### **3.2 Método De Investigación**

Realizamos una investigación aplicada para generar conocimiento en el diseño de un calentador solar con fines investigativos para ingeniería mecánica a mediano plazo. De esta manera, se genera riqueza por la diversificación y progreso en el diseño de un calentador solar con fines investigativos para ingeniería mecánica. Así, esta investigación aplicada impacta indirectamente a la comunidad y en la creación de plazas de trabajo.

#### **3.3 Resultados esperados**

La energía solar para aplicaciones en diferentes campos se está desarrollando en Colombia, por lo que es muy importante que desde países con años de experiencia en el campo de la energía solar se apoye y se ayude al desarrollo de nuevos proyectos.



El presente proyecto está realizado a pequeña escala, sin embargo, se puede hacer en mayor tamaño para un uso más intensivo de calentadores.

El diseño del colector será minuciosamente estudiado con el fin de obtener un producto eficiente. La idea en esencia, es concentrar todos los rayos de luz solar en un punto en específico con el fin de energizarlo, esta pieza es la más importante y su funcionamiento debe ser adecuado.

## 4 Diseño del calentador solar

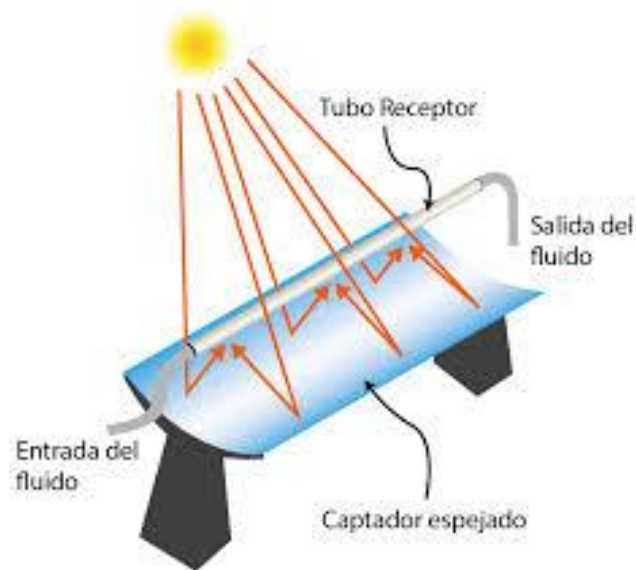
En el presente capítulo se presenta todas las actividades que fueron para cumplir con los objetivos específicos planteados en el presente trabajo.

### 4.1 Selección del tipo de colector.

Se seleccionó para el diseño del prototipo un colector tipo cilíndrico parabólico ya que su factor de concentración es superior al de los demás colectores visualizados en la FIGURA 3. Con este colector podemos de manera directa aprovechar la irradiación haciéndole seguimiento y así alcanzar una mejor concentración de temperatura.

### 4.2 Funcionamiento del colector

Figura 12 Esquema del calentador solar



Fuente: (Panaroni et al, 2017)

La figura 12 muestra el esquema del sistema de calentamiento en función a la mejor alternativa seleccionada.

- El agua ingresa al sistema a una temperatura de 18 – 22 °C (Temperatura del agua en la ciudad de Cúcuta).
- Una vez allí el agua se calienta debido a los rayos solares concentrados en la línea focal por medio del reflector.
- Se colocó un sensor de temperatura al final del tubo absorbedor antes de la electroválvula, cuya función es detectar la temperatura del agua dentro del tubo.
- Una vez que llegue a la temperatura de 60°C, un controlador abre la electroválvula ubicada al final del tubo para su posterior almacenamiento en el termo-tanque aislado.
- El sistema de seguimiento funciona desde las 7:00 am hasta las 5:00 pm, ya que durante este tiempo se obtiene el mayor índice de radiación. Al finalizar el seguimiento por la tarde, el calentador regresa a la posición inicial para comenzar otra vez el movimiento el día siguiente.

### **4.3 Parámetros de diseño**

Al iniciar el diseño de calentador solar cilíndrico parabólico se determinaron las condiciones del entorno en el lugar de operación, así como los requisitos mínimos de concentración de radiación solar.

Para llevar a cabo el diseño del colector se plantearon las siguientes especificaciones y condiciones de operación.

### 4.3.1 Especificaciones

Tabla 2 Necesidades del calentador

Elemento	Especificaciones
Tubo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deberá poseer la capacidad de absorber el calor proveniente de la radiación solar.</li> <li>• Selección de materiales o algún tipo de tratamiento.</li> <li>• Cuál es la mejor opción para evitar las pérdidas de calor por convección</li> </ul>
Colector	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debe tener una superficie que refleje al máximo los rayos provenientes del sol.</li> <li>• utilizar materiales con alta eficiencia de reflectividad.</li> </ul>
Fluido (agua)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de ingreso 20 °C</li> <li>• Temperatura de salida 60 °C</li> </ul>
Sistema de Seguimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hora de inicio 8:00 am</li> <li>• Hora de finalización 5:00 pm</li> </ul>

Fuente: Autores del Proyecto

### 4.3.2 Condiciones del entorno

Tabla 3 Parámetros

Parámetro	Valor	Indicador limite
Velocidad del viento (operacional)	1.4 m/s	Máximo
Velocidad del viento (supervivencia)	10 m/s	Máximo
Temperatura ambiente	26-28°C	Rango

Fuente: Autores del Proyecto

#### 4.4 Estudio del recurso solar para Cúcuta-Norte de Santander

Mediante el software SAM (diversas fuentes de datos de recursos solares a nivel internacional), para la ubicación geográfica de la universidad Francisco de paula Santander sede Cúcuta, como se muestra en las figuras 12 y 14, se obtuvo el valor de la radiación directa promedio.

Figura 13 Datos de la ubicación en SAM para analizar el recurso solar desde 1998-2018.

Weather file	C:\Users\lmgd1\SAM Downloaded Weather Files\7.8981533_-72.4872177_7.898153_-72.487218_psmv3_60_tmy.csv		View data...
<b>-Header Data from Weather File</b>			
Station ID	1293055	Latitude	7.89 DD
Data Source	NSRDB	Longitude	-72.5 DD
Elevation	303 m	Time zone	GMT -5
		For NSRDB data, the latitude and longitude shown here from the weather file header are the coordinates of the NSRDB grid cell and may be different from the values in the file name, which are the coordinates of the requested location.	
		CSP models use a different time convention than NREL NSRDB data. See Help for details.	
<b>-Annual Values Calculated from Weather File Data</b>			
Global horizontal	5.29 kWh/m <sup>2</sup> /day	Average temperature	26.9 °C -Optional Data
Direct normal (beam)	4.03 kWh/m <sup>2</sup> /day	Average wind speed	1.4 m/s
Diffuse horizontal	2.48 kWh/m <sup>2</sup> /day	*NaN indicates missing data.	

Fuente: Autores del Proyecto

Figura 14 Datos promedio de radiación en la UFPS desde 1998 a 2018(P50/P90) mediante SAM

	Mean	Min	Max	Sum	Std Dev	Avg Daily Min	Avg Daily Max
▼ All							
▼ 7.8981533_-72.4872177_7.898...-72.487218_psmv3_60_tmy.csv							
Global irradiance - GHI (W/m2)	220.2505	0	1041	1929394	302.5422	0	835.6329
Beam irradiance - DNI (W/m2)	168.0088	0	989	1471757	274.5005	0	692.7233
Diffuse irradiance - DHI (W/m2)	103.2223	0	525	904227	147.2408	0	422.0027
Plane of array irradiance - POA (W/m2)	nan	2000000000	-2000000000	nan	nan	2000000000	-2000000000
Wind speed (m/s)	1.4192	0	4.8	12432.5	0.9595	0.5381	2.7329
Wind direction (deg)	125.0887	0	360	1095777	58.3799	77.9096	186.9781
Dry bulb temp (C)	26.8735	19	38	235412	3.9176	22.4986	33.0329
Wet bulb temp (C)	nan	2000000000	-2000000000	nan	nan	2000000000	-2000000000
Dew point temp (C)	18.83	13	24	164951	1.7801	17.0356	20.9014
Relative humidity (%)	nan	2000000000	-2000000000	nan	nan	2000000000	-2000000000
Pressure (millibar)	966.0034	960	970	8462190	4.8983	960.4658	969.863
Snow depth (cm)	nan	2000000000	-2000000000	nan	nan	2000000000	-2000000000
Albedo (fraction)	0.1605	0.15	0.17	1405.92	0.0034	0.1604	0.1606

Fuente: Autores del Proyecto

Figura 15 Datos de la ubicación en SAM para analizar el recurso solar del 2018.

Weather file

**-Header Data from Weather File-**

Station ID  Latitude  DD  
 Data Source  Longitude  DD  
 Elevation  m Time zone

For NSRDB data, the latitude and longitude shown here from the weather file header are the coordinates of the NSRDB grid cell and may be different from the values in the file name, which are the coordinates of the requested location.

CSP models use a different time convention than NREL NSRDB data. See Help for details.

**-Annual Values Calculated from Weather File Data-**

Global horizontal  kWh/m<sup>2</sup>/day Average temperature  °C **-Optional Data-**  
 Direct normal (beam)  kWh/m<sup>2</sup>/day Average wind speed  m/s  
 Diffuse horizontal  kWh/m<sup>2</sup>/day

\*NaN indicates missing data.

Fuente: Autores del Proyecto

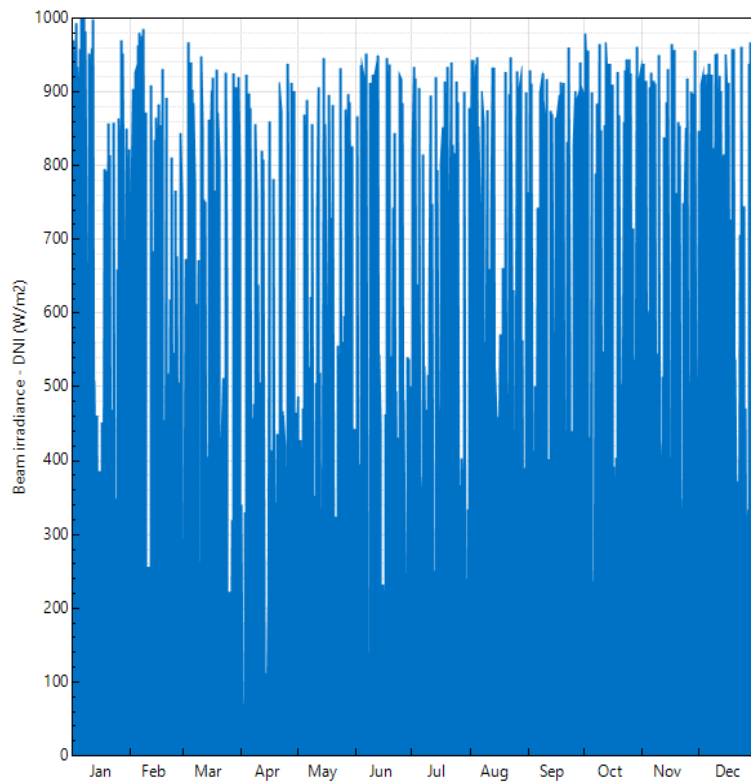
Figura 16 Datos promedio de radiación en la UFPS del 2018 mediante SAM

	Mean	Min	Max	Sum	Std Dev	Avg Daily M...	Avg Daily Max
▼ All							
▼ 7.8981533_-72.4872177_7.898...72.487218_psmv3_60_2018.csv							
Global irradiance - GHI (W/m2)	204.8469	0	1029	1794459	283.2375	0	766.1836
Beam irradiance - DNI (W/m2)	140.9775	0	967	1234963	233.8581	0	582.5205
Diffuse irradiance - DHI (W/m2)	106.4213	0	517	932251	146.5134	0	411.2795
Plane of array irradiance -POA (W/m2)	nan	2000000000	-2000000000	nan	nan	2000000000	-2000000000
Wind speed (m/s)	1.5357	0.1	4.9	13452.3	1.006	0.5997	2.8575
Wind direction (deg)	128.8701	0	359	1128902	49.1645	88.937	180.5507
Dry bulb temp (C)	27.5968	18.4	38.2	241747.5999	3.9283	23.0334	33.6153
Wet bulb temp (C)	21.4781	16.3	24.8734	188148.0296	1.3021	20.045	22.7088
Dew point temp (C)	18.6987	10.3	23.7	163800.8999	2.1401	16.9523	20.5425
Relative humidity (%)	61.2559	21.01	91.41	536602.0198	17.4062	38.6486	79.356
Pressure (millibar)	967.843	962	972	8478305	1.5775	965.6904	969.5945
Snow depth (cm)	nan	2000000000	-2000000000	nan	nan	2000000000	-2000000000
Albedo (fraction)	0.166	0.15	0.17	1454.16	0.0063	0.1659	0.1661

