



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“Diseño y construcción de un calentador solar cilíndrico  
parabólico con fines investigativos para la Escuela de  
Ingeniería Mecánica”**

**Arellano Mancheno, Víctor Paolo;  
Chamorro Páez, Alexis Leonardo**

# **TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Previa a la obtención del Título de:**

## **INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2017**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2017-07-12

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

**ARELLANO MANCHENO VÍCTOR PAOLO**

Titulado:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR  
CILÍNDRICO PARABÓLICO CON FINES INVESTIGATIVOS PARA LA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Carlos Santillán Mariño  
**DECANO FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Edwin Viteri  
**DIRECTOR**

---

Ing. Otto Balseca  
**MIEMBRO**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2017-07-12

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

**CHAMORRO PÁEZ ALEXIS LEONARDO**

Titulado:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR  
CILÍNDRICO PARABÓLICO CON FINES INVESTIGATIVOS PARA LA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Carlos Santillán Mariño  
**DECANO FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Edwin Viteri  
**DIRECTOR**

---

Ing. Otto Balseca  
**MIEMBRO**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** ARELLANO MANCHENO VÍCTOR PAOLO

**TRABAJO DE TITULACIÓN:** “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO CON FINES INVESTIGATIVOS PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA”

**Fecha de Examinación:** 2017-07-12

### RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Geovanny Novillo <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Edwin Viteri <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Otto Balseca <b>MIEMBRO</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Geovanny Novillo  
**PRESIDENTE TRIB. DEFENSA**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** CHAMORRO PAÉZ ALEXIS LEONARDO

**TRABAJO DE TITULACIÓN:** “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO CON FINES INVESTIGATIVOS PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA”

**Fecha de Examinación:** 2017-07-12

### RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Geovanny Novillo <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Edwin Viteri <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Otto Balseca <b>MIEMBRO</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. Geovanny Novillo  
**PRESIDENTE TRIB. DEFENSA**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El Trabajo de Titulación que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Arellano Mancheno Víctor Paolo**

---

**Chamorro Páez Alexis Leonardo**

## **DECLARACION DE AUTENTICIDAD**

Nosotros, Arellano Mancheno Víctor Paolo y Chamorro Páez Alexis Leonardo, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

---

**Arellano Mancheno Víctor Paolo**

Cédula de Identidad: 0603576034

---

**Chamorro Páez Alexis Leonardo**

Cédula de Identidad: 0604353474

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a Dios, a la Virgen de Agua Santa quienes supieron guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a enfrentar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento, a mi padres que siempre me apoyaron y me guiaron por el buen camino, a mi hermanos a mis familiares y amigos.

**Arellano Mancheno Víctor Paolo**

Dedico este trabajo principalmente a la Virgen Dolorosa, por haberme ayudado durante toda mi carrera, por haberme dado fuerzas cuando el camino se tornaba difícil, y por haber guiado mis pasos para cumplir con mis objetivos.

A mi madre Adriana, por haber sido la persona que me sacó adelante, guiándome siempre para convertirme en un hombre de bien, y dándome todo su apoyo y amor para no dejarme caer. A mis abuelitos Washington y Laura que siempre estuvieron pendientes de mí en todo momento, brindándome su apoyo incondicional y su cariño.

**Chamorro Páez Alexis Leonardo**



## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, a la Virgen María, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorar cada día más.

A mis padres por haberme acompañado y velado por mí durante toda mi carrera universitaria, por haberme motivado para culminar mi carrera profesional.

A mi director de proyecto de titulación, a mi director y asesor, al Ing. Edwin Viteri, al Ing. Otto Balseca, quienes me brindaron su apoyo incondicional

**Arellano Mancheno Víctor Paolo**

Agradezco a la Virgen Dolorosa por darme fortaleza, salud, vida y una gran familia que me supo brindar todo el cariño y confianza para ver culminada una meta muy importante en mi vida.

A mi madre y mis abuelitos quienes fueron mi gran motivación día tras día para seguir adelante y por quienes logre este triunfo tan significativo.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por entregarme tanto conocimientos como valores que me han convertido en una nueva persona, un profesional que pueda servir y ser útil a la sociedad.

Agradezco al Ing. Edwin Viteri, al Ing. Otto Balseca, por brindarme su amistad y asesoramiento en el presente trabajo de titulación, sin cuyo conocimiento y apoyo, no se habría podido culminar exitosamente este anhelado proyecto.

**Chamorro Páez Alexis Leonardo**

## RESUMEN

Los altos niveles de contaminación mundial producida en su mayoría por la quema de combustibles fósiles, han motivado al desarrollo de energías alternativas por lo tanto se realizó el diseño y la construcción de un calentador solar cilíndrico parabólico con fines investigativos para la Escuela de Ingeniería Mecánica. El presente trabajo pretende ser un punto de partida para futuras investigaciones dentro del área. Para el diseño y construcción se analizaron investigaciones de autores, y mencionan que hay tres elementos principales que son: El tubo absorbedor, el reflector solar y el sistema de seguimiento. Se utilizó el método de análisis de alternativas para escoger los materiales más adecuados para cada uno de los elementos. El primero está formado por dos tubos concéntricos, el interno absorbe el calor y el externo permite el paso de luz y evita las pérdidas por convección. Este tubo se ubicó en el punto focal de la parábola donde recibe los rayos solares provenientes del reflector, el cual debe tener un alto índice de reflectividad. El sistema de seguimiento debe mantener perpendicular el calentador con respecto al Sol. El calentador solar calienta hasta los 70°C aproximadamente en 7 minutos cuando se tiene de mayor índice de radiación, siendo la capacidad aproximada de 40 litros de agua caliente al día. Se realizó la modelación matemática del sistema de calentamiento en la cual se obtuvo un gradiente de temperatura en el sentido longitudinal, sin considerar la distribución térmica en el área efectiva del sistema por facilidades de cálculo. Finalmente se analizó el calentamiento de agua a distintas velocidades, se obtuvo a que a una menor velocidad hay un mayor aumento en la temperatura. Se recomienda limpiar el reflector para no perder eficiencia en el calentador y realizar la modelación en sentido radial, y analizar nuevos materiales con mejores propiedades.

PALABRAS CLAVES: <ENERGÍAS ALTERNATIVAS>, <CALENTADOR SOLAR>, <CILÍNDRICO PARABÓLICO>, <TUBO ABSORBEDOR>, <REFLECTOR SOLAR>, <SISTEMA DE SEGUIMIENTO>, <MODELACIÓN MATEMÁTICA>.

## SUMMARY

The high levels of world contamination produced mostly by the burning of fossil fuels, have motivated the development of energies; therefore the design and construction of a solar cylindrical parabolic heater were carried out with investigation purposes for the Mechanical Engineering School. The present work is intended to be a starting point for the future investigations within the area. For the design and construction, investigations by authors were analyzed mentioning that there are three main elements which are: the absorbing pipe, the solar reflector and the follow-up system. The method of analysis of alternatives was used to choose the most adequate materials for each element. The first one is formed by two concentric pipes, the internal absorbs heat and the external one allows the light pass and avoids the convection losses. This pipe was placed in the focal point of the parable where it receives the solar rays from the reflector, which must have a high reflectivity index. The follow-up system must maintain perpendicular the heater as to the sun. The solar heater heats up to approximately 70 °C, in seven minutes when there is the higher radiation index, the approximate capacity being 40 liters of hot water a day. The heating system mathematical modelling was carried out in which a temperature gradient was obtained in the longitudinal sense, without considering the thermal distribution in the effective area of the system because of calculus facilities. Finally, the water heating was analyzed at different speeds. It was obtained that at a lower speed there is an increase in the temperature. It is recommended to clean the reflector so as to not to lose the efficiency in the heater, and carry out the modelling in the radial sense, and analyze new materials with better properties.

KEY WORDS: <ALTERNATING ENERGIES>, <SOLAR HEATER>, <CYLINDRIC PARABOLIC>, <ABSORBING PIPE>, <SOLAR REFLECTOR>, <FOLLOW-UP SYSTEM>, <MATHEMATICAL MODELLING>.