Fuente: Autores del Proyecto

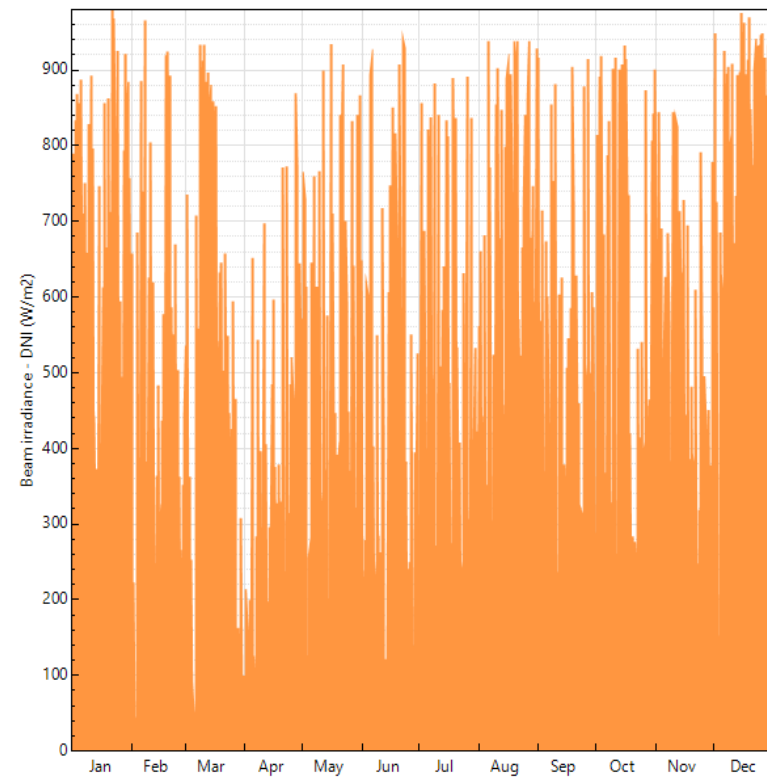
El estudio solar fue realizado para el año 2018 debido a que es el año anterior más reciente al iniciar nuestro trabajo y que cuenta con todos los datos de recurso solar respecto a los meses por el software SAM los en donde se tiene un valor de radiación directa promedio máximo por mes en la UFPS. (Ver tabla 5).

Figura 17 Radiación directa desde 1998 hasta 2018 en la UFPS



Fuente: Autores del Proyecto

Figura 18 Radiación directa promedio del año 2018 para la UFPS



Fuente: Autores del Proyecto



Tabla 4 Radiación directa promedio por mes del año 2018.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
DIA 1	281	655	530	15	565	660	300	560	905	280	900	780
DIA 2	771	210	735	210	740	238	850	660	562	818	200	940
DIA 3	835	60	360	100	610	280	530	440	710	890	840	720
DIA 4	865	682	250	190	120	623	681	680	122	920	690	150
DIA 5	860	381	95	640	280	241	220	350	670	680	460	680
DIA 6	881	882	50	120	620	918	820	920	600	362	625	622
DIA 7	710	740	705	280	760	400	838	770	330	783	395	918
DIA 8	745	950	560	540	410	240	500	123	850	830	680	897
DIA 9	660	380	930	395	610	542	880	520	750	325	290	898
DIA 10	830	620	899	295	760	281	270	850	880	900	840	820
DIA 11	890	803	920	695	340	260	840	458	230	918	585	898
DIA 12	795	620	882	402	900	715	505	799	600	260	845	670
DIA 13	440	70	895	195	220	140	580	920	620	900	460	730
DIA 14	370	361	870	290	578	150	640	690	220	723	710	890
DIA 15	745	480	685	481	142	602	830	890	378	905	630	891
DIA 16	285	320	860	590	920	740	810	740	502	930	722	981
DIA 17	610	430	840	370	705	842	482	920	540	910	440	945
DIA 18	850	570	540	322	443	503	275	562	580	735	690	898
DIA 19	660	910	630	378	385	807	885	520	900	420	380	899
DIA 20	860	912	641	322	405	618	836	660	525	280	480	960
DIA 21	710	878	500	770	840	905	530	840	622	22	400	840
DIA 22	990	583	650	238	905	570	402	593	460	278	610	760
DIA 23	905	550	542	765	382	940	260	940	328	525	245	922
DIA 24	741	662	442	310	700	380	625	670	210	417	320	924
DIA 25	915	500	420	481	453	240	398	742	880	540	790	933
DIA 26	590	360	582	520	363	250	890	590	510	418	440	945
DIA 27	495	261	461	220	830	546	305	937	918	870	490	940
DIA 28	790	350	20	863	640	80	840	670	500	458	420	920
DIA 29	920		160	490	320	390	122	742	605	462	450	863
DIA 30	880		290	640	840	510	530	590	580	802	378	930
DIA 31	758		100		862		420	923		840		940
RAD DIREC P	730,226	542,143	549,806	404,233	569,290	487,033	577,226	686,097	569,567	625,839	546,833	842,065

Fuente: Autores del Proyecto

### 4.3.1 Cálculo de la radiación directa (Paredes C. , 2012)

El proyecto necesitó únicamente la componente directa de la radiación, pues los colectores cilíndricos parabólicos sólo son capaces de captar este tipo de radiación, por tanto, las otras dos se descartan. Con el objetivo de simplificar cálculos, se han establecido una serie de modelos estadísticos que permiten obtener varios valores de radiación directa  $I_o$ . Este valor fue calculado mediante la siguiente expresión:

$$I_{o(media)} = I_{o(prom.mes)} * e^{\frac{-1}{3,8\cos(\tau-1,6)}}$$

Donde:

$I_o$  promedio del mes fue extraído de la tabla 5 y los demás valores fueron calculados mediante las ecuaciones del capítulo 2.

Los resultados se evidencian en las siguientes tablas:

Tabla 5 Declinación media mensual del lugar de instalación

Declinación[ $\delta$ ]				
$\delta = 23,45^\circ \sin\left(\frac{360 * (284 + n)}{365}\right)$				
Mes	Nº del día(n)	$\delta(^{\circ})$	$\delta(\text{rad})$	
Enero	15	-21,269	-0,371	
Febrero	45	-13,620	-0,237	
Marzo	75	-2,418	-0,042	
Abril	105	9,415	0,164	
Mayo	135	18,792	0,328	
Junio	165	23,268	0,406	
Julio	195	21,675	0,378	
Agosto	225	14,428	0,251	
Septiembre	255	3,419	0,054	
Octubre	285	-8,482	-0,148	
Noviembre	315	-18,171	-0,317	
Diciembre	345	-23,120	-0,403	

*Se calculó la declinación media de cada mes para los cálculos posteriores.*

Tabla 6 Angulo horario a lo largo del día

Angulo horario $\tau = 15^\circ(h_s - 12)$		
Hora	$\tau(^{\circ})$	$\tau(rad)$
7:00	-75	-1,309
8:00	-60	-1,047
9:00	-45	-0,785
10:00	-30	-0,524
11:00	-15	-0,262
12:00	0	0
13:00	15	0,262
14:00	30	0,524
15:00	45	0,785
16:00	60	1,047
17:00	75	1,309

Otro factor que se tuvo en cuenta en estos cálculos fue la orientación del calentador solar y el mecanismo que permitió hacer un seguimiento solar lo más preciso posible pues de ello depende la incidencia solar en el reflector

Para el encontrar el ángulo de incidencia solar se utilizó la siguiente expresión, (Paredes C. , 2012)

$$\cos\theta = \sqrt{(\text{Sen}\lambda \cdot \text{Sen}\delta + \text{Cos}\lambda \cdot \text{Cos}\delta \cdot \text{Cos}\tau)^2 + \text{Cos}^2\delta \cdot \text{Sen}^2\tau}$$

Ya que la orientación y el seguimiento seleccionado para este calentador son sobre el eje horizontal Norte-Sur con ajuste continuo .Este valor depende de la hora del día y afecta directamente la radiación que recibe el reflector.

En las siguientes tablas se evidencia el valor de la radiación media que puede captar el calentador según la orientación del mismo, el seguimiento y la hora del día.

Tabla 7 Radiación directa media y Angulo de incidencia solar de enero 2018

Enero					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	$I_o$ [ $W/m^2$ ]
7:00	7,898	-21,269	-75	23,107	234,585
8:00	7,898	-21,269	-60	25,046	419,920
9:00	7,898	-21,269	-45	26,735	497,875
10:00	7,898	-21,269	-30	28,048	536,134
11:00	7,898	-21,269	-15	28,882	554,880
12:00	7,898	-21,269	0	29,168	561,209
13:00	7,898	-21,269	15	28,882	557,148
14:00	7,898	-21,269	30	28,048	541,418
15:00	7,898	-21,269	45	26,735	508,347
16:00	7,898	-21,269	60	25,046	441,921
17:00	7,898	-21,269	75	23,107	290,678

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 8 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de febrero del 2018

Febrero					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	[ $W/m^2$ ]
7:00	7,898	-13,620	-75	15,534	174,163
8:00	7,898	-13,620	-60	17,459	311,762
9:00	7,898	-13,620	-45	19,128	369,638
10:00	7,898	-13,620	-30	20,420	398,043
11:00	7,898	-13,620	-15	21,238	411,960
12:00	7,898	-13,620	0	21,518	416,659
13:00	7,898	-13,620	15	21,238	413,644
14:00	7,898	-13,620	30	20,420	401,966
15:00	7,898	-13,620	45	19,128	377,413
16:00	7,898	-13,620	60	17,459	328,096
17:00	7,898	-13,620	75	15,534	215,809

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 9 Radiación directa media y ángulo de incidencia del marzo 2018

Marzo					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	$I_o[W/m^2]$
7:00	7,898	-2,418	-75	4,434	176,625
8:00	7,898	-2,418	-60	6,340	316,169
9:00	7,898	-2,418	-45	7,982	374,863
10:00	7,898	-2,418	-30	9,246	403,670
11:00	7,898	-2,418	-15	10,044	417,784
12:00	7,898	-2,418	0	10,316	422,549
13:00	7,898	-2,418	15	10,044	419,492
14:00	7,898	-2,418	30	9,246	407,648
15:00	7,898	-2,418	45	7,982	382,748
16:00	7,898	-2,418	60	6,340	332,734
17:00	7,898	-2,418	75	4,434	218,860

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 10 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de abril 2018

Abril					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	$I_o[W/m^2]$
7:00	7,898	9,415	-75	7,293	129,860
8:00	7,898	9,415	-60	5,408	232,456
9:00	7,898	9,415	-45	3,794	275,610
10:00	7,898	9,415	-30	2,558	296,789
11:00	7,898	9,415	-15	1,782	307,166
12:00	7,898	9,415	0	1,517	310,670
13:00	7,898	9,415	15	1,782	308,422
14:00	7,898	9,415	30	2,558	299,714
15:00	7,898	9,415	45	3,794	281,407
16:00	7,898	9,415	60	5,408	244,635
17:00	7,898	9,415	75	7,293	160,912

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 11 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de mayo 2018

Mayo					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	$I_o[W/m^2]$
7:00	7,898	18,792	-75	16,583	182,885
8:00	7,898	18,792	-60	14,716	327,373
9:00	7,898	18,792	-45	13,126	388,148
10:00	7,898	18,792	-30	11,912	417,975
11:00	7,898	18,792	-15	11,153	432,589
12:00	7,898	18,792	0	10,894	437,523
13:00	7,898	18,792	15	11,153	434,357
14:00	7,898	18,792	30	11,912	422,094
15:00	7,898	18,792	45	13,126	396,312
16:00	7,898	18,792	60	14,716	344,525
17:00	7,898	18,792	75	16,583	226,615