# CONTENIDO

## RESUMEN

## SUMMARY

### 1. INTRODUCCIÓN

1.1.	Antecedentes.....	1
1.2.	Formulación del problema.....	2
1.3.	Justificación.....	2
1.4.	Alcance.....	3
1.5.	Objetivos.....	3
1.5.1.	<i>Objetivo general</i> .....	3
1.5.2.	<i>Objetivos específicos</i> .....	3

### 2. MARCO REFENCIAL

2.1.	Energía Solar.....	4
2.2.	Aplicaciones de la energía solar.....	5
2.3.	Radiación Solar (Definiciones y características).....	5
2.3.1.	<i>Tipos de Radiación Solar</i> .....	6
2.3.2.	<i>Insolación</i> .....	7
2.3.3.	<i>Cálculo de la Insolación en cualquier sitio del planeta</i> .....	8
2.4.	Formas de Transferencia de Calor en Colectores Solares.....	9
2.4.1.	<i>Conducción</i> .....	9
2.4.2.	<i>Convección</i> .....	10
2.4.3.	<i>Radiación</i> .....	10
2.5.	Captadores Solares Generalidades.....	11
2.5.1.	<i>Clasificación de los colectores solares</i> .....	11
2.5.1.1.	<i>Factor de concentración</i> .....	12
2.5.1.2.	<i>Aprovechamiento Solar</i> .....	13
2.6.	Rendimiento óptico del colector cilíndrico parabólico.....	14

2.6.1.	<i>Reflectividad de la superficie</i> .....	16
2.6.2.	<i>Factor de intercepción</i> .....	16
2.6.3.	<i>Transmisividad de la tubería de vidrio</i> .....	16
2.6.4.	<i>Absortividad del tubo absorbedor</i> .....	16
2.6.5.	<i>Rendimiento Óptico</i> .....	17
2.7.	Colector de tubos al vacío.....	17
2.8.	Concentrador Solar Cilindro Parabólico.....	18
2.8.1.	<i>Reflector cilíndrico parabólico</i> .....	20
2.8.2.	<i>Tubo absorbedor</i> .....	21
2.8.3.	<i>Sistema de seguimiento</i> .....	22
2.9.	Tecnologías solares.....	22
2.10.	Diseño metodológico.....	23
2.10.1.	<i>Proceso de diseño según HALL</i> .....	23
2.10.2.	<i>Proceso de diseño según Díaz</i> .....	24
2.10.3.	<i>Proceso de diseño según Shigley</i> .....	26
2.10.4.	<i>Proceso de diseño según Mott</i> .....	27
2.11.	Diseño metodológico del Calentador Solar Cilíndrico Parabólico.....	28
<b>3.</b>	<b>DISEÑO DEL CALENTADOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO</b>	
3.1.	Reconocimiento de la necesidad.....	31
3.2.	Análisis de Alternativas.....	31
3.2.1.	<i>Reflector Solar</i> .....	33
3.2.2.	<i>Tubo absorbedor</i> .....	33
3.2.2.1.	<i>Tubo absorbedor (externo)</i> .....	34
3.2.2.2.	<i>Tubo absorbedor (interno)</i> .....	34
3.2.3.	<i>Pintura</i> .....	35
3.2.4.	<i>Sistema de seguimiento solar</i> .....	35
3.2.5.	<i>Controlador</i> .....	37
3.3.	Soluciones para la Construcción del Colector Solar Cilíndrico Parabólico.....	38

3.4.	Evaluación y Selección.....	39
3.4.1.	<i>Criterios de evaluación del módulo.....</i>	39
3.5.	Cálculos.....	41
3.5.1.	<i>Cálculo estructural.....</i>	41
3.5.2.	<i>Cálculo mecánico.....</i>	44
3.5.2.1.	<i>Torque.....</i>	44
3.5.2.2.	<i>Contrapeso.....</i>	47
3.5.2.3.	<i>Selección del motor.....</i>	48
3.5.2.4.	<i>Selección de la cadena del sistema de seguimiento solar.....</i>	50
3.5.3.	<i>Análisis Térmico.....</i>	54
3.5.3.1.	<i>Cálculo del tiempo de calentamiento del fluido estancado en el tubo absorbedor hasta la temperatura de 70 °C .....</i>	54
3.5.3.2.	<i>Cálculo del incremento de temperatura del fluido cuando atraviesa el tubo absorbedor a diferentes temperaturas .....</i>	63
3.5.3.3.	<i>Eficiencia térmica del calentador solar cilíndrico parabólico.....</i>	65
3.5.3.4.	<i>Tanque de almacenamiento.....</i>	65
3.5.3.5.	<i>Pérdidas térmicas en el tanque de almacenamiento.....</i>	72
3.5.3.6.	<i>Análisis del tiempo de decrecimiento de la temperatura en el tanque.....</i>	77
3.6.	Modelación matemática que permite encontrar el perfil de temperaturas en sentido longitudinal del tubo absorbedor.....	79
3.7.	Programación.....	86
3.8.	Diagrama eléctrico.....	86
3.9.	Ubicación del colector solar.....	86
3.10.	Resultado Final Colector Solar Cilíndrico Parabólico.....	88
<b>4.</b>	<b>PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO</b>	
4.1.	Resultados de los parámetros geométricos del colector solar cilíndrico parabólico.....	89
4.2.	Resultados de la Insolación en la ciudad de Riobamba.....	90

4.3.	Resultados del análisis térmico.....	96
4.3.1.	<i>Resultados experimentales y teóricos del tiempo de calentamiento de agua hasta 70°C.....</i>	96
4.3.2.	<i>Resultados del análisis térmico para calcular el tiempo de calentamiento con una radiación de 997 W/m<sup>2</sup>.....</i>	99
4.3.3.	<i>Resultados del incremento de temperatura del agua a diferentes velocidades.....</i>	102
4.3.4.	<i>Resultados del análisis térmico para calcular el incremento de temperatura con una velocidad de 0,034 m/s.....</i>	104
4.3.5.	<i>Resultados del perfil de temperatura en el tubo absorbedor en régimen estacionario.....</i>	107
4.4.	Resultados de la comparación entre el colector solar cilíndrico parabólico y el colector solar de tubos al vacío.....	109
4.4.1.	<i>Comparación del tiempo de calentamiento de agua entre el colector solar de tubos al vacío y el colector solar cilíndrico parabólico.....</i>	109
4.4.2.	<i>Comparación de la eficiencia máxima y eficiencia promedio entre el colector solar de tubos al vacío y el colector solar cilíndrico parabólico.....</i>	112
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1.	Conclusiones.....	116
5.2.	Recomendaciones.....	117
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>7.</b>	<b>ANEXOS</b>	

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1-2	Radiación solar en la ciudad de Riobamba según la página de la NASA.....	5
Tabla 2-2	Materiales reflectantes.....	20
Tabla 3-2	Tecnologías solares con concentración solar.....	23
Tabla 4-3	Especificaciones del calentador solar cilíndrico parabólico.....	31
Tabla 5-3	Soluciones para cada módulo.....	38
Tabla 6-3	Evaluación de criterios.....	39
Tabla 7-3	Evaluación del peso específico de Eficiencia.....	40
Tabla 8-3	Evaluación del peso específico del nivel de automatización.....	40
Tabla 9-3	Evaluación de peso específico del nivel de ergonomía.....	40
Tabla 10-3	Evaluación de peso específico del nivel de materiales.....	40
Tabla 11-3	Evaluación de peso específico del nivel del sistema de seguimiento.....	41
Tabla 12-3	Pesos de los elementos del calentador.....	41
Tabla 13-3	Peso de elementos.....	47
Tabla 14-3	Selección del motor – trifásico.....	49
Tabla 15-3	Selección de catalinas.....	52
Tabla 16-3	Tiempo de enfriamiento de agua a diferentes temperaturas.....	78
Tabla 17-4	Parámetros Geométricos del Colector Solar Cilíndrico Parabólico.....	89
Tabla 18-4	Radiación directa en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.....	90
Tabla 19-4	Valores de Radiación efectiva por unidad de área en el colector.....	92
Tabla 20-4	Ángulo de elevación para diferentes horas del día.....	93
Tabla 21-4	Tiempo de calentamiento de agua teórico con diferentes medidas de radiación.....	100
Tabla 22-4	Incremento de temperatura a diferentes velocidades de fluido.....	106
Tabla 23-4	Resultado perfil de temperatura.....	108
Tabla 24-4	Datos técnicos y experimentales de un tubo al vacío.....	109



Tabla 25-4	Volumen alcanzado por cada uno de los colectores.....	111
Tabla 26-4	Eficiencia del colector solar cilíndrico parabólico durante las diferentes horas del día.....	113
Tabla 27-4	Eficiencia energética de colector con tubos al vacío.....	114

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1	Calentador solar cilíndrico parabólico.....	2
Figura 2-2	Capacidad mundial de captadores solares para calentamiento de agua....	4
Figura 3-2	Tipos de radiación.....	7
Figura 4-2	Sistema de seguimiento solar a un eje.....	14
Figura 5-2	Sistema de seguimiento solar a dos ejes.....	14
Figura 6-2	Parámetros ópticos del concentrador solar cilíndrico parabólico.....	15
Figura 7-2	Colector con tubos al vacío.....	18
Figura 8-2	Concentrador solar cilíndrico parabólico.....	19
Figura 9-2	Calentador solar cilíndrico parabólico.....	19
Figura 10-2	Tubo absorbedor.....	21
Figura 11-2	Esquema del sistema de seguimiento solar.....	22
Figura 12-2	Proceso de diseño.....	24
Figura 13-2	Proceso de diseño con sus requerimientos y resultados esperados.....	25
Figura 14-2	Fases del proceso de diseño.....	27
Figura 15-2	Pasos en el proceso de diseño.....	28
Figura 16-3	Esquema del colector solar cilíndrico parabólico.....	32
Figura 17-3	Motor paso a paso.....	36
Figura 18-3	Motorreductor.....	36
Figura 19-3	Actuador lineal eléctrico.....	37
Figura 20-3	PLC.....	37
Figura 21-3	Arduino.....	38
Figura 22-3	Geometría.....	42
Figura 23-3	Deformación total de estructura.....	43
Figura 24-3	Esfuerzo equivalente (Von Misses).....	43
Figura 25-3	Factor de seguridad.....	44
Figura 26-3	Variables colector solar.....	45

Figura 27-3	Esquema colector solar, sumatoria de fuerzas.....	48
Figura 28-3	Acoplamiento cadena y catalina.....	50
Figura 29-3	Transmisión por cadena.....	51
Figura 30-3	Flujos de transferencia de calor para el balance energético para el tubo absorbedor.....	55
Figura 31-3	Esquema del tubo absorbedor.....	61
Figura 32-3	Esquema colector solar.....	64
Figura 33-3	Determinación gráfica del diámetro del tanque de almacenamiento.....	68
Figura 34-3	Determinación del factor A.....	70
Figura 35-3	Determinación del factor B.....	71
Figura 36-3	Sección transversal del depósito cilíndrico.....	73
Figura 37-3	Modelación Matemática.....	80
Figura 38-3	Ganancia de calor en sentido radial en el tubo absorbedor.....	85
Figura 39-3	Elemento infinitesimal en la sección transversal del tubo absorbedor....	85
Figura 40-3	Ganancia de calor en x en el elemento infinitesimal.....	85
Figura 41-3	Sistema de Seguimiento Solar de un Solo Eje.....	86
Figura 42-3	App Compass.....	87
Figura 43-3	Procedimiento de ubicación del calentador.....	87
Figura 44-3	Calentador Solar Cilíndrico Parabólico.....	88
Figura 45-4	Insolación de la ciudad de Riobamba.....	91
Figura 46-4	Posiciones del colector solar a diferentes horas.....	94
Figura 47-4	Posición inicial.....	95
Figura 48-4	Posición final.....	95
Figura 49-4	Tiempo de calentamiento de agua hasta 70°C a diferentes horas del día.....	101
Figura 50-4	Porcentaje de Apertura de la Válvula de Paso.....	106
Figura 51-4	Incremento de temperatura a diferentes velocidades de fluido.....	107

Figura 52-4	Gradientes de temperatura en función de la longitud del tubo en régimen estacionario.....	108
Figura 53-4	Calentador solar de tubos al vacío.....	110
Figura 54-4	Incremento de temperatura que experimenta el fluido dentro del tubo, inclinación 45°.....	111
Figura 55-4	Comparación de volumen alcanzado de agua entre el colector solar de tubos al vacío y el colector solar cilíndrico parabólico.....	112
Figura 56-4	Comparación de la eficiencia del calentador solar cilíndrico parabólico y del colector solar de tubos al vacío durante las diferentes horas del día.....	114

## **ABREVIACIONES**

GLP Gas Licuado de Petróleo

CSCP Calentador Solar Cilíndrico Parabólico

NASA National Aeronautics and Space Administration (La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio)

ASME American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)

CSCP Calentador Solar Cilíndrico Parabólico

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	Catalogo LAFERT, motor trifásico, página 18
ANEXO B	Catalogo Challenge, Piñones para transmisión, página 112
ANEXO C	Programación
ANEXO D	Diagrama eléctrico
ANEXO E	Propiedades de agua saturada
ANEXO F	Propiedades del aire a presión de 1 atm

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

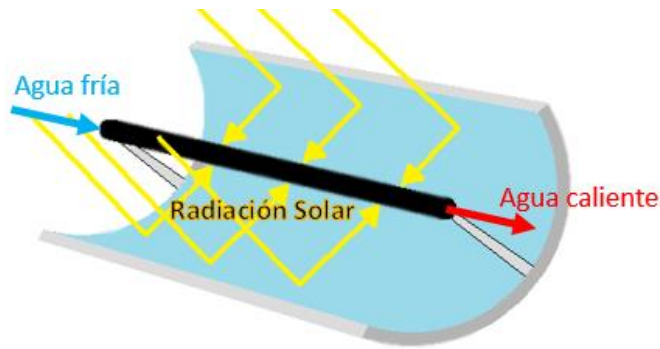
A lo largo de los años ha habido un incremento considerable de contaminación debido a la industrialización de procesos y actividades humanas, en su mayoría por la quema de combustibles fósiles, por lo que ha llevado a realizar investigaciones en el área de las energías alternativas. Dentro de las energías alternativas más utilizadas está la energía solar, eólica, hidráulica, todas éstas provenientes de recursos renovables como: el sol, el viento y el agua respectivamente. La principal fuente de energía calórica y con la que se dispone durante todo el año es el Sol, usado en varios países para generación eléctrica y calentamiento de agua. Los países que más energía solar utilizan son Alemania, China, Italia, Japón, Estados Unidos, España. Todos estos países tienen como objetivo que para el año 2030, el 90% de la energía sea proveniente de recursos naturales, para reducir el impacto ambiental. (New Energy, 2015)

Dentro de los calentadores solares se han desarrollado diferentes tecnologías que evitan al máximo las fugas de calor, esto se produce debido al acoplamiento de paneles que envuelven al tanque almacenador de líquido, de esta manera se evita la pérdida de calor por convección, de modo que el calentador funciona como un termo-tanque. (Hernández Echeverría, 2012 pág. 6). Investigadores diseñan calentadores solares más eficientes y económicos, con lo cual se desea mejorar el aprovechamiento al calentar el agua, la primera fue cambiar los tubos circulares por tubos elípticos, así se logró incrementar en 46% el área de captación de energía, (Arias, 2012).

En Ecuador, se ha venido realizando nuevos proyectos para el aprovechamiento de la energía solar para la obtención de energía eléctrica, según un balance de energía realizado por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad en abril del 2017, la energía solar representa 0,32% de la energía total producida, generando 26,48 MW. (Agencia de regulación y control de electricidad, 2017)

En la ciudad de Riobamba las dos principales fuentes para calentar agua son: calefones con bombonas de propano y butano, y las duchas eléctricas. Los calefones emiten gases contaminantes a la atmósfera producto de la combustión, en cambio una ducha eléctrica posee una baja eficiencia. Parte de aquí la necesidad de desarrollar calentadores solares eficientes, seguros, y sobre todo de bajo impacto ambiental. Como se mencionó, en la ciudad se ven calentadores solares planos con tubos al vacío, estos llegan a calentar el agua hasta los 70°C a una velocidad promedio de 4°C/minuto, la eficiencia de estos calentadores es de alrededor del 50%. (Echeverría López, 2011)

Figura 1-1.- Calentador solar cilíndrico parabólico



Fuente: (Energía Solar, 2015)

La ciudad de Riobamba tiene un porcentaje promedio de radiación de 4,48 [kWh/m<sup>2</sup>], (NASA, 2016) debido a su ubicación geográfica junto al volcán Chimborazo el cual es el punto más cercano al Sol. Esto hace que el uso de calentadores solares sea de mucha aplicación aquí en la ciudad obteniendo buenos resultados.

## 1.2. Formulación del problema

La energía solar cada vez es un tema de mayor interés dentro del área de ingeniería debido a que se busca reducir la emisión de gases contaminantes producto de la quema de combustibles fósiles que están causando graves daños ambientales especialmente con el efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono.

Los calentadores solares son una solución a la lucha contra la contaminación que emiten los calentadores tradicionales (GLP, diésel). Su única fuente de energía es la solar que es una fuente inagotable, y gratuita. Dependiendo de la ubicación geográfica emite mayor nivel de radiación lo cual eleva la eficiencia en los calentadores.

En la Escuela de Ingeniería Mecánica no se cuenta con un banco de pruebas para realizar este tipo de estudios, la idea del presente trabajo de titulación es dotar de un calentador solar cilíndrico parabólico para que a futuro se sigan realizando estudios con base a la energía solar.

## 1.3. Justificación

El calentador solar cilíndrico parabólico funciona netamente con energía solar la cual es una fuente inagotable y gratuita, por medio de este proyecto se demostrará que se puede dejar de lado los sistemas de calentamiento de agua tradicionales como las duchas eléctricas o calefones. En el presente trabajo de titulación se justifica en base a la Constitución del Ecuador, Sección II artículo 15, que menciona: “El estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias, y de energías alternativas no contaminantes y de bajo



impacto”, de acuerdo a lo mencionado el trabajo de titulación contribuirá para posteriores investigaciones y desarrollo de dispositivos con base en energía solar. Además en la ciudad de Riobamba no se han realizado investigaciones acerca de los calentadores solares cilíndricos.

#### **1.4. Alcance**

El presente trabajo de titulación se enfoca principalmente en la captación y generación de calor hacia un fluido, en este caso agua. Se cuantifica el volumen de agua aproximado que puede llegar a calentarse a la temperatura de 70 grados centígrados por día, para ello se realiza el diseño estructural, térmico y óptico, además del diseño y automatización del sistema de seguimiento solar.

Para la modelación matemática está limitada a un sistema de análisis en estado estable, al considerar la complejidad del análisis en estado transitorio, dejando abierto el camino para futuros proyectos o trabajos de titulación.

#### **1.5. Objetivos**

##### **1.5.1. *Objetivo general***

Diseñar y construir un calentador solar cilíndrico parabólico, con fines investigativos para la Escuela de Ingeniería Mecánica.

##### **1.5.2. *Objetivos específicos***

Diseñar el sistema de calentamiento que permita incrementar el volumen de agua de los calentadores cilíndricos parabólicos por medio de un sistema de seguimiento solar, útil para ensayos termodinámicos.