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 12 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de junio 2018

Junio					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	$I_o[W/m^2]$
7:00	7,898	23,268	-75	21,015	156,460
8:00	7,898	23,268	-60	19,157	280,071
9:00	7,898	23,268	-45	17,579	332,064
10:00	7,898	23,268	-30	16,377	357,581
11:00	7,898	23,268	-15	15,625	370,084
12:00	7,898	23,268	0	15,369	374,305
13:00	7,898	23,268	15	15,625	371,597
14:00	7,898	23,268	30	16,377	361,105
15:00	7,898	23,268	45	17,579	339,048
16:00	7,898	23,268	60	19,157	294,745
17:00	7,898	23,268	75	21,015	193,872

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 13 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de julio 2018

Julio					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	$I_o[W/m^2]$
7:00	7,898	21,675	-75	19,438	185,434
8:00	7,898	21,675	-60	17,577	331,937
9:00	7,898	21,675	-45	15,994	393,558
10:00	7,898	21,675	-30	14,788	423,801
11:00	7,898	21,675	-15	14,033	438,619
12:00	7,898	21,675	0	13,776	443,622
13:00	7,898	21,675	15	14,033	440,412
14:00	7,898	21,675	30	14,788	427,978
15:00	7,898	21,675	45	15,994	401,836
16:00	7,898	21,675	60	17,577	349,328
17:00	7,898	21,675	75	19,438	229,774

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 14 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de agosto 2018

Agosto					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	$I_o[W/m^2]$
7:00	7,898	14,428	-75	12,261	220,409
8:00	7,898	14,428	-60	10,385	394,543
9:00	7,898	14,428	-45	8,784	467,787
10:00	7,898	14,428	-30	7,560	503,734
11:00	7,898	14,428	-15	6,792	521,347
12:00	7,898	14,428	0	6,530	527,294
13:00	7,898	14,428	15	6,792	523,479
14:00	7,898	14,428	30	7,560	508,699
15:00	7,898	14,428	45	8,784	477,626
16:00	7,898	14,428	60	10,385	415,215
17:00	7,898	14,428	75	12,261	273,112

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 15 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de septiembre 2018

Septiembre					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	$I_o[W/m^2]$
7:00	7,898	3,419	-75	1,351	182,973
8:00	7,898	3,419	-60	0,545	327,532
9:00	7,898	3,419	-45	2,173	388,336
10:00	7,898	3,419	-30	3,424	418,178
11:00	7,898	3,419	-15	4,211	432,799
12:00	7,898	3,419	0	4,479	437,736
13:00	7,898	3,419	15	4,211	434,568
14:00	7,898	3,419	30	3,424	422,299
15:00	7,898	3,419	45	2,173	396,504
16:00	7,898	3,419	60	0,545	344,692
17:00	7,898	3,419	75	1,351	226,725

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 16 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de octubre 2018

Octubre					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	$I_o[W/m^2]$
7:00	7,898	-8,482	-75	10,444	201,051
8:00	7,898	-8,482	-60	12,360	359,892
9:00	7,898	-8,482	-45	14,017	426,703
10:00	7,898	-8,482	-30	15,296	459,493
11:00	7,898	-8,482	-15	16,104	475,559
12:00	7,898	-8,482	0	16,380	480,983
13:00	7,898	-8,482	15	16,104	477,503
14:00	7,898	-8,482	30	15,296	464,021
15:00	7,898	-8,482	45	14,017	435,678
16:00	7,898	-8,482	60	12,360	378,747
17:00	7,898	-8,482	75	10,444	249,125

Fuente: Autores del Proyecto



Tabla 17 Radiación directa media y Angulo de incidencia solar de noviembre 2018

Noviembre					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	$I_o$ [ $W/m^2$ ]
7:00	7,898	-18,171	-75	20,041	175,670
8:00	7,898	-18,171	-60	21,973	314,459
9:00	7,898	-18,171	-45	23,654	372,836
10:00	7,898	-18,171	-30	24,959	401,487
11:00	7,898	-18,171	-15	25,786	415,524
12:00	7,898	-18,171	0	26,069	420,264
13:00	7,898	-18,171	15	25,786	417,223
14:00	7,898	-18,171	30	24,959	405,444
15:00	7,898	-18,171	45	23,654	380,678
16:00	7,898	-18,171	60	21,973	330,935
17:00	7,898	-18,171	75	20,041	217,676

Fuente: Autores del Proyecto

Tabla 18 Radiación directa media y ángulo de incidencia solar de diciembre 2018

Diciembre					
Hora	Latitud[ $\lambda$ ]	Declinación[ $\delta$ ]	Horario[ $\tau$ ]	Incidencia ( $\theta$ )	$I_o$ [ $W/m^2$ ]
7:00	7,898	-23,120	-75	24,939	270,513
8:00	7,898	-23,120	-60	26,880	484,233
9:00	7,898	-23,120	-45	28,575	574,128
10:00	7,898	-23,120	-30	29,893	618,246
11:00	7,898	-23,120	-15	30,731	639,863
12:00	7,898	-23,120	0	31,019	647,162
13:00	7,898	-23,120	15	30,731	642,479
14:00	7,898	-23,120	30	29,893	624,339
15:00	7,898	-23,120	45	28,575	586,203
16:00	7,898	-23,120	60	26,880	509,604
17:00	7,898	-23,120	75	24,939	335,198

Fuente: Autores del Proyecto

## 4.5 Selección de los materiales

### 4.5.1 Reflector Solar

El reflector funciona dándole dirección a los rayos solares hacia el foco del colector cilíndrico parabólico para que así tenga una mejor eficiencia la irradiación que incide en el tubo del foco.

Tabla 19 Materiales posibles a utilizar en el reflector solar

<b>Alternativa</b>	<b>Descripción</b>
1. Acero inoxidable brillante	0.572 reflectividad 0.5 Absortividad
1. Espejo de vidrio	0.87 Reflectividad 0.2 Absortividad
2. Aluminio de alta reflectividad (rosado)	0.853 reflectividad 0.3 Absortividad

Fuente: (Echazu)

### 4.5.2 Tubo receptor

Es necesario que el material utilizado sea de buena absorción para poder darle temperaturas altas al fluido que se maneje, para que el tubo no se vea afectado por el ambiente exterior una solución dada fue la de un tubo exterior para ayudar a que el tubo interno no pierda su temperatura por agentes climáticos. El tubo absorbedor externo es de vidrio es de material borosilicato.

#### 4.5.2.1 *Tubo absorbedor interno*

Tabla 20 Materiales posibles a utilizar para el tubo interno

<b>Alternativa</b>	<b>Características</b>
1. Cobre pulido	<b>0.27 ± 0.03</b> Absortividad
2. Acero galvanizado	0.65 Absortividad
3. Aluminio acabado espejo	<b>0.100.24 ± 0.03</b> Absortividad

Fuente: Autores del Proyecto

#### 4.5.2.2 *Pintura de recubrimiento*

Esta pintura nos permite cubrir el sistema base del colector solar para evitar daños en su estructura.

Tabla 21 Pinturas de recubrimiento

<b>Alternativa</b>	<b>Características</b>
1. Pintura electroestática	Es un recubrimiento en polvo de gran resistencia y durabilidad, este fino material se adhiere a las superficies a pintar mediante el efecto de la electricidad estática, obteniendo un acabado uniforme y sellado hermético. Costo moderado.
2. Pintura epóxica	Está fabricada con componentes elaborados a base de una resina epóxica, la cual es resistente y de alta calidad, se destaca por su gran resistencia a sustancias corrosivas, como ácidos, álcalil y agua. Fácil de usar y versatilidad. Costo bajo.

### 4.5.3 Seguimiento Solar

Este sistema permite que el colector cilíndrico parabólico siga la irradiación directa y permita absorber mayor calor, esto hace que su rendimiento el mejor para obtener una temperatura alta en menos tiempo.

Tabla 22 Alternativas para el seguimiento solar

Alternativa	Características
1. Motor paso a paso	Mayor exactitud en la posición y repetición de los movimientos. Error de paso inferior al 5%. Perfecta respuesta en arranque y parada. Confiable y duradero, ya que no existe contacto de escobillas. Ángulo de rotación proporcional a los pulsos de entrada. Costo moderado.
2. Motorreductor	Consigue una adaptación perfecta tanto en la velocidad como en la potencia. Adquiere mayor eficacia en la transmisión de la potencia que suministra al motor. Proporciona más seguridad en la transmisión, reduciendo así los costos en el mantenimiento. Costo moderado
3. Actuador lineal eléctrico	Logra menor espacio y mayor rigidez en el montaje. Además de reducir tiempo para la instalación. Posicionamiento preciso Alta eficiencia Respuesta de movimiento rápido Costo moderado.

Fuente: Autores del Proyecto

#### 4.5.4 Controlador

Tabla 23 Alternativas para el controlador

Alternativa	Características
1. PLC	Se requieren habilidades altamente específicas solicitadas a los diseñadores de software para extraer el máximo potencial de los controladores. Costo alto.
2. Arduino	Software libre y programable • Costo bajo.

Fuente: Autores del Proyecto

Ahora, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Eficiencia. - El diseño y el análisis debe ser el más exacto posible para obtener un alto rendimiento del sistema.
- Costos. – Este criterio se toma como importante de acuerdo al costo de los equipos y materiales a utilizar. Lo ideal es utilizar los de costo moderado o bajo.
- Materiales. - Los materiales deben cumplir propiedades de absortividad, reflectividad, transmisividad, además deben tener durabilidad ya que el sistema va a estar expuesto a la intemperie.
- Sistema de seguimiento. - Es uno de los elementos más importantes en el sistema, la precisión del sistema de seguimiento ayudara a mejorar la eficiencia del colector.

Fueron seleccionados los siguientes materiales:

Tabla 24 Especificaciones del diseño del calentador en cuanto a sus elementos

<b>Elemento</b>	<b>Material seleccionado</b>
Reflector	Plancha de aluminio reflectante
Tubo interior	Cobre
Tubo exterior	Tubo de Vidrio borosilicato
Pintura	Pintura epoxica
Seguimiento	Motorreductor
Controlador	Arduino

Fuente: Autores del Proyecto

## 4.6 Dimensiones del calentador solar

### 4.6.1 Reflector solar

Para la base reflectora se utilizó una plancha de aluminio, cuyas dimensiones son 1.20x1.20 metros; el lado de 1.20 metros fue la curva de la parábola, con esto se procedió a realizar los cálculos pertinentes para determinar la distancia focal. Se tomó como vértice de la parábola la mitad del lado curvo, es decir la longitud de la curva ( $S$ ) es de 0,6 metros.

Se realizaron los cálculos para diferentes distancias focales mediante las ecuaciones de la 11 a la 15(capítulo 2) con el fin de establecer una geometría adecuada. Esos cálculos están contenidos en la tabla 25.