Realizar la modelación matemática del sistema de calentamiento de agua.

Construir el sistema de calentamiento de agua.

Experimentar el incremento de temperatura del agua en función de la velocidad de ingreso.

Experimentar el tiempo de calentamiento de agua en función de la radiación solar.

Realizar una comparación, entre un colector cilíndrico parabólico y un colector de tubos al vacío.

## CAPÍTULO II

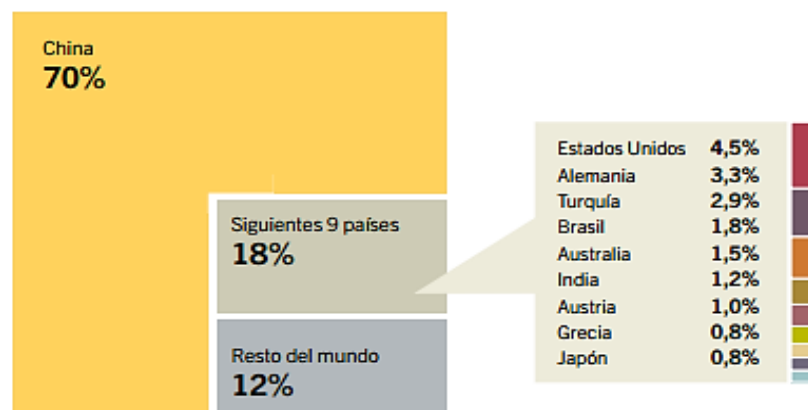
### 2. MARCO REFENCIAL

#### 2.1. Energía Solar

La fuente de energía por excelencia en la tierra es la energía solar (Jiménez Arias , y otros, 2009). Está es una energía renovable, inagotable y no contaminante que poco a poco ha venido siendo objeto de investigación para su desarrollo y aplicación en la industria y en la vida cotidiana de las personas.

En la figura 2-2 se visualiza que China es el país con la mayor capacidad de desarrollo de calentadores de agua a nivel mundial, seguido por Estados Unidos, Alemania, Turquía.

Figura 2-2.- Capacidad mundial de captadores solares para calentamiento de agua



Fuente: (Williamson, 2015)

La energía solar es la que llega a la tierra en forma de luz, calor y rayos ultravioleta procedentes del Sol, donde se ha generado por un proceso de fusión nuclear. Cada año el Sol arroja sobre la tierra cuatro mil veces más energía que la que se consume, lo que demuestra que esta fuente energética está aún poco explotada en relación a sus posibilidades.

La Tierra recibe  $1,7 * 10^{14}$  [kW] de energía solar térmica, lo cual es equivalente a la potencia eléctrica de 170 millones de reactores solares nucleares de 10000 veces el consumo energético mundial. (Jiménez Arias , y otros, 2009 pág. 26)

Si bien la energía solar se ve como una solución para disminuir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, sus altos costos han hecho que esta industria se vea afectada, en un mundo tan competitivo donde interesa vender más, y el costo es una variable determinante para la decisión del consumidor final.

## 2.2. Aplicaciones de la energía solar

Con el uso de diferentes materiales apropiados y en diferentes sistemas se pueden obtener diferentes aplicaciones, en el trabajo de titulación realizado por Enrique Benavides (2006), se mencionan las siguientes aplicaciones:

- *Directa.*- Es la energía que llega directamente al planeta, por ejemplo en la iluminación de campos.
- *Térmica.*- En este caso se logra el aprovechamiento por medio del calentamiento de algún medio sea agua, aceite, sales, aire.
- *Fotovoltaica.*- Se consigue por medio de celdas fotoeléctricas, convierten la luz solar en energía eléctrica.
- *Potabilización de agua.*- Mediante diferentes variantes se puede obtener agua potable a partir de agua contaminada. Esto sería de mucha aplicación en zonas rurales que no tienen acceso mediante alcantarillado al agua potable. (Benavides Salcedo, 2006 pág. 55)

## 2.3. Radiación solar (Definiciones y características)

La radiación solar es el flujo de energía que recibe el planeta del Sol, esta se encuentra en formas de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. La luz visible es la radiación comprendida entre 0,4 y 0,7  $\mu\text{m}$ , que pueden ser detectadas por el ojo humano. Existen radiaciones situadas en la parte infrarroja cuya longitud de onda comprende los 760 – 780 nm del espectro de la cual una parte es ultravioleta (100 – 360 nm). (Orbea Samaniego, y otros, 2014)

La irradiancia es la magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra por unidad de tiempo y área, su unidad es  $[\text{W}/\text{m}^2]$ . En la tabla 1-2 muestra el valor promedio de radiación solar diaria en la ciudad de Riobamba según la NASA. En el mes de noviembre se observa el mayor índice de radiación.

Tabla 1-2.- Radiación solar en la ciudad de Riobamba según la página de la NASA

Mes	Temperatura Aire	Humedad relativa	Radiación solar diaria-horizonta
	$^{\circ}\text{C}$	%	$\text{kWh}/\text{m}^2/\text{d}$
enero	16,6	80,7%	4,39
Febrero	16,6	82,2%	4,46
Marzo	16,9	80,5%	4,64

abril	16,6	80,1%	4,45
mayo	16,1	76,2%	4,26
junio	15,5	72,0%	4,23
julio	15,7	61,8%	4,32
agosto	16,8	54,8%	4,64
septiembre	17,8	55,2%	4,62
octubre	18,2	59,9%	4,61
noviembre	17,5	70,2%	4,70
diciembre	16,9	79,3%	4,45
	16,8	71,1%	4,48

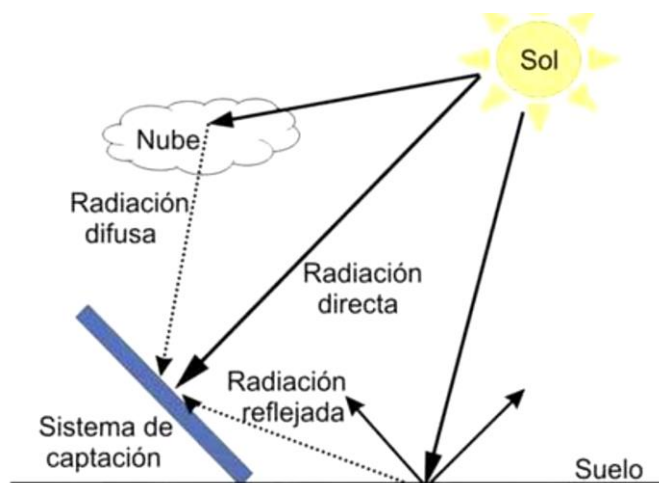
Fuente: (NASA, 2016)

### 2.3.1. Tipos de radiación solar

Los tipos de radiación son directa, difusa, terrestre o de albedo y total. Se ha tomado del trabajo realizado por César Echeverría (2011).

- *Radiación directa:* es la que se recibe directamente desde el sol en línea recta, sin que se desvíe en su paso por la atmósfera.
- *Radiación difusa:* es la radiación que llega a la superficie de la tierra con un cambio de dirección al pasar por la atmósfera terrestre. Este desvío de los rayos solares, se produce por el choque directo con ciertas moléculas y partículas contenidas en el aire, por este motivo, los rayos solares no tienen una dirección directa. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro, aún de día, como sucede por ejemplo con la luna.
- *Radiación terrestre, reflejada o de albedo:* es la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que refleja una pared blanca, un charco o un lago, etc.
- *Radiación total:* es la suma de todas las radiaciones, directa, difusa y albedo, en caso de que se trabaje cerca del mar o de otras superficies reflectantes como nevados se considerará la radiación por albedo además de la radiación directa y difusa. Un caso particular, pero de mucho interés práctico en el estudio de la energía solar, es el medir la radiación total sobre una superficie horizontal “viendo” hacia arriba. (Echeverría López, 2011 pág. 13).

Figura 3-2.- Tipos de radiación



Fuente: (Echeverría López, 2011 pág. 14)

En la figura 3-2, se resume los tipos de radiación que se presentan en el ambiente. En sistemas de calentamiento solar son de mayor interés la radiación directa y difusa debido a la nubosidad presente en cada región.

### 2.3.2. *Insolación*

La cantidad de energía solar incidente en la superficie de la tierra en un lugar determinado se conoce como insolación.

La cantidad de energía incidente por cada metro cuadrado de superficie en un segundo en un lugar que está ubicado perpendicularmente respecto a la radiación solar, es decir con un ángulo latitudinal de incidencia de  $0^\circ$ , en un día claro, es de  $1000 \text{ [J/m}^2\text{]}$ . (Nahle Sabag, 2011 pág. 9)

La energía recibida por la Tierra en la capa más externa de la atmósfera se la denomina Constante Solar y tiene un valor aproximado de  $1368 \text{ J}$  (Nahle Sabag, 2011). Esa cantidad de energía que ingresa en la atmósfera terrestre es atenuada por absorción, reflexión y dispersión difusa.

La atenuación de la energía solar que entra en la atmósfera terrestre se realiza de la siguiente forma:

- Aproximadamente, el 30% de la energía entrante es reflejada hacia el espacio exterior por las nubes, el polvo suspendido y los aerosoles. Esto causa una reducción de la Constante Solar igual a  $410.4 \text{ [J]}$ , quedando una energía entrante de solamente  $957.6 \text{ [J]}$ .

- Aproximadamente, el 14% de la energía restante 957.6 [J] es absorbida por el ozono en la estratósfera, el vapor de agua en la tropósfera, el polvo y los aerosoles 134.064 [J]. La cantidad restante que continúa su trayectoria hacia la superficie es de 823.536 [J].
- Aproximadamente, el 7% de la energía restante 823.536 [J] es dispersada por difusión hacia el espacio exterior, quedando únicamente 765.9 [J] de energía solar, la cual es la energía incidente sobre la superficie de la Tierra. (Nahle Sabag, 2011 pág. 9)

### 2.3.3. Cálculo de la insolación en cualquier sitio del planeta

Según el trabajo de investigación de Nasif Nahle (2011), la insolación en cualquier sitio del planeta viene dada por la fórmula 1:

$$I = S * \cos(Z) \quad (1)$$

Donde:

*I*: Insolación que se desea conocer en cualquier sitio del planeta [W/m<sup>2</sup>]

*S*: Flujo de potencia solar en la superficie terrestre [1000W/m<sup>2</sup>]

*Z*: Valor del ángulo Zenith que se obtiene al considerar la hora del día, el ángulo de incidencia solar y la latitud [grados]

Para calcular el valor del ángulo Zénith se usa la fórmula 2:

$$Z = \cos^{-1}(\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos H) \quad (2)$$

Donde:

*Z*: Valor del ángulo Zénith [grados]

$\phi$ : Ángulo entre la radiación directa sobre la superficie y la normal a la superficie, es el valor de la latitud de la localidad [grados]

$\delta$ : Ángulo de declinación solar y que depende del día del año solar [grados]

*H*: Es el ángulo por la hora del día [grados]

El cálculo de *H* se lo efectúa mediante la siguiente expresión matemática:

$$H = (Hora\ local - 12\ hr) * 15^\circ \quad (3)$$

El ángulo de declinación solar  $\delta$ , es la posición angular del sol al medio día con respecto al plano del Ecuador, se calcula mediante la siguiente formula:

$$\delta = -23.45^\circ * \cos \left[ \left( \frac{360^\circ}{365.25} \right) * (N + 10) \right] \quad (4)$$

Donde:

$\delta$  : Angulo de declinación solar [grados]

$N$ : Número del día del año considerando un año de 365.25 días. (Nahle Sabag, 2011 pág. 10)

## 2.4. Formas de transferencia de calor en colectores solares

Los fenómenos de transferencia de calor que se observa dentro de los colectores solares son la conducción, la convección y la radiación.

### 2.4.1. Conducción

Modo de transferencia de calor debido a un gradiente de temperatura, desde una región de alta temperatura hacia una de baja temperatura dentro de un cuerpo sólido, esto se conoce como transferencia de calor por conducción, y viene dada la ecuación de la Ley de Fourier de la conducción:

$$q = -k * A * \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5)$$

Donde:

$q$ : Flujo de calor [W]

$A$ : Área transversal del flujo de calor [m<sup>2</sup>]

$k$ : Conductividad térmica del material [W/mK]

$\frac{\partial T}{\partial x}$ : Gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor [K/m] (Cengel, y otros, 2011 pág. 18)

Dependiendo del valor de la conductividad térmica del material, este puede ser clasificado desde materiales conductores hasta aislantes térmicos. En un colector solar térmico se utilizan ambos

tipos de materiales para el cumplimiento de los requerimientos del aprovechamiento solar eficiente.

#### **2.4.2. Convección**

Es una de las tres formas de transmisión de calor que se produce por movimiento de un fluido, debido a las diferencias de densidad causadas por la temperatura (convección libre o natural).

Esta transferencia de calor es propia de líquidos y gases, se produce entre un sólido y un líquido o entre un sólido y un gas, y depende mucho de la rapidez del campo de velocidad a la que un fluido se lleva el calor.

La fórmula 6 es la que se utiliza para el cálculo de la convección se basa en la Ley de Enfriamiento de Newton:

$$q = h * A * (T_S - T_{\infty}) \quad (6)$$

Donde:

$h$ : Coeficiente de transferencia de calor que depende de la composición del fluido, la geometría de la superficie del sólido y del tipo de movimiento del fluido [W/m<sup>2</sup>K]

$A$ : Área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección [m<sup>2</sup>]

$T_S$ : Temperatura en la superficie [K]

$T_{\infty}$ : Temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie [K] (Cengel, y otros, 2011 pág. 27)

#### **2.4.3. Radiación**

La radiación es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, es decir el calor puede transmitirse a través de zonas donde exista un vacío perfecto, esto significa que no se requiere un medio de transporte, este fenómeno se lo conoce como radiación térmica o electromagnética.

Todo cuerpo caliente emite radiación en cualquier dirección, y a su vez esta radiación puede ser absorbida, transmitida o reflejada por otro cuerpo. El sol es un claro ejemplo de cuerpo emisor de radiación, en este tipo de transferencia no hay intercambio de masa.



$$q = \varepsilon * \sigma * T^4 * A \quad (7)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Emisividad [0 - 1]

$\sigma$ : Constante de proporcionalidad de Stefan-Boltzman [ $5,669 * 10^{-8} W/m^2K^4$ ]

$T$ : Es la temperatura absoluta del cuerpo [K]

$A$ : Área de superficie [ $m^2$ ] (Cengel, y otros, 2011 pág. 29)

Estas tres formas de transferencia de calor se encuentran presentes en el calentador solar cilindro parabólico, debido a que interviene la radiación solar, para que por medio de un tubo receptor se dé la conducción de calor al fluido, además se utiliza una cubierta de vidrio para evitar las pérdidas de calor por convección.

## 2.5. Captadores solares generalidades

Un colector de energía solar es un tipo de intercambiador de calor, ya que capta la radiación solar y la transforma en energía interna para transmitirla a un fluido (agua, aire, aceite, etc.) o a un recipiente ya sea por convección o conducción. (Kalogirou, 2004 pág. 10)

El principal componente de estos sistemas solares es el captador solar que absorbe toda la radiación solar, luego la convierte en calor y así transfiere ese calor a un fluido que pasa a través del colector solar.

Las aplicaciones que pueden llegar a tener los colectores solares son muy variadas debido a los diferentes rangos de temperatura que pueden alcanzar dependiendo del tipo de captador solar. Entre las aplicaciones más comunes están: la obtención de vapor para la generación de energía eléctrica, el calentamiento de agua para uso doméstico e industrial y para calefacción.

En este capítulo se detalla los diferentes tipos de colectores solares que existen y las características que cada uno de ellos poseen, haciendo un mayor énfasis en el calentador solar cilindro parabólico ya que este trabajo de titulación estudia este captador como elemento principal.

### 2.5.1. Clasificación de los colectores solares

Existen muchos tipos de colectores solares por lo que se los puede clasificar de distintas formas, en esta sección se detalla la siguiente clasificación:

- Factor de concentración

- Aprovechamiento solar

#### 2.5.1.1. *Factor de concentración*

Existen 2 tipos de captadores solares: los que no concentran imagen o estacionarios, y los que son concentradores de imagen o con seguimiento solar. La diferencia entre este tipo de colectores es que los no concentradores de imagen tienen la misma área de intercepción y de absorción de la radiación solar, mientras que los concentradores de imagen tienen una superficie reflectante cóncava para interceptar la radiación, de esta manera la radiación es redirigida a un área de recepción mucho más pequeña, por lo tanto el flujo de radiación aumenta. (Kalogirou, 2004 pág. 10)

El factor de concentración (C) es la relación entre el área de apertura del concentrador y el área de apertura del receptor. Se debe tener claro que el concentrador es aquel que dirige la radiación del sol hacia el receptor, mientras que el receptor es aquel que absorbe la radiación y la transforma en otro tipo de energía. (Paredes , 2012 pág. 19). Puede ser definida por:

$$C = \frac{\text{Área de apertura}}{\text{Área de absorción}} \quad (8)$$

Dependiendo del valor del factor de concentración los colectores se dividen en dos clases, aquellos que poseen concentración igual a uno y aquellos que poseen concentración mayor a uno:

- *Concentración igual a 1 (C=1)*

Estos tipos de colectores son aquellos en que su área de apertura es igual a su área de absorción, es decir dentro de este grupo entran los captadores solares que no concentran imagen, los principales son los colectores de placa plana y los colectores de tubos al vacío. (Echeverría López, 2011 pág. 40)

- *Concentración mayor a 1 (C>1)*

Los colectores que entran dentro de este grupo son los que concentran imagen, entre ellos tenemos: colector cilindro parabólico, colector parabólico compuesto, colector de disco parabólico, sistemas de torre central. (Echeverría López, 2011 pág. 40)

Además dentro de los captadores concentradores de imagen existe una clasificación: los colectores que captan la radiación en un solo eje, es decir en dos dimensiones, un ejemplo de esto es el captador cilíndrico parabólico. Y también se tiene los colectores que captan la radiación solar en un solo punto, es decir tres dimensiones, por lo cual pueden llegar a obtener mayores valores de concentración, como por ejemplo los sistemas de torre central y los colectores de disco parabólico.