Tabla 25 Geometría seleccionada para el calentador solar

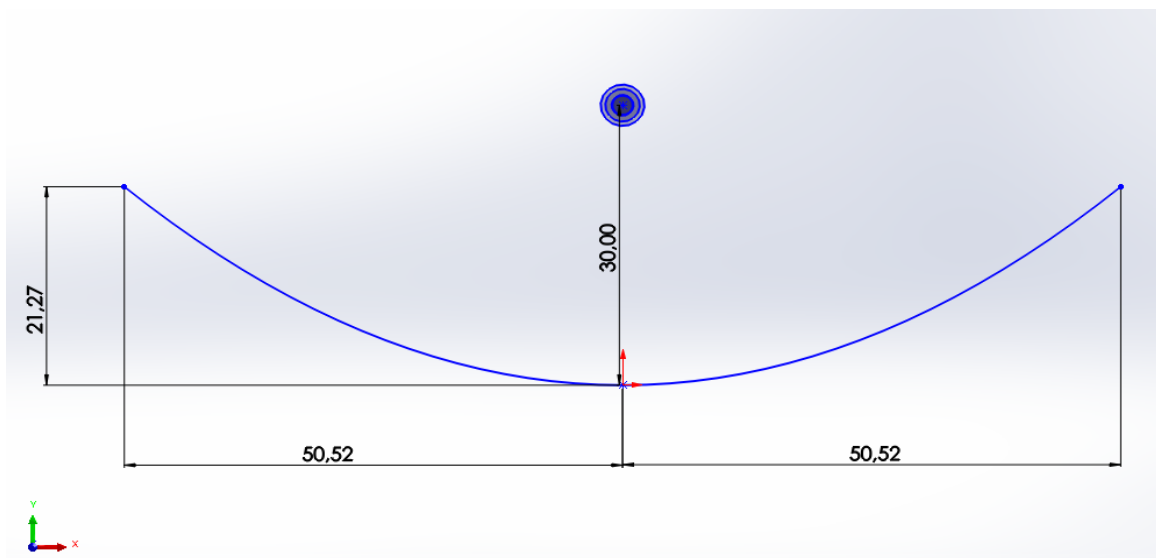
S(m)	L(m)	DISTANCIA FOCAL (cm)	X <sub>máx</sub> (m)	Y <sub>máx</sub> (m)	$\beta$	l	$\phi$ min(cm)	$\phi$ min(pulg)	RAZON DE CONCENTRACION
0,6	1,2	20	0,48	0,28	-161,08	0,48	1,69	0,67	22,59
		25	0,49	0,24	177,66	0,49	13,86	5,46	2,76
		30	0,51	0,21	159,98	0,51	1,69	0,67	22,58
		35	0,51	0,19	145,16	0,54	1,03	0,41	36,98
		45	0,53	0,16	122,63	0,61	0,72	0,28	52,82
		50	0,53	0,14	111,63	0,64	0,66	0,26	58,24

Fuente: Autores del Proyecto

Por ende, la base reflectora tiene las siguientes características:

- Una distancia focal de 30 centímetros ( $Y_{máx} = 0,21 \text{ m}$ ;  $X_{máx} = 0,51 \text{ m}$ ).
- Una la razón de concentración mínima de 22,58
- Diámetro mínimo de la tubería receptora de 0.67pulg

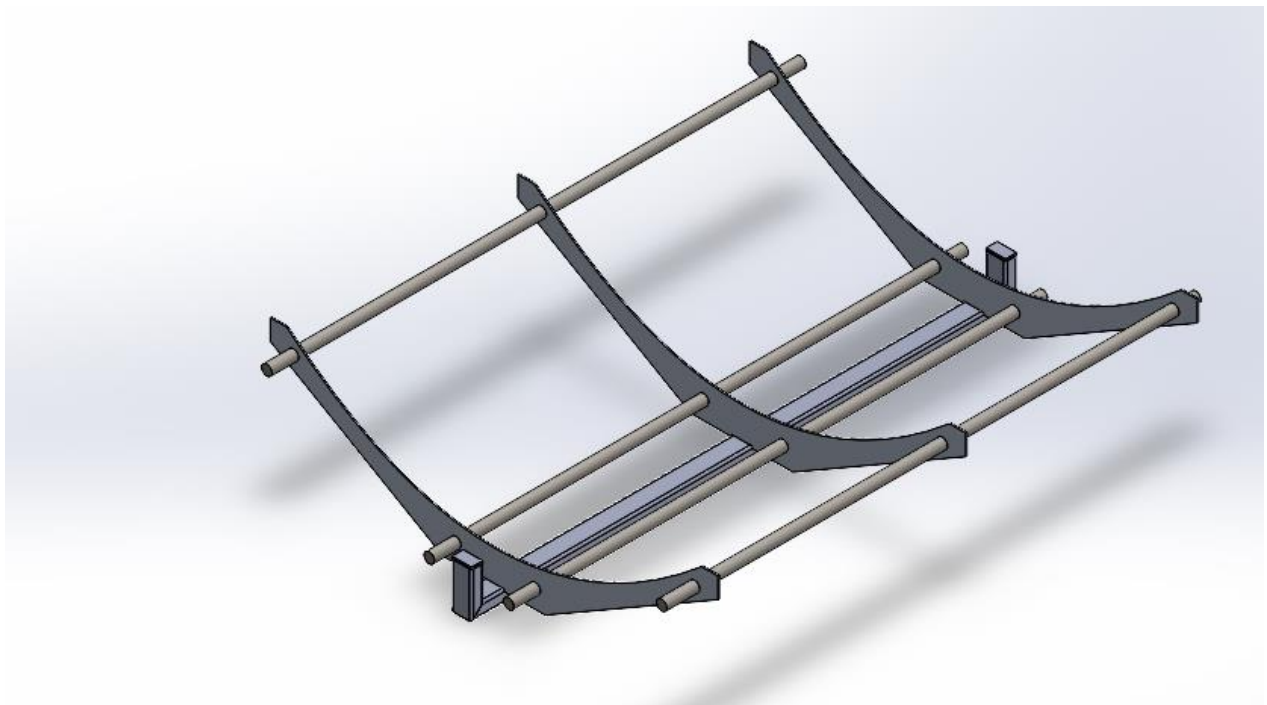
Figura 19 Perfil del reflector solar



Fuente: Autores del Proyecto

Este reflector está sujeto a la base que se muestra en las figuras 19. Esta estructura es tiene partes de aluminio y acero estructural A36.

Figura 20 Vista superior de la base



Fuente: Autores del Proyecto

#### 4.6.2 Tubo receptor

Fue seleccionada un tubo de cobre de 1.2m de largo tipo M cuyo diámetro es de  $\frac{3}{4}$  de pulgada y espesor de 0.032 pulgadas. Ese tubo tiene las siguientes especificaciones:



Figura 21 Especificaciones del tubo de cobre seleccionado






Medida nominal	Diámetro exterior	Diámetro interno			Espesor de pared			Peso por tramo de 6.10 mts			Presión máxima		
		M	L	K	M	L	K	M	L	K	M	L	K
1/4"	0.375"	0.324"	0.314"	0.276"	0.025"	0.030"	0.049"	2.132 lb	2.524 lb	5.385 lb	6.133 lb/pulg <sup>2</sup>	7.200 lb/pulg <sup>2</sup>	8.820 lb/pulg <sup>2</sup>
6.35 mm	9.525 mm	8.255 mm	8.001 mm	7.035 mm	0.635 mm	0.762 mm	1.245 mm	0.968 kg	1.146 kg	2.445 kg	431.15 kg/cm <sup>2</sup>	506.16 kg/cm <sup>2</sup>	620.04 kg/cm <sup>2</sup>
3/8"	0.500"	0.449"	0.429"	0.401"	0.025"	0.035"	0.049"	2.903 lb	3.965 lb	6.890 lb	4.500 lb/pulg <sup>2</sup>	6.300 lb/pulg <sup>2</sup>	7.056 lb/pulg <sup>2</sup>
9.50 mm	12.700 mm	11.43 mm	10.922 mm	10.21 mm	0.635 mm	0.889 mm	1.245 mm	1.318 kg	1.800 kg	3.128 kg	316.35 kg/cm <sup>2</sup>	442.89 kg/cm <sup>2</sup>	496.03 kg/cm <sup>2</sup>
1/2"	0.625"	0.572"	0.544"	0.494"	0.028"	0.040"	0.065"	4.083 lb	5.705 lb	12.813 lb	4.032 lb/pulg <sup>2</sup>	5.760 lb/pulg <sup>2</sup>	6.685 lb/pulg <sup>2</sup>
12.7 mm	15.875 mm	14.453 mm	13.843 mm	12.573 mm	0.711 mm	1.016 mm	1.651 mm	1.854 kg	2.590 kg	5.817 kg	283.45 kg/cm <sup>2</sup>	404.92 kg/cm <sup>2</sup>	469.95 kg/cm <sup>2</sup>
3/4"	0.875"	0.811"	0.784"	0.744"	0.032"	0.045"	0.065"	6.566 lb	9.110 lb	16.799 lb	3.291 lb/pulg <sup>2</sup>	4.632 lb/pulg <sup>2</sup>	5.200 lb/pulg <sup>2</sup>
19 mm	22.225 mm	20.601 mm	19.939 mm	18.923 mm	0.812 mm	1.143 mm	1.651 mm	2.981 kg	4.136 kg	7.627 kg	231.35 kg/cm <sup>2</sup>	325.62 kg/cm <sup>2</sup>	209.00 kg/cm <sup>2</sup>
1"	1.125"	1.054"	1.024"	0.994"	0.035"	0.050"	0.065"	9.310 lb	13.114 lb	20.824 lb	2.800 lb/pulg <sup>2</sup>	4.000 lb/pulg <sup>2</sup>	4.260 lb/pulg <sup>2</sup>
25 mm	28.575 mm	26.797 mm	26.035 mm	25.273 mm	0.889 mm	1.270 mm	1.651 mm	4.227 kg	5.954 kg	9.454 kg	196.84 kg/cm <sup>2</sup>	281.20 kg/cm <sup>2</sup>	299.47 kg/cm <sup>2</sup>
1 1/4"	1.375"	1.290"	1.264"	1.230"	0.042"	0.055"	0.072"	13.656 lb	17.700 lb	27.231 lb	2.749 lb/pulg <sup>2</sup>	3.600 lb/pulg <sup>2</sup>	3.988 lb/pulg <sup>2</sup>
32 mm	34.925 mm	32.791 mm	32.131 mm	31.267 mm	1.067 mm	1.397 mm	1.829 mm	6.200 kg	8.036 kg	12.363 kg	193.25 kg/cm <sup>2</sup>	253.08 kg/cm <sup>2</sup>	280.35 kg/cm <sup>2</sup>
1 1/2"	1.625"	1.526"	1.504"	1.459"	0.049"	0.060"	0.083"	18.821 lb	22.826 lb	41.249 lb	2.713 lb/pulg <sup>2</sup>	3.323 lb/pulg <sup>2</sup>	3.515 lb/pulg <sup>2</sup>
38 mm	41.275 mm	38.785 mm	38.227 mm	37.059 mm	1.245 mm	1.524 mm	2.108 mm	8.545 kg	10.363 kg	18.727 kg	190.72 kg/cm <sup>2</sup>	233.60 kg/cm <sup>2</sup>	247.10 kg/cm <sup>2</sup>
2"	2.125"	2.016"	1.984"		0.058"	0.070"		29.233 lb	35.042 lb		2.470 lb/pulg <sup>2</sup>	2.965 lb/pulg <sup>2</sup>	
51 mm	53.975 mm	51.029 mm	50.419 mm		1.473 mm	1.778 mm		13.272 kg	15.909 kg		173.65 kg/cm <sup>2</sup>	208.43 kg/cm <sup>2</sup>	
2 1/2"	2.625"	2.494"	2.464"		0.065"	0.080"		40.647 lb	49.658 lb		2.228 lb/pulg <sup>2</sup>	2.742 lb/pulg <sup>2</sup>	
64 mm	66.675 mm	63.373 mm	62.611 mm		1.651 mm	2.032 mm		18.454 kg	22.545 kg		156.62 kg/cm <sup>2</sup>	192.76 kg/cm <sup>2</sup>	
3"	3.125"	2.976"	2.944"		0.072"	0.090"		53.663 lb	66.645 lb		2.073 lb/pulg <sup>2</sup>	2.592 lb/pulg <sup>2</sup>	
76 mm	79.375 mm	75.597 mm	74.803 mm		1.889 mm	2.286 mm		24.363 kg	30.257 kg		145.73 kg/cm <sup>2</sup>	182.21 kg/cm <sup>2</sup>	
4"	4.125"	3.934"	3.904"		0.095"	0.110"		93.310 lb	107.729 lb		2.072 lb/pulg <sup>2</sup>	2.400 lb/pulg <sup>2</sup>	
102 mm	104.775 mm	99.949 mm	99.187 mm		2.413 mm	2.794 mm		42.363 kg	48.909 kg		145.65 kg/cm <sup>2</sup>	168.72 kg/cm <sup>2</sup>	

Fuente: (Sitasa,2019)

#### 4.6.3 Tubo al vacío

Consiste una tubería de vidrio borosilicato 3.3 cuyas especificaciones seleccionadas son resaltadas en la figura 22.