#### 2.5.1.2. *Aprovechamiento solar*

El aprovechamiento solar quiere decir, como el sistema de calentamiento aprovecha la luz solar a lo largo del día. Para ello es necesario un sistema de seguimiento el cual seguirá al sol durante las horas de mayor radiación, ubicándolo perpendicular a la posición del sol. Comúnmente estos sistemas son más utilizados en los sistemas con concentración mayor a 1, debido a que su área de absorción es mucho menor que su área de apertura. Se clasifica en colectores estacionarios y colectores con seguimiento:

- *Colectores estacionarios*

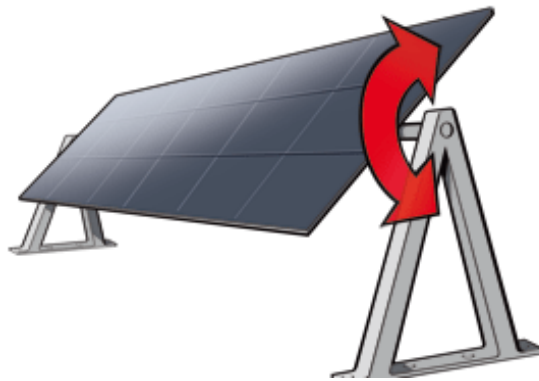
Los colectores estacionarios se mantienen fijos a lo largo del día, es característico de los colectores de tubos al vacío y de placa plana, se encuentra a un ángulo capaz de cubrir la declinación del sol desde el solsticio de verano hasta el solsticio de invierno (Echeverría López, 2011 pág. 44). Debido a que su factor de concentración es igual a 1, por este motivo no requieren un sistema de seguimiento, además trabajan a bajas temperaturas en un rango de 40 a 90 grados centígrados.

- *Colectores con seguimiento solar*

Característicos de los colectores con concentración como los calentadores solares cilíndricos parabólicos, discos fresnel, debido a que el área de absorción es menor requiere que estos sistemas estén perpendicular al sol y así llegar a mayores temperaturas en un rango de 90 a 400 grados centígrados.

El seguimiento solar puede ser de un eje o dos ejes:

Figura 4-2.- Sistema de seguimiento solar a un eje



Fuente: (Solar Choice, <https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>)

Figura 5-2.- Sistema de seguimiento solar a dos ejes



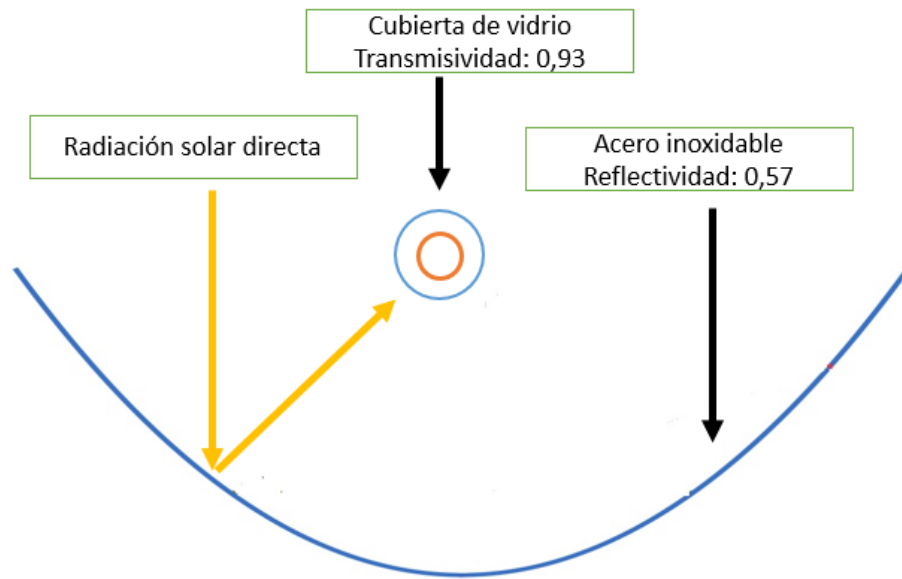
Fuente: (Solar Choice, <https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>)

Por medio de la figura 4-2 y 5-2 se muestra el tipo de movimiento que se puede dar en los colectores solares.

## 2.6. Rendimiento óptico del colector cilíndrico parabólico

En un concentrador solar cilíndrico parabólico siempre van a existir pérdidas de diversa índole, como pueden ser las térmicas, ópticas o geométricas. En este apartado se va analizar las pérdidas ópticas que existen en el sistema, debido a que no toda la radiación solar logra llegar al tubo absorbedor debido a distintos factores como una mala ubicación del colector, fallas en el sistema de seguimiento, deformidad en el reflector y principalmente de características propias de los materiales como la reflectividad, la absorptividad y la transmisividad.

Figura 6-2.- Parámetros ópticos del concentrador solar cilíndrico parabólico



Fuente: (Autores)

La radiación por unidad de área que finalmente tiene el colector debido a todos estos factores puede ser descrita mediante la siguiente expresión:

$$R = I\rho\gamma\tau\kappa \quad (9)$$

Donde:

$R$ : Radiación efectiva [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$I$ : Radiación directa [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\rho$ : Reflectividad de la superficie concentradora [adimensional]

$\alpha$ : Absortividad del tubo receptor [adimensional]

$\gamma$ : Factor de intercepción [adimensional]

$\tau$ : Transmisividad del tubo de vidrio [adimensional]

$\kappa$ : Factor de modificación del ángulo de incidencia [adimensional]

### **2.6.1. *Reflectividad de la superficie***

La reflectividad es la cantidad de radiación que refleja una superficie. Este valor depende en su mayoría del material que se vaya a usar, siendo las superficies cubiertas de una capa de un fino espejo las de mayor efectividad.

### **2.6.2. *Factor de intercepción***

Se lo define como la fracción de radiación que incide en la superficie que absorbe del receptor. Muchas veces los rayos reflejados no llegan a tocar al tubo absorbedor debido a una mala posición del colector o a una mala ubicación del tubo, ya que muchas veces el receptor es colocado en el foco teórico que se calcula de la parábola, pero la ubicación del mismo debe ser experimental, ubicándose en el foco real donde que se recibe la mayor radiación posible.

El valor del factor de intercepción varía entre el 90% y 95%. (Llorente Sánchez, 2015 pág. 36)

### **2.6.3. *Transmisividad de la tubería de vidrio***

La cubierta de vidrio que se coloca alrededor de la tubería de cobre cumple varias funciones, entre las más importantes está reducir las pérdidas térmicas por convección y radiación que se producen en el sistema y además protegen al tubo absorbedor de las inclemencias climatológicas que se pueden producir en las diferentes épocas del año.

El material de la cubierta es de Borosilicato un tipo particular de vidrio que tiene óxidos de boro y de silicio. La transmisividad se la define como el cociente entre la cantidad de radiación que pasa a través de la cubierta y la que incide sobre ella. Generalmente los valores para este tipo de materiales son mayores al 92%. (Benavides Salcedo, 2006 pág. 99)

### **2.6.4. *Absortividad del tubo absorbedor***

Este parámetro se define como la capacidad que tiene el tubo receptor para absorber la radiación que incide sobre él. Este valor depende del tipo de material o de algún proceso al que se someta el tubo para aumentar la absortividad. Su valor varía del 90 al 96 %. (Llorente Sánchez, 2015 pág. 35)

### 2.6.5. Rendimiento óptico

Mediante los valores de los parámetros descritos anteriormente es posible calcular el rendimiento óptico que tiene el colector mediante la siguiente expresión.

$$\eta = \rho\tau\Upsilon\alpha \quad (10)$$

Donde:

$\eta$ : Rendimiento óptico [adimensional]

$\rho$ : Reflectividad de la superficie concentradora [adimensional]

$\Upsilon$ : Factor de intercepción [adimensional]

$\alpha$ : Absortividad del tubo receptor [adimensional]

A continuación se explicará los diferentes tipos de colectores estacionarios y colectores que concentran imagen, existentes en el mercado.