Figura 22 Especificaciones de la tubería de vidrio de borosilicato seleccionada

Diámetro exterior  mm	Espesor de pared  mm	Peso por tubo Longitud aprox. 1500mm  g	Contenido por caja de cartón 		Carga de palet 	
			Número de tubos	Peso aprox. kg	Número de cajas de cartón	Peso aprox. kg
<b>36</b> ±0,35	1,4 ±0,07	509	25	12,6	20	252,0
	2,0 ±0,09	714	25	18,0	20	360,0
	2,8 ±0,14	976	12	11,7	35	409,5
<b>38</b> ±0,35	1,4 ±0,07	538	20	10,8	20	216,0
	2,0 ±0,09	756	20	15,0	20	300,0
	2,8 ±0,14	1 035	9	9,4	35	329,0
<b>40</b> ±0,50	1,6 ±0,08	645	16	10,2	20	204,0
	2,3 ±0,11	911	16	14,6	20	292,0
	3,2 ±0,18	1 237	9	11,2	35	392,0
	5,0 ±0,30	1 838	9	16,5	28	462,0
<b>42</b> ±0,50	1,6 ±0,08	679	16	10,9	20	218,0
	2,3 ±0,11	959	16	15,3	20	306,0
	3,2 ±0,18	1 304	9	11,7	35	409,5
<b>44</b> ±0,50	1,6 ±0,08	713	16	11,4	20	228,0
	2,3 ±0,11	1 007	16	16,0	20	320,0
	3,2 ±0,18	1 371	9	12,4	35	434,0
<b>45</b> ±0,60	5,0 ±0,30	2 101	9	18,9	28	529,2
<b>46</b> ±0,60	1,6 ±0,08	746	16	11,9	20	238,0
	2,3 ±0,11	1 056	9	9,5	35	332,5
	3,2 ±0,18	1 439	9	13,0	35	455,0
<b>48</b> ±0,60	1,6 ±0,08	780	16	12,4	20	248,0
	2,3 ±0,11	1 104	16	17,6	20	352,0
	3,2 ±0,18	1 506	6	9,0	35	315,0
<b>50</b> ±0,65	1,8 ±0,11	911	12	10,9	20	218,0
	2,5 ±0,14	1 247	12	15,0	20	300,0
	3,5 ±0,22	1 709	12	20,5	20	410,0
	5,0 ±0,30	2 363	6	14,1	35	493,5
	7,0 ±0,45	3 161	6	19,0	28	532,0
	9,0 ±0,60	3 876	6	23,2	21	487,2

Fuente: (Duran, 2019)

#### 4.6.4 Estructura del calentador solar cilíndrico parabólico

Se diseñó la estructura del calentador solar cilíndrico parabólico con tubo estructural cuadrado

de 50x 3mm, de acero A36, recubrimiento negro, uniones soldadas.

La estructura del colector soporta todos los elementos presentes en el calentador, en la figura 22 se detalla que el peso del calentador es de 32,76 kg.

Figura 23 Propiedades físicas de la estructura del calentador

The screenshot shows the 'Propiedades físicas' (Physical Properties) window for the assembly 'EMSAMBLE COLECTOR.SLDASM'. The window displays the following data:

**Propiedades de masa de EMSAMBLE COLECTOR**  
 Configuración: Predeterminado  
 Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Masa = 32725.89 gramos  
 Volumen = 7044120.12 milímetros cúbicos  
 Área de superficie = 4604812.84 milímetros cuadrados

**Centro de masa: (milímetros)**  
 X = 354.76  
 Y = 41.83  
 Z = 1139.80

**Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos \* milímetro Medido desde el centro de masa.**

$I_x = (0.00, 0.00, 1.00)$	$P_x = 3643599564.19$
$I_y = (1.00, 0.00, 0.00)$	$P_y = 5452206748.12$
$I_z = (0.00, 1.00, 0.00)$	$P_z = 8305694453.05$

**Momentos de inercia: (gramos \* milímetros cuadrados)**  
 Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de salida.

$L_{xx} = 5452213500.14$	$L_{yy} = -4440555.78$	$L_{zz} = 535313.00$
$L_{yx} = -4440555.78$	$L_{xy} = 8305687539.18$	$L_{yz} = 127397.85$
$L_{zx} = 535313.00$	$L_{xz} = 127397.85$	$L_{zz} = 3643599726.04$

**Momentos de inercia: (gramos \* milímetros cuadrados)**  
 Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

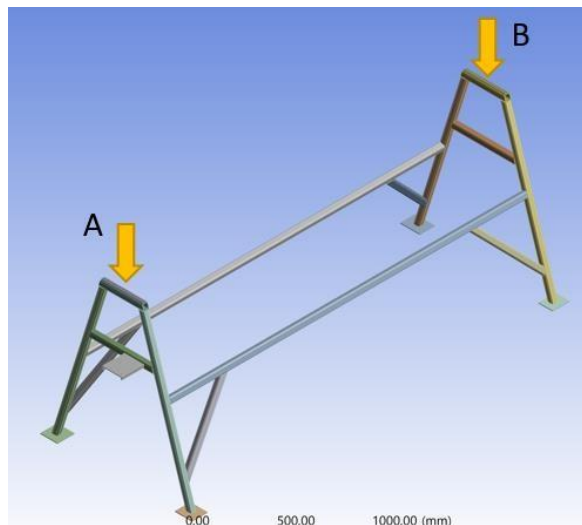
$I_{xx} = 48025122336.60$	$I_{yy} = 481207700.42$	$I_{zz} = 13233534607.77$
$I_{yx} = 481207700.42$	$I_{xy} = 54940105604.77$	$I_{yz} = 1560442537.91$
$I_{zx} = 13233534607.78$	$I_{xz} = 1560442537.91$	$I_{zz} = 7819635421.92$

The background shows a 3D model of the collector structure assembly within the SolidWorks environment.

Fuente: Autores del Proyecto

El diseño se lo realizó en SolidWorks, mientras que el análisis estructural se lo realizó por elementos finitos en ANSYS.

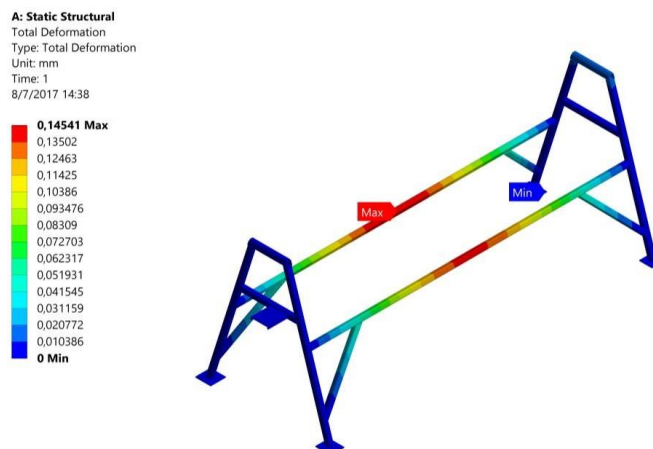
Figura 24 Geometría



Fuente: Autores del Proyecto

En la figura 24 se muestra la geometría de la estructura. En los puntos A y B es donde se ubican las cargas. Se ubica una carga distribuida de 30 kg en cada punto, con lo cual se obtienen los resultados siguientes:

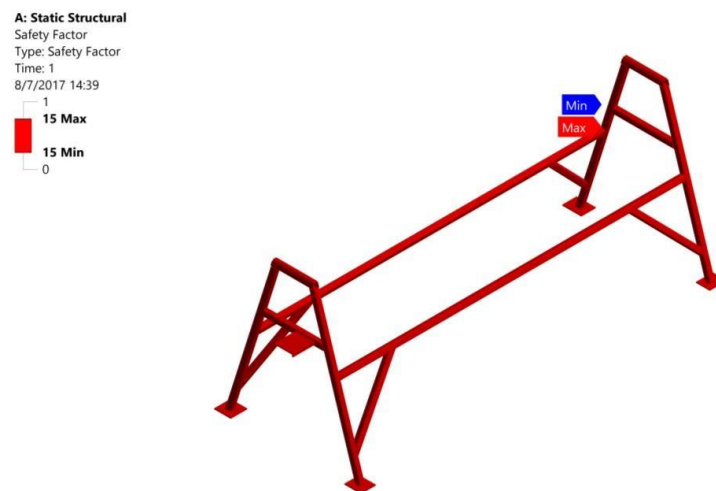
Figura 25 Análisis estático de la armadura



Fuente: Autores del Proyecto

El acero A36 presenta un límite de fluencia de 250 MPa, según el análisis realizado en ANSYS el esfuerzo equivalente es igual a 8,91 MPa, con lo que se comprueba que la estructura soportará el peso de los elementos, obteniéndose un factor de seguridad de 15, como se muestra en la figura 26:

Figura 26 Esfuerzo máximo en la estructura



Fuente: Autores del Proyecto

#### 4.6.5 Seguimiento solar

El elemento elegido para dar movimiento al sistema de seguimiento solar es un motorreductor por ello fue necesario la selección del motorreductor a partir del cálculo del torque y la selección del sistema de transmisión.

##### 4.6.5.1 Selección del motorreductor

Para la correcta selección del motor y que este funcione con normalidad a lo largo del día, es

necesario el cálculo del torque producido por el colector

El torque producido por el colector es igual a:

$$T = P * \bar{y}$$

Donde:

$P$ : Peso total de los elementos sobre la estructura

$\bar{y}$ : Centroide

Utilizando los datos de la figura 22 se tiene:

$$T = 32,76 \text{ kg} * 0,126\text{m} = 4,18 \text{ kg} * m = 41\text{N*m}$$

Y tomando un factor de seguridad aproximadamente de dos (1.3), el torque requerido es igual a 53N\*m. Por lo tanto, fue seleccionado del catálogo de SIEMENS, el motorreductor 2KJ1500 - 7CD13 - 77W1 cuya potencia nominal es de 0.25KW (ver anexo 1).

#### **4.6.5.2 Selección de la cadena del sistema de seguimiento solar**

El elemento mecánico elegido para transmitir la potencia del motor al sistema es la cadena, debido a sus múltiples características como son:

- Facilidad de cambio y de mantenimiento
- Alto rendimiento
- Necesita de poco espacio de instalación
- Ausencia de deslizamiento
- Pequeña magnitud de carga sobre los árboles

La razón de velocidades fue tomada igual a 3 para este sistema de transmisión por cadena, por lo tanto:

$$n_3 = \frac{n_2}{r_v} = \frac{53rpm}{3} = 16rpm$$

Y como el impulsor ( $Z_2$ ) tiene  $n > 100rpm$  la Catarina puede tener un número de dientes menor a 17. Por tal razón fue seleccionada, del catálogo INTERMEC la siguiente cadena:

- Cadena estándar sencilla de rodillos N° 60 de paso  $\frac{3}{4}$ " cuyo piñón conductor tiene 15 dientes y el conducido 45 dientes. La longitud de la cadena es:

$$L(\text{pasos}) = 2 \left( \frac{C}{P} \right) + \frac{S}{2} + \frac{k}{P}$$

Donde

- $c$  es la distancia entre centros y teniendo en cuenta la recomendación de  $30 \leq \left( \frac{C}{P} \right) \leq 50$  se tomó  $C/P=40$ . Por lo tanto  $C=30$ pulg
- $S = 15 + 45 = 60$
- $K =$

**22.80; valor extraído del catálogo piñones y cadenas de INTERMEC**

$$L(\text{pasos}) = 2 \left( \frac{30}{0.75} \right) + \frac{60}{2} + \frac{22.80}{0.75} = 110.57\text{pulg}$$

Figura 27 Características de la cadena seleccionada (INTERMEC S.A.)

CADENA NUMERO	DIMENSIONES							LIMITE DE ROTURA Lbs.	PESO Lbs. POR PIE 30.5 cms.
	PASO "P" 6.35 mm	LARGO RODILLO "W"	DIAMETRO RODILLO "D"	DIAMETRO PASADOR "C"	GRUESO CHAPETA "F"	ANCHO CHAPETA "H"	M.		
25	1/4" * 6.35 mm	0.125	0.130	0.0905	0.030	0.234	0.188	0.875	0.09
35	3/8" * 9.52 mm	0.187	0.200	0.141	0.050	0.350	0.267	2.100	0.21
40	1/2" * 12.7 mm	0.312	0.312	0.156	0.060	0.466	0.380	3.700	0.42
50	5/8" * 15.87 mm	0.375	0.400	0.200	0.080	0.584	0.460	6.100	0.69
60	3/4" * 19.05 mm	0.500	0.468	0.234	0.094	0.700	0.586	8.500	1.00
80	1" * 25.4 mm	0.625	0.625	0.312	0.125	0.934	0.741	14.500	1.71
100	1 1/4" * 31.75 mm	0.750	0.750	0.375	0.156	1.166	0.923	24.000	2.58
120	1 1/2" * 38.10 mm	1.000	0.875	0.437	0.187	1.400	1.150	34.000	3.87

Fuente: Autores del Proyecto

#### 4.7 Análisis térmico del sistema de calentamiento

Se analizó el funcionamiento del sistema de calentamiento de agua.

La pérdida de calor va desde el tubo de cobre hacia la parte interna de la cubierta de vidrio, luego va desde la parte interior hasta la parte exterior de la cubierta de vidrio, y finalmente hacia el ambiente.

Las pérdidas térmicas que se encontraran en



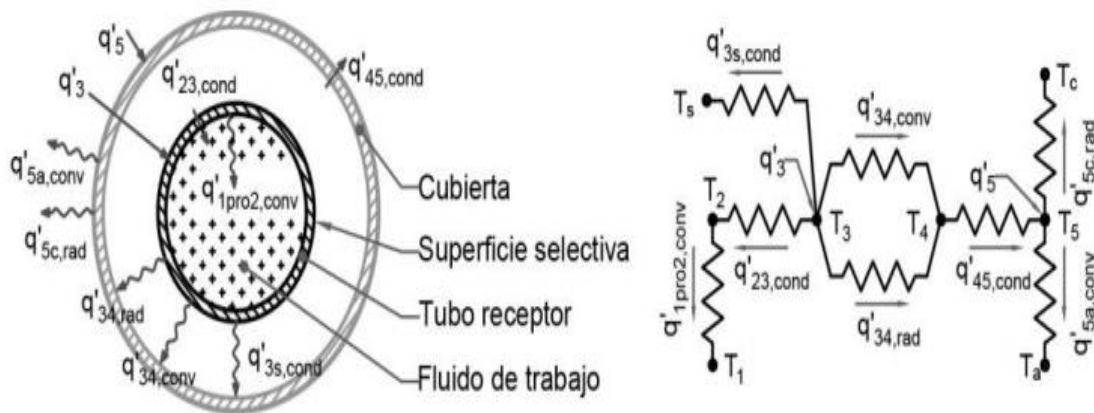
### 4.7.1 Cálculo del tiempo de calentamiento del agua en el tubo absorbedor hasta la temperatura de 60°C

Se hizo necesario calcular el calor que recibirá el tubo absorbedor proveniente de la superficie reflectora del CCP, es decir, el calor útil generado por el colector solar cuyo valor depende de las pérdidas térmicas del sistema (coeficiente de pérdida  $U_L$ ).

Las pérdidas térmicas que se ilustran en la figura 28 son:

- Pérdidas por convección de la superficie interna del tubo de cobre hacia el agua.
- Pérdidas por conducción entre el espesor del tubo de cobre.
- Pérdidas por radiación de la superficie externa del tubo de cobre hacia el tubo de vidrio.
- Pérdidas por convección de la superficie externa del tubo de cobre hacia el tubo de vidrio.
- Pérdidas por conducción del tubo de cobre hacia los soportes metálicos de los tubos.
- Pérdidas por conducción a través del espesor del tubo de vidrio.
- Pérdidas por radiación del tubo de vidrio al ambiente.
- Pérdidas por convección del tubo de vidrio al ambiente.

Figura 28 Flujos de transferencia de calor para el balance energético en el tubo absorbedor



Fuente: Autores del Proyecto

Donde,

$T_1$  : Temperatura del agua.

$T_2$  : Temperatura de la pared interna del tubo de cobre

$T_3$  : Temperatura de la pared externa del tubo de cobre

$T_4$  : Temperatura de la pared interna del tubo de vidrio de borosilicato

$T_5$  : Temperatura de la pared externa del tubo de vidrio de borosilicato

$T_s$  : Temperatura en los soportes del tubo de cobre

$T_{amb}$  : Temperatura ambiente

$T_c$  : Temperatura del cielo equivalente

La pérdida de calor fue calculada mediante la expresión:

$$Q_{perdido, c-iv} = \frac{2\pi K_{ef} L}{\ln\left(\frac{D_{iv}}{D_{cu}}\right)} (T_{cu} - T_4) + \frac{\sigma A_{cu} (T_{cu}^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1 - \epsilon_v}{\epsilon_v} \left(\frac{D_{iv}}{D_{cu}}\right)}$$

Donde:

$Q_{perdido, c-iv}$ : Calor perdido por convección y radiación desde el tubo receptor de cobre hacia la parte interior de la cubierta de vidrio. [W]

$K_{ef}$ : Conductividad térmica efectiva [W/Km]

$L_{cu}$ : Longitud del tubo de cobre [m]

$T_{cu}$ : Temperatura del tubo de cobre [°K]

$T_4$  : Temperatura de la pared interna del tubo de vidrio [°K]

$D_{iv}$  : Diámetro interior del tubo de vidrio [m]

$D_{cu}$ : Diámetro del tubo de cobre [m]

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann  $\left[\frac{W}{m^2k^4}\right]$

$A_{cu}$ : Área del tubo de cobre [m<sup>2</sup>]

$\varepsilon_v$ : Emisividad del tubo de vidrio [adimensional]

$\varepsilon_c$ : Emisividad del tubo de cobre [adimensional]

El área del tubo de cobre se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$A_{cu} = (\pi D_{cu} L_{cu})$$

La conductividad térmica efectiva se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_{ef} = 0,386 K_a \left( \frac{Pr}{0,861 + Pr} \right)^{\frac{1}{4}} (F_{cil} Ra)^{\frac{1}{4}}$$

Donde:

$k_a$ : Conductividad térmica del aire [W/mK]

$Pr$ : Número de Prandtl [adimensional]

$F_{cil}$ : Factor geométrico para dos tubos concéntricos [adimensional]

$Ra$ : Número de Rayleigh [adimensional]

Se calculó la temperatura promedio entre los tubos de vidrio y de cobre, y evaluar las propiedades del aire entre el tubo de cobre y el tubo de vidrio.

$$T_{prom1} = \frac{T_4 + T_{cu}}{2}$$

En este punto fue necesario calcular el número de Rayleigh debido a la convección natural que se va a producir:

$$Ra = \frac{g C_{ev} (T_{cu} - T_4) L_c^3}{\nu} Pr$$

Donde:

$Ra$ : Número de Rayleigh. [Adimensional]

$g$ : Aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$C_{ev}$ : Coeficiente de expansión volumétrica [1/K]

$L_c$ : Longitud característica para dos tubos concéntricos [m]

$\nu$ : Viscosidad cinemática. [m<sup>2</sup>/s]

La longitud característica, que en este caso viene hacer la distancia entre los dos cilindros, es decir:

$$L_c = \frac{D_{iv} - D_{cu}}{2}$$

Para el cálculo de la conductividad térmica efectiva se obtiene el factor geométrico para los dos cilindros concéntricos mediante la siguiente expresión:

$$F_{cil} = \frac{\left[ \ln\left(\frac{D_{iv}}{D_{cu}}\right) \right]^4}{L_c^3 \left( D_{cu}^{\frac{-3}{5}} + D_{iv}^{\frac{-3}{5}} \right)^5}$$

La pérdida de calor desde la parte interna hacia la parte externa de la cubierta de vidrio viene dada por la siguiente expresión:

$$Q_{perdido, iv-ev} = \frac{2\pi k L (T_{iv} - T_5)}{\ln\left(\frac{D_{ev}}{D_{iv}}\right)}$$

Donde:

$Q_{perdido, iv-}$ : Calor perdido por convección y radiación desde la parte interna del tubo de vidrio hacia la parte externa de la cubierta de vidrio. [W]

$k$ : Conductividad térmica de la cubierta de vidrio [W/Km]

$T_5$ : Temperatura de la parte exterior de la cubierta de vidrio [°K]

$D_{ev}$ : Diámetro exterior del tubo de vidrio [m]

Las pérdidas de calor por convección y radiación desde la cubierta de vidrio hacia el ambiente vienen dadas por la siguiente ecuación:

$$Q_{perdido, ev-amb} = h_v A_v (T_5 - T_{amb}) + \varepsilon_v \sigma A_v (T_5^4 - T_c^4)$$

Donde:

$h_v$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección debido al viento. [W/m<sup>2</sup>K]

$A_v$ : Área de la cubierta de vidrio [m<sup>2</sup>]

$T_{amb}$ : Temperatura del ambiente [K]

$T_c$ : Temperatura del cielo [K]

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor fue necesario hallar el número de Reynolds y de Nusselt evaluando las propiedades del aire a la temperatura promedio entre la temperatura ambiente y la temperatura de la cubierta de vidrio:

$$T_{prom2} = \frac{T_5 + T_{amb}}{2}$$

Donde:

$T_{prom}$ : Temperatura promedio entre la temperatura del vidrio y la temperatura ambiente [K]

$T_5$ : Temperatura del tubo de vidrio [K]

$T_{amb}$ : Temperatura ambiente [K]

El número de Reynolds se obtiene con la expresión:

$$R_e = \frac{\rho V D_{ev}}{\mu}$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]

$V$ : Velocidad del aire [m/s]

$\mu$ : Viscosidad dinámica del aire [Pa-s]

El número de Nusselt depende del valor del número de Reynolds y se obtiene mediante las siguientes expresiones:

Para un Reynolds entre (0,1 – 1000)

$$N_u = 0,4 + 0,54 (R_e)^{0,52} = \frac{h_v \cdot D_{ev}}{k_a}$$

Para un Reynolds entre (1000 – 50000)

$$N_u = 0,3 (R_e)^{0,6} = \frac{h_v \cdot D_{ev}}{k_a}$$

Con la obtención de estos valores se calculó el coeficiente de pérdida  $U_L$  para un tubo sin gradiente de temperatura, o para un tubo de longitud pequeña mediante la siguiente expresión:

$$U_L = \frac{Q_{perdido}}{A_{cu}(T_{cu} - T_{amb})}$$

Se usa esta ecuación ya que el agua se va a mantener en reposo dentro del tubo mientras adquiere la temperatura deseada. Para poder obtener el valor del calor útil generado por el colector fue necesario calcular el factor de eficiencia del colector, este factor representa la relación entre ganancia de energía útil real y la ganancia de energía útil si el absorbedor estuviera a la temperatura de fluido local.