### 2.7. Colector de tubos al vacío

Este tipo de captadores solares alcanza temperaturas mayores que los captadores de placa plana, esto se logra gracias a que los tubos absorbedores que se utilizan evitan pérdidas de calor por convección al ambiente debido al vacío que existe entre el tubo de cobre y el de vidrio. Estos tubos reemplazan al vidrio transparente usado en los captadores de placa plana. Su principio de funcionamiento se basa en el efecto termosifón, en el cual, el agua se calienta dentro del tubo, está disminuye su densidad y tiende a subir y colocarse por encima del agua fría, y de esta forma el agua caliente se almacena en un tanque aislado térmicamente para su posterior uso doméstico de ser el caso, se los aísla generalmente con poliuretano. Los tubos de vacío están compuestos por un doble tubo de vidrio (borosilicato), entre cuyas paredes se hace un vacío muy elevado un valor aproximado a los 0,005 [Pa], y el vidrio interior suele llevar un tratamiento a base de metal pulverizado color negro para aumentar la absorción de radiación. Las dimensiones de los tubos son similares a las de un tubo fluorescente; en torno a los 60 [mm] de diámetro y 1800 [mm] de largo. Una ventaja de los colectores con tubos al vacío es debido a la forma cilíndrica del tubo, ya que reciben los rayos solares perpendicularmente durante todo el día, a diferencia de los colectores planos que son más eficientes cuando tienen al sol perpendicular (Ibarra Salazar, y otros, 2012 pág. 24). Se puede observar la disposición de este colector y de sus elementos constitutivos en la figura 7-2:

Figura 7-2.- Colector con tubos al vacío



1. Tubos de cristal al alto vacío
2. Exterior de Acero Inoxidable
3. Aislamiento térmico
4. Tanque de acero inoxidable
5. Cubiertas laterales de acero inoxidable
6. Entradas para tubos al vacío
7. Paneles reflectores de acero inoxidable
8. Estructuras de acero inoxidable
9. Soporte para tubos de acero inoxidable

Fuente: (Ecosolar, <http://gunicornio.ecosolar1.com/cgi-bin/md/M10012/s1.pl>)

## 2.8. Concentrador solar cilindro parabólico

El Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico pertenece a la familia de los concentradores de imagen. Este tipo de calentador solar posee tres elementos fundamentales que son: un reflector curvo en forma de paraboloides, un tubo absorbedor y un sistema de seguimiento solar. La función del reflector cilindro parabólico es reflejar y concentrar sobre el tubo absorbedor la radiación solar directa que incide sobre su superficie. Se trata en definitiva de un espejo curvado en una de sus dimensiones con forma de parábola, que concentra sobre su línea focal toda la radiación solar que atraviesa el plano de abertura. La superficie reflectora generalmente se consigue a base de películas o planchas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da la suficiente rigidez. El tubo absorbedor es aquel que recibe todos los rayos que son direccionados por medio del reflector para posteriormente conducir a un fluido. El tubo debe tener características de conductividad, absorptividad y transmisividad, en sus elementos que son la tubería interna, el recubrimiento, y la tubería externa respectivamente. El sistema de seguimiento solar permite aprovechar al máximo la radiación solar a lo largo del día, se deberá colocar de norte a sur, y el movimiento será de este a oeste, además en este sistema deberá poseer un sistema de transmisión sea por banda o por cadena. (Ibarra Salazar, y otros, 2012 pág. 25)



Figura 8-2.- Concentrador solar cilíndrico parabólico



Fuente: ([http://tecno.iesvegadelturia.es/apuntes/tecind1/Tema\\_3/solar.html](http://tecno.iesvegadelturia.es/apuntes/tecind1/Tema_3/solar.html))

Los calentadores solares cilíndricos parabólicos debido a su forma parabólica poseen una línea focal, por esta pasa una tubería que contiene el líquido, puede ser agua o algún tipo de aceite térmico, teóricamente llegan a calentar hasta los 400 [°C] (Hom, y otros, 2004 pág. 6). Debido a su forma cóncava en la cual los rayos solares que chocan en el receptor se direccionan hasta la línea focal, actualmente su uso se enfoca en la industria y la generación de electricidad.

Los calentadores solar cilíndrico parabólicos están compuestos de una superficie reflectiva, un tubo absorbedor, el fluido, y un sistema electro mecánico que permite el seguimiento solar. Generalmente, para la superficie del colector se usa una placa metálica pulida o una placa de aluminio con una película reflejante.

Figura 9-2. Calentador solar cilíndrico parabólico



Fuente: (Energía Solar Térmica, 2010)

A continuación se detallan los componentes del sistema según el trabajo realizado por Carmen Paredes (2012):

### 2.8.1. Reflector cilíndrico parabólico

Este tiene como función reflejar y dirigir sobre su línea focal la radiación solar. Es importante que esta superficie este limpia para lograr una mejor eficiencia, dentro de los materiales que más se usan son el aluminio, el acero inoxidable, los espejos, estos poseen un alto grado de reflectividad. En la tabla 2-2 se visualiza los materiales reflectantes existentes siendo los más eficientes los de aluminio y los espejos de vidrio, pero también tienen un costo mayor que los otros materiales.

Tabla 2-2.- Materiales reflectantes

MATERIAL	REFLECTIVIDAD	MATERIAL	REFLECTIVIDAD
PVC blanco	0,871	Fibra de vidrio pintada de blanco	0,709
Aluminio de alta reflectividad (verde)	0,839	Espejo de vidrio 2mm	0,795
Al de alta reflectividad (rosado)	0,853	Espejo de vidrio 3mm	0,754
Al de alta reflectividad (celeste)	0,820	Espejo de vidrio 4mm	0,712
Chapadur prepintado blanco	0,741	Acero inoxidable	0,572
Chapa galvanizada	0,588	Mylar (Cuba)	0,833
Chapa pintada de blanco nueva	0,582	Papel de aluminio (Cuba)	0,799
Chapa pintada de blanco envejecida	0,656		

Fuente: (Echazú, y otros pág. 2)

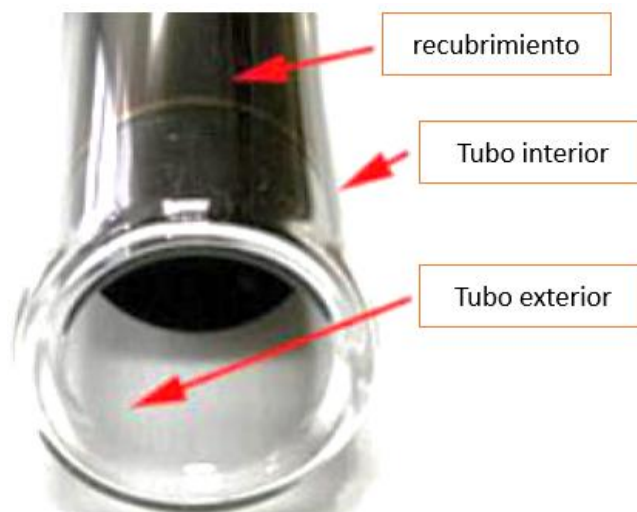
### 2.8.2. *Tubo absorbedor*

“Su función es la de convertir la radiación solar concentrada en un aumento de la energía térmica del fluido de trabajo” (Llorente Sánchez, 2015 pág. 49). Es un elemento fundamental en el sistema, ya que la eficiencia del sistema principalmente radica en la calidad termodinámica del absorbente. Puede constar de un solo tubo o dos tubos concéntricos. Al interior consta de un tubo metálico de elevada absorptividad y baja emisividad, lo que se traduce en un elevado rendimiento térmico. El tubo exterior es de cristal y tiene como objetivo reducir las pérdidas por convección del tubo metálico y también lo protege de las condiciones meteorológicas adversas. Para temperaturas por debajo de 300 grados centígrados, se puede usar un tubo de acero recubierto ya sea con cobalto o cromo. Por lo general se usan dos tubos concéntricos uno de metal y el otro de vidrio debido a las condiciones al que se expone y para lograr una mayor eficiencia, en el medio se consigue un vacío.

El tubo receptor debido a que está expuesto a la radiación no se lo puede aislar, ahí es donde interviene el vidrio y se consigue un efecto invernadero. El vidrio utilizado en estos sistemas es de Borosilicato, ya que tiene una alta transparencia y pérdidas por reflexión bajas. (Llorente Sánchez, 2015 pág. 50)

Se busca utilizar un tubo de cobre cubierto por una capa de pintura de color negro para aumentar su absorptividad, y evitar la reflectividad y por ende la pérdida de calor. Además se puede utilizar un tubo de vidrio para evitar las pérdidas de calor, ya que logra un efecto invernadero sobre el tubo absorbedor y así lograr mayores temperaturas en menor tiempo. El tubo de vidrio protege ante factores externos como polvo, suciedad, piedras.

Figura 10-2.- Tubo absorbedor

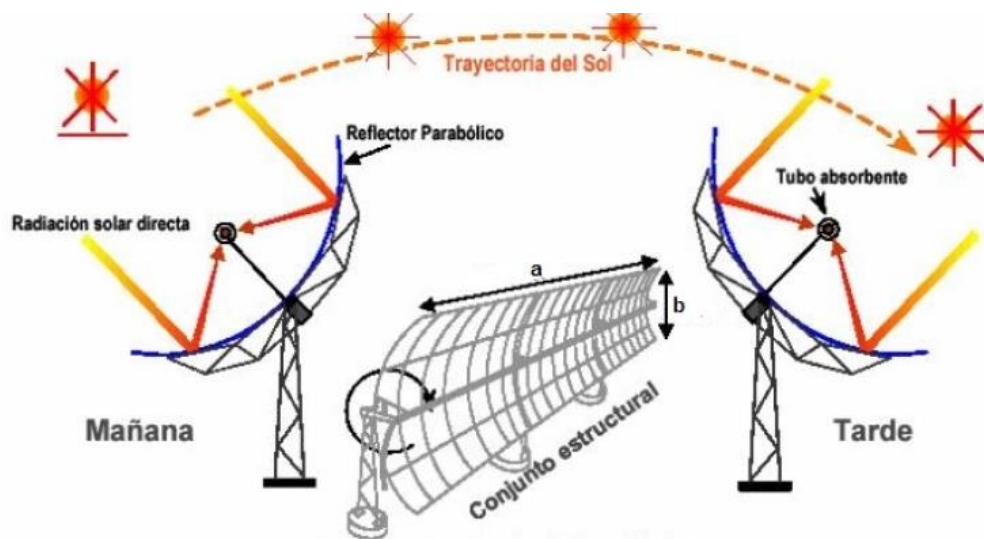


Fuente: (Alibaba, <https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-heat-absorbing-three-target-glass-vacuum-solar-tube-1427502913.html>)

### 2.8.3. Sistema de seguimiento solar

Mediante el sistema de seguimiento solar se consigue aprovechar al máximo las horas de exposición solar, y así poder mejorar en la eficiencia del calentador. Los calentadores solares cilíndricos parabólicos pueden tener dos ejes o un único eje. Los mecanismos de accionamiento que mueven al colector pueden ser eléctricos, hidráulicos o mecánicos.

Figura 11-2.- Esquema del sistema de seguimiento solar



Fuente: (Paredes , 2012 pág. 14)

En la figura 11-2 se observa el sistema de seguimiento a lo largo del día, por medio de un sistema de transmisión que permite el seguimiento solar.

## 2.9. Tecnologías solares

En la tabla 3-2 se resume los tipos de tecnologías solares con concentración solar.

Tabla 3-2.- Tecnologías solares con concentración solar

Tipo de receptor \ Tipo de foco		Foco Lineal	Foco Puntual
		El colector sigue al sol con un sistema simple de ejes y concentra la radiación a lo largo de una línea. El sistema de seguimiento es más simple	Los colectores siguen al sol con dos ejes concentrando la radiación en un punto. Se alcanzan mayores temperaturas.
<b>Fijo</b>	Los receptores fijos son sistemas estacionarios que son independientes del sistema de enfoque de la planta, permite un mejor transporte de calor hacia el bloque de potencia.	<b>Reflectores lineales Fresnel</b>	<b>Concentración en torre (CSP)</b>
<b>Móvil</b>	Los receptores móviles se mueven junto con el sistema de enfoque. Tanto en el foco lineal como el puntal se concentra mayor energía.	<b>Canales parabólicos (PTC)</b>	<b>Discos parabólicos con motor Stirling</b>

Fuente: (Serrano García, 2012 pág. 23)

## 2.10. Diseño metodológico

En el presente capítulo se analizará el proceso de diseño que proponen varios autores con el objetivo de elegir el más apropiado o hacer una combinación de varios procesos, para el diseño del calentador solar cilíndrico parabólico.

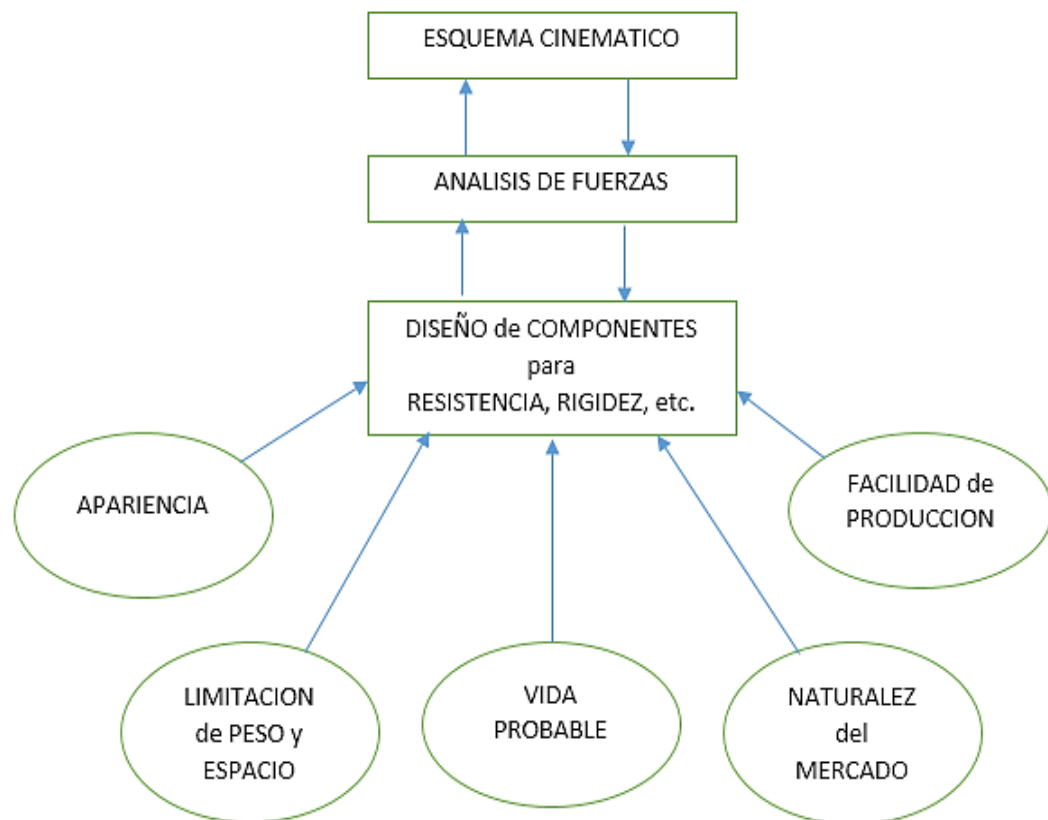
### 2.10.1. Proceso de diseño según HALL

El autor propone los siguientes pasos para realizar el diseño:

- a) Reconocer una necesidad y establecerla en términos generales. Esto quiere decir definir el problema.
- b) Realizar varios esquemas para resolver el problema y seleccionar uno para analizarlo con mayor profundidad. Los estudios de factibilidad son característicos de este paso del proceso.
- c) Realizar un diseño preliminar de la máquina, estructura, sistema o proceso seleccionado. Esto nos permite determinar las especificaciones para los componentes principales.
- d) Realizar el diseño de todas las componentes y preparar todos los dibujos necesarios y las especificaciones detalladas.

Se explica que después de haber establecido las especificaciones de la máquina se debe hacer un esquema o esqueleto de la máquina. Luego se realiza un análisis de fuerzas incompleto debido a que aún no se conoce las masas de las partes móviles. Con esta información se puede diseñar o seleccionar los componentes tentativamente ya que no se conoce las fuerzas con exactitud. Posterior a esto puede hacerse un análisis más exacto y un diseño más refinado. (Hall, y otros, 1971 pág. 1)

Figura 12-2.- Proceso de diseño

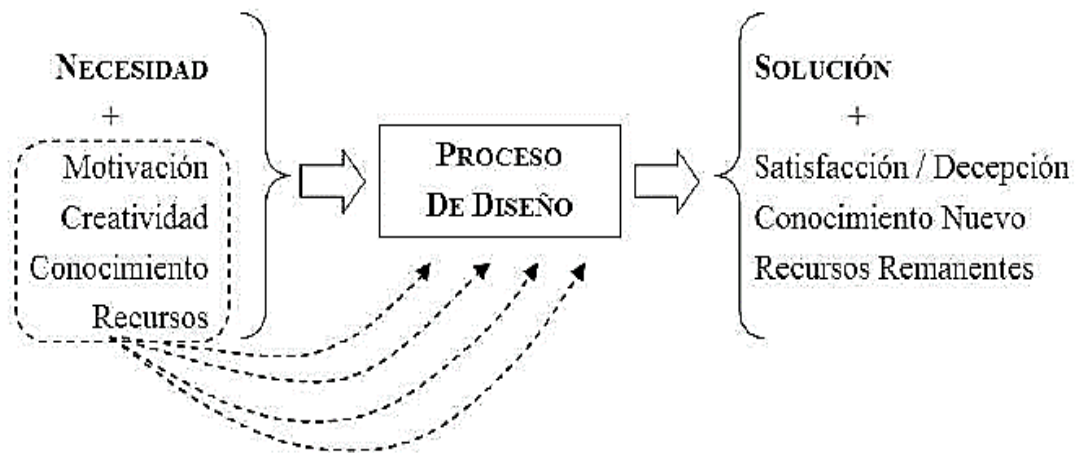


Fuente: (Hall, y otros, 1971 pág. 1)

### 2.10.2. Proceso de diseño según Díaz

El autor define a este proceso como una secuencia de pasos lógicos que sigue el diseñador a partir de datos de entradas para encontrar una solución ingenieril práctica y eficiente que satisfaga un problema. (Díaz, 2011 pág. 2)

Figura 13-2.- Proceso de diseño con sus requerimientos y resultados esperados



Fuente: (Diaz, 2011 pág. 2)

Los pasos a seguir para realizar un diseño óptimo que propone el autor son los siguientes:

- Diseño Preliminar
  - Planteamiento inicial de la necesidad
  - Revisión de estado del arte del problema
  - Recolección de datos cuantitativos y cualitativos
  - Definición del problema
  
- Diseño Básico
  - División en subsistemas
  - Planteamiento de alternativas de división de subsistemas
  - Selección de alternativas de solución
  - Integración de subsistemas
  
- Diseño de detalle
  - Selección de elementos