El factor de eficiencia del colector es una constante para cualquier diseño de un colector y un rango de flujo de fluido. Y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_{ec}}{h_{fi}D_{ic}} + \left(\frac{D_{ec}}{2k} \ln\left(\frac{D_{ec}}{D_{ic}}\right)\right)}$$

Donde:

$D_{ec}$ : Diámetro exterior del tubo de cobre [m]

$D_{ic}$ : Diámetro interior del tubo de cobre [m]

$h_{fi}$ : Coeficiente de transferencia de Calor dentro del tubo [W/m<sup>2</sup>K]

Para calcular Nusselt mediante la siguiente expresión:

$$Nu_D = 4.364$$

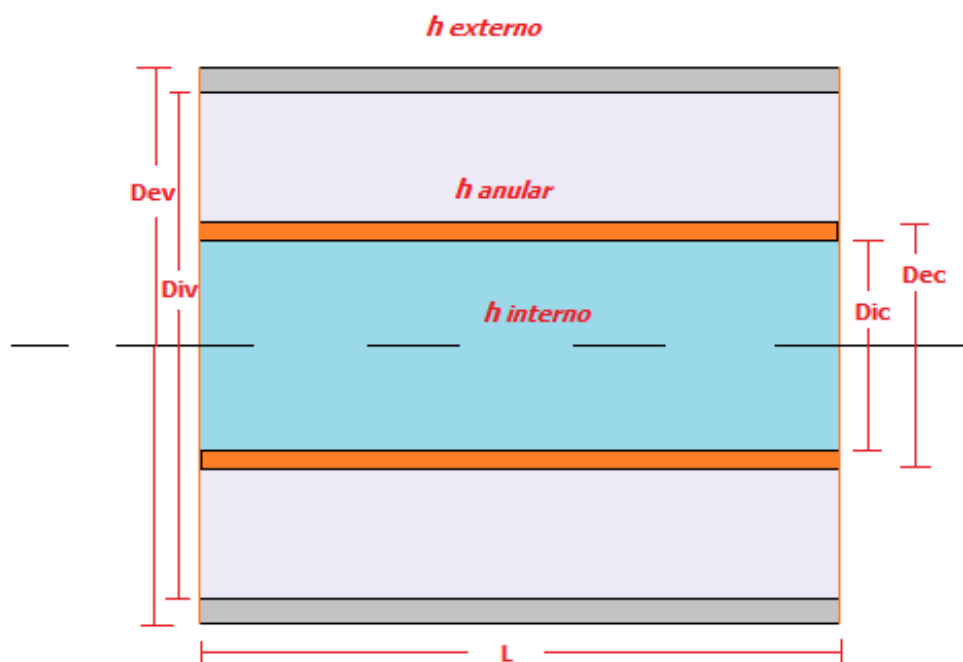
El coeficiente interno de transferencia de calor se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$h_{fi} = \frac{Nu k_w}{D_{ic}}$$

Donde:

$k_w$  = Conductividad térmica del agua [W/m °C]

Figura 29 Esquema del tubo absorbedor.



Fuente: Autores del Proyecto

La ganancia de calor útil que se produce en el colector es igual a la radiación solar absorbida menos las pérdidas de calor que se producen en el colector.

$$Q_{util} = F \cdot A_a R - A_a U_L (T_{cu} - T_{amb})$$

Donde:

$A_a$ : Área de apertura del colector solar [ $m^2$ ]

$R$ : Radiación efectiva por unidad de área [ $W/m^2$ ]

El área de apertura de colector es el área de incidencia de los rayos solares en la plancha reflectante de acero inoxidable, y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$A_a = (A - D_{ev})L$$



Donde:

$A$ : Ancho de plancha de aluminio [m]

$L$ : Longitud de plancha de aluminio[m]

Una vez hallado el valor del calor útil generado por el colector solar se calcula el tiempo que se demora en calentar el fluido hasta la temperatura de 70°C mediante la siguiente expresión:

$$Q_{util} = \frac{m}{t} C_p (T_{sal} - T_{ent})$$

Despejando  $t$  se obtiene lo siguiente:

$$t = \frac{m}{Q_{util}} C_p (T_{sal} - T_{ent})$$

Donde:

$t$ : Tiempo de calentamiento de fluido [s]

$Q_{util}$ : Calor útil generado por el colector solar [W]

$m$ : Masa de fluido [kg]

$C_p$ : Calor específico del fluido de transferencia de calor a presión constante [J/kg°K]

$T_{ent}$ : Temperatura del agua en la entrada [K]

$T_{sal}$ : Temperatura del agua en la salida [K]

#### 4.7.2 Eficiencia térmica del calentador solar cilíndrico parabólico

La eficiencia de un concentrador solar se define como la relación entre la energía absorbida por el fluido portador del calor y la energía incidente que es la densidad de energía solar sobre su superficie. (Benavides Salcedo, 2006 pág. 60)

$$\eta = \frac{Q_{util}}{I_o \cdot A_a}$$

Donde:

$Q_{util}$ : Calor útil que absorbe el fluido de trabajo [W]  $I_o$ : Radiación solar directa incidente sobre el concentrador [ $W/m^2$ ]  $A_a$ : Área de apertura del concentrador [ $m^2$ ]

Todos estos cálculos se evidencian en las figuras 30 y 31.

Figura 30 Datos analizados en el balance de energía del calentador

Temperatura exterior del vidrio (asumido)	T5	309	k
---	----	-----	---

<b>DATOS DE ENTRADA</b>			
Descripcion	Nom	valor	unidades
Diametro externo de la tuberia de cobre	D <sub>ecu</sub>	0,0222225	m
Diametro interno de la tuberia de cobre	D <sub>cu</sub>	0,020599	m
Diametro externo de la tuberia de vidrio	D <sub>ev</sub>	0,04445	m
Diametro interno de la tuberia de vidrio	D <sub>iv</sub>	0,03505	m
Logitud del la tuberia	L	1,2	m
Emisividad del vidrio	$\epsilon_v$	0,89	
Emisividad del cobre	$\epsilon_c$	0,95	
Reflectividad de la superficie reflectora	R <sub>sr</sub>	0,853	
Absortividad de la tuberia de cobre	$\alpha$	0,92	
Factor de intercepcion	$\gamma$	0,9	
Transmisividad del vidrio	t <sub>ca</sub>	0,92	
Radiacion directa	I <sub>o</sub>	400	w/m <sup>2</sup>
Temperatura ambiente	T <sub>amb</sub>	301	k
Gravedad	g	9,81	m/s <sup>2</sup>
velocidad del aire en cucuta	V	1,4	m/s
Constante de stefan boltzman	$\sigma$	5,67E-08	$\frac{W}{m^2 K^4}$
Temperatura de la tuberia de cobre	T <sub>cu</sub>	359,61	k
Temperatura interna de la tuberia de vidrio	T <sub>4</sub>	310	k
Area de apertura del colector	A <sub>a</sub>	1,38666	m <sup>2</sup>

Fuente: Autores del Proyecto

Figura 31 Análisis térmico del calentador solar

<b>RESULTADOS DE LOS CALCULOS DE LA TRANFERENCIA DE CALOR</b>			
Descripcion	Nomenclatura	valor	unidades
<b>CALCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DEBIDO AL VIENTO</b>			
Temperatura promedio	$T_{prom1}$	305	K
conductividad termica del aire exterior	$K_{ae}$	0,026028	w/m*K
viscosidad dinamica del aire	$\mu$	1,88E-05	kg/m*s
Densidad del aire	$\rho$	1,1564	kg/m <sup>3</sup>
Numero de reynolds	$Re(v)$	3,83E+03	
Numero de nusselt	$Nu(v)$	4,23E+01	
<b>Coefficiente de tranferencia debido al viento</b>	<b><math>h(v)</math></b>	<b>24,79</b>	<b>w/m<sup>2</sup>*K</b>
<b>CALCULO DEL CALOR PERDIDO DE LA CUBIERTA AL AMBIENTE</b>			
Area de la cubierta del vidrio	$A_v$	0,167572944	m <sup>2</sup>
Temperatura del cielo	$T_c$	288	K
<b>Pérdidas de calor por convección y radiación desde la cubierta de vidrio hacia el ambiente</b>	<b><math>Q's</math></b>	<b>51,94</b>	<b>W</b>
<b>CALCULO DEL CALOR PERDIDO DE LA TUBERIA DE COBRE A LA CUBIERTA DE VIDRIO</b>			
Area de la tuberia de cobre	$A_{cu}$	0,083777047	m <sup>2</sup>
Longitud caracteristica	$L_c$	0,00641375	m
Temperatura promedio entre el cobre y el vidrio	$T_{prom2}$	334,8	k
Conductividad termica del aire interior	$K_{ai}$	0,02821	w/m*K
Numero de Prandtl	$Pr$	0,71975	
Viscosidad cinematica del aire	$\nu$	1,91E-05	m <sup>2</sup> /s
Coefficiente de expansion termica	$B$	0,002986813	1/k
Numero de Rayleigh para el aire	$Ra$	753,4946775	
Factor geometrico para los dos cilindricos concentricos	$F_{cil}$	0,105952656	dim/m <sup>8</sup>
Conductividad termica efectiva	$K_{ef}$	0,026737329	w/m*K
Razon de la transferencia de calor entre cilindros por conveccion	$Q'_{34conv}$	21,948186	W
Razon de la transferencia de calor entre cilindros por radiacion	$Q'_{34rad}$	29,99282805	W
<b>Razon total de la perdida de calor entre la cubierta de vidrio y el tubo de cobre</b>	<b><math>Q'_{34}</math></b>	<b>51,94</b>	<b>W</b>

Fuente: Autores del Proyecto

<b>CALCULO DEL COEFICIENTE DE PERDIDAS</b>			
Coefficiente de perdidas	U <sub>L</sub>	<b>10,578</b>	<b>w/m<sup>2</sup>*K</b>
<b>CALCULO DEL CALOR UTIL</b>			
Numero de nusselt dentro de la tubería de cobre	N <sub>u</sub>	4,364	
conductividad termica del agua	K <sub>w</sub>	0,631	w/m*K
Coefficiente de transferencia dentro del tubo	h(a)	133,6804699	w/m <sup>2</sup> *K
Conductividad termica del cobre	K	385	w/m*K
factor de eficiencia del colector	F'	0,909505497	
Radiacion efectiva por unidad de area en la apertura	R	259,912512	w/m <sup>2</sup>
calor util generado por el colector solar	Q <sub>util</sub>	275,8541204	W
<b>CALCULO DEL TIEMPO DE CALENTAMIENTO</b>			
Calor especifico del agua	C <sub>p</sub>	4179	J/kg*K
Volumen de agua	V <sub>w</sub>	0,000399912	m <sup>3</sup>
Masa de agua	m	0,398712248	Kg
Temperatura de entrada del agua	T <sub>ent</sub>	293	K
Temperatura de salida del agua	T <sub>sal</sub>	333	K
Tiempo de calentamiento del agua	t	4,03	min
<b>EFICIENCIA MAXIMA Y PROMEDIO DEL CALENTADOR</b>			
Eficiencia maxima	η <sub>máx</sub>	<b>0,77</b>	
Eficiencia promedio	η	<b>0,50</b>	

Fuente: Autores del Proyecto

#### 4.7.3 Tanque de almacenamiento

En una hora el colector solar es capaz de elevar la temperatura del agua desde los 20°C hasta 60°C de 12 litros de agua, por lo que el tanque a diseñar es cilíndrico y tendrá una capacidad de 12 litros. Para esto se determina el diámetro del tanque, para una longitud de 40 centímetros, mediante los siguientes cálculos:

$$VT = \pi \cdot \frac{D_T^2}{4} \cdot L_T$$

Siendo:

- VT, el volumen del tanque

- $D_T$ , el diámetro del tanque
- $L_T$ , la longitud del tanque

Despejando  $D_T$  de la ecuación, obtenemos la siguiente ecuación:

$$D_T = \sqrt{\frac{4 \cdot V_T}{\pi \cdot L_T}}$$

Reemplazando los valores de volumen y longitud requerida para el tanque en la ecuación (44), se obtiene:

$$D_T = \sqrt{\frac{4 * 12000}{\pi * 40}} = 19.54cm$$

El tanque de almacenamiento es de acero inoxidable.

## 5 Conclusiones

En el departamento de norte de Santander ubicado en la región nororiental de Colombia se cuenta con una intensidad de radiación promedio mensual de  $594.1965 \text{ w/m}^2$  según SAM.

Se consultaron fuentes como papers, artículos científicos y libros.

Se diseñó un calentador de agua solar con seguimiento norte-sur con una energía útil a producir de 276 W logrando el calentamiento de un volumen medio de 12 litros por hora, debido a que el sistema entra en funcionamiento desde las 7:00 am y termina su proceso a las 5:00 pm.

El colector cilindro parabólico solar diseñado obtuvo un rendimiento global de 50% ya que la energía incidente del sol sobre el colector fue de 552W y la energía útil utilizada por el agua para elevar su temperatura  $20^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$  fue de 276W, mostrando un eficaz funcionamiento.

Este proyecto se realizó en pequeña dimensión, se puede seguir trabajando en diferentes aspectos y otros usos.

El uso de energías limpias como lo es la energía solar nos ayuda a depender menos de los combustibles fósiles que le causan daños irreparables al medio ambiente.

Para hacer este proyecto se utilizaron los softwares: Solidwork educativo para dibujar las piezas, Ansys en donde se realizó los cálculos de fuerzas y peso de los elementos del calentador, y Microsoft office Excel para hacer los cálculos logrando así integrar todo nuestro aprendizaje.

## 6 Recomendaciones

Realizar trabajos futuros con el fin de comparar los resultados obtenidos en el análisis térmico con resultados experimentales del sistema, de tal manera que pueda validarse el modelo desarrollado y pueda elegir las condiciones óptimas del sistema experimentalmente.

Se recomienda realizar la modelación matemática en forma radial en el tubo absorbedor que ejemplifique de mejor manera la ganancia térmica, ya que en este caso se hizo un análisis térmico en sentido longitudinal del tubo y se tendrán valores más exactos de calentamiento debido al área específica.

Para mejorar la eficiencia del colector se recomienda que el espacio entre el tubo de vidrio y de cobre en condiciones ideales este al vacío, para permitir el paso de los rayos solares y eliminar las pérdidas por convección y radiación del tubo que se encuentra en contacto con el fluido.

Se recomienda experimentar con otros materiales para el reflector que contengan mayor índice de reflectividad y menor índice de absorción.

## 7. Referencias Bibliográficas

- Arsalan, Y., Vinay Prakash, E., & Kumar Rai, A. (2015). *To Analyze the Performance of Solar Parabolic Trough Concentrator with Two Different Reflector Materials*. International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER) , 65-69.
- Çağlar, A. (2016). *Design of a Parabolic Trough Solar Collector Using a Concentrator with High Reflectivity*. Budapest, Hungary: Proceedings of the 2nd World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'16).
- Carta Gonzales, J. A., & Calero Pérez, R. (2013). *Centrales de energías renovables*. Madrid: Pearson.
- Fabara, J. (2016). *Desarrollo experimental de un sistema de seguimiento solar para la obtención de la máxima radiación en concentradores cilíndrico parabólicos*. Sangolquí: ESPE.
- Frank P. Incropera, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Mexico: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- Hrushikesh Bhujangrao, K. (2016). *Design and Development of Prototype Cylindrical Parabolic Solar Collector for Water Heating Application*. Int. Journal of Renewable Energy Development , 49-55.
- Jaramillo, O. (2012). *Concentración solar y calor de procesos industriales*. . México: Centro de Investigación en energía. Universidad Autónoma de México.
- Orosz, M. E. (2016). *Low-cost small scale parabolic trough collector design for manufacturing and deployment in Africa*. AIP Conference Proceedings (pág. 020016). Obtenido de <https://doi.org/10.1063/1.4949040>.
- Paredes, C. (2012). *Diseño de un captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en paraguay*. Paraná: Escuela tecnica superior de ingenieros de minas.



- Soeprijanto, A., & Al, E. (2018). *Design and implementation of seawater eco distillatory using parabolic solar concentrator and photovoltaic pump for isolated island*. OP Conference Series: Materials Science and Engineering, 383-388.
- Swimtonic, T. (2018). *Swimtonic*. Obtenido de Swimtonic.: Obtenido de <https://www.swimtonictech.com/es/2018/03/22/la-importancia-del-agua-la-vida/>
- Tutorials Alternative Energy. (2018). *Parabolic Trough Reflector*. Obtenido de Parabolic Trough Reflector: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/parabolic-trough-reflector.html>
- Tzivanidis, C., Bellos, E., Korres, D., Antonopoulos, K., & Mitsopoulos, G. (2015). *Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic*. Elsevier, 226-237.
- Vashishtha, S. (2012). *Differentiate Between the DNI, DHI and GHI?* First Green Consulting. Obtenido de <https://firstgreenconsulting.wordpress.com/2012/04/26/differentiate-between-the-dni-dhi-and-ghi/>
- Zarza, E. (2003). *Generación Directa de Vapor con Colectores Solares Cilindro Parabólicos Proyecto DIrect Solar Steam (DISS)*. Sevilla.

## 8. Anexos

## Motorreductores

### Motorreductores cónicos helicoidales

Motorreductores de hasta 200 kW

Datos para selección y pedidos (continuación)

Potencia $P_{motor}$ kW	Velocidad de salida		Par de salida $T_2$ Nm	Factor de servicio $f_s$	Índice de reducción $i_{tot}$	Referencia	Código (n.º polos)	Peso <sup>*)</sup> kg
	$n_2$ (50 Hz) min <sup>-1</sup>	$n_2$ (60 Hz) min <sup>-1</sup>						
0,25 (50 Hz)	<b>K.38-LA71S4</b>							
0,30 (60 Hz)	9,7	11,6	247	1,0	139,43	★ 2KJ1502 - ■CD13 - ■■J2		21
	10,8	13,0	221	1,1	124,78	2KJ1502 - ■CD13 - ■■H2		21
	12,2	14,6	196	1,3	110,75	★ 2KJ1502 - ■CD13 - ■■G2		21
	13,9	16,7	172	1,5	97,05	2KJ1502 - ■CD13 - ■■F2		21
	15,8	19	151	1,7	85,33	★ 2KJ1502 - ■CD13 - ■■E2		21
	17,5	21	136	1,8	77,09	2KJ1502 - ■CD13 - ■■D2		21
	20	24	119	2,1	67,18	★ 2KJ1502 - ■CD13 - ■■C2		21
	22	26	107	2,3	60,33	2KJ1502 - ■CD13 - ■■B2		21
	<b>B.38-LA80M8</b>							
	12	14,4	199	1,3	57,04	2KJ1501 - ■DC13 - ■■T2	P02	27
	<b>B.38-LA71M6</b>							
	13,1	15,7	182	1,4	65,69	2KJ1501 - ■CE13 - ■■U2	P01	23
	15,1	18,1	158	1,6	57,04	2KJ1501 - ■CE13 - ■■T2	P01	23
	17,0	20	141	1,8	50,72	2KJ1501 - ■CE13 - ■■S2	P01	23
	19,5	23	122	2,0	44,00	2KJ1501 - ■CE13 - ■■R2	P01	23
	<b>B.38-LA71S4</b>							
	21	25	116	2,2	65,69	2KJ1501 - ■CD13 - ■■U2		23
	<b>B.28-LA71S4</b>							
	24	29	102	1,3	57,53	2KJ1500 - ■CD13 - ■■D2		11
	28	34	86	1,5	48,51	2KJ1500 - ■CD13 - ■■C2		11
	31	37	76	1,7	43,07	2KJ1500 - ■CD13 - ■■B2		11
	36	43	67	1,9	37,76	2KJ1500 - ■CD13 - ■■A2		11
	40	48	60	2,2	33,79	2KJ1500 - ■CD13 - ■■X1		11
	45	54	53	2,5	29,99	2KJ1500 - ■CD13 - ■■W1		11
	51	61	46	2,8	26,28	2KJ1500 - ■CD13 - ■■V1		11
	58	70	41	3,2	23,11	2KJ1500 - ■CD13 - ■■U1		11
	65	78	37	3,5	20,87	2KJ1500 - ■CD13 - ■■T1		11
	74	89	32	4,0	18,19	2KJ1500 - ■CD13 - ■■S1		11
	83	100	29	4,5	16,34	2KJ1500 - ■CD13 - ■■R1		11
	92	110	26	5,0	14,75	2KJ1500 - ■CD13 - ■■Q1		11
	101	121	24	5,5	13,38	2KJ1500 - ■CD13 - ■■P1		11
	111	133	22	6,0	12,17	2KJ1500 - ■CD13 - ■■N1		11
	125	150	19	6,8	10,76	2KJ1500 - ■CD13 - ■■M1		11

**PIÑONES  
3/4 (60)**

**TABLA DE DIMENSIONES  
DE LOS PIÑONES INTERMEC PASO 3/4" (19.05 mm)  
para Cadena ANSI No. 60 Tipo B Sencillos, Dobles y Triples**

Ref.	D	SENCILLOS			Ref.	DOBLES			Ref.	TRIPLES		
		Dm	L	d		Dm	L	d		Dm	L	d
60B9 R	63,8	40	32	19,05	60-2B9R	42	54	19,05	60-3B9	42	77	25,40
60B10 R	70,1	49	32	19,05	60-2B10R	48	54	19,05	60-3B10	48	77	25,40
60B11 R	76,2	52	32	19,05	60-2B11	46	54	25,40	60-3B11	46	77	25,40
60B12 R	82,6	60	32	19,05	60-2B12	54	54	25,40	60-3B12	54	77	25,40
60B13	88,6	60	32	19,05	60-2B13	57	54	25,40	60-3B13	57	77	25,40
60B14	95,0	65	32	19,05	60-2B14	63	54	25,40	60-3B14	63	77	25,40
60B15	101,1	73	32	19,05	60-2B15	71	54	25,40	60-3B15	71	77	25,40
60B16	107,2	78	32	19,05	60-2B16	76	54	25,40	60-3B16	76	77	25,40
60B17	113,3	82	32	19,05	60-2B17	82	54	25,40	60-3B17	82	77	25,40
60B18	119,4	89	32	19,05	60-2B18	89	54	25,40	60-3B18	89	77	25,40
60B19	125,5	89	32	19,05	60-2B19	94	54	25,40	60-3B19	94	77	25,40
60B20	131,8	98	32	19,05	60-2B20	95	54	25,40	60-3B20	95	77	25,40
60B21	137,9	102	32	19,05	60-2B21	105	54	25,40	60-3B21	105	77	25,40
60B22	144,0	102	32	19,05	60-2B22	108	54	25,40	60-3B22	108	77	25,40
60B23	150,1	102	32	19,05	60-2B23	108	54	25,40	60-3B23	108	77	25,40
60B24	156,2	102	32	19,05	60-2B24	108	54	25,40	60-3B24	108	77	25,40
60B25	162,3	102	32	19,05	60-2B25	108	54	25,40	60-3B25	108	77	25,40
60B26	168,4	102	32	19,05	60-2B26	108	54	25,40	60-3B26	108	77	25,40
60B27	174,5	102	32	19,05	60-2B27	108	54	25,40	60-3B27	108	77	25,40
60B28	180,6	102	32	19,05	60-2B28	108	54	25,40	60-3B28	108	77	25,40
60B29	186,6	102	32	19,05	60-2B29	108	54	25,40	60-3B29	108	77	25,40
60B30	192,8	102	32	19,05	60-2B30	108	54	25,40	60-3B30	108	77	25,40
60B31	198,6	102	32	19,05	60-2B31	114	60	25,40	60-3B31	114	82	31,75
60B32	204,7	102	32	19,05	60-2B32	114	60	31,75	60-3B32	114	82	31,75
60B33	210,8	102	32	25,40	60-2B33	114	60	31,75	60-3B33	114	82	31,75
60B34	216,9	102	32	25,40	60-2B34	114	60	31,75	60-3B34	114	82	31,75
60B35	223,0	101	32	25,40	60-2B35	114	60	31,75	60-3B35	114	82	31,75
60B36	229,1	102	32	25,40	60-2B36	114	60	31,75	60-3B36	114	82	31,75
60B37	235,2	102	32	25,40	60-2B37	114	60	31,75	60-3B37	114	82	31,75
60B38	241,3	108	32	25,40	60-2B38	114	60	31,75	60-3B38	114	82	31,75
60B39	247,4	108	32	25,40	60-2B39	114	60	31,75	60-3B39	114	82	31,75
60B40	253,5	108	32	25,40	60-2B40	118	70	31,75	60-3B40	118	89	31,75
60B41	259,5	108	32	25,40	60-2B41	118	70	31,75	60-3B41	118	89	31,75
60B42	265,7	108	32	25,40	60-2B42	118	70	31,75	60-3B42	118	89	31,75
60B43	271,7	108	32	25,40	60-2B43	118	70	31,75	60-3B43	118	89	31,75
60B44	277,9	108	32	25,40	60-2B44	118	70	31,75	60-3B44	118	89	31,75
60B45	284,0	108	32	25,40	60-2B45	118	70	31,75	60-3B45	118	89	31,75
60B46	289,8	108	44	25,40	60-2B46	118	70	31,75	60-3B46	118	89	31,75
60B47	295,9	108	44	25,40	60-2B47	118	70	31,75	60-3B47	118	89	31,75
60B48	302,1	108	44	25,40	60-2B48	118	70	31,75	60-3B48	118	89	31,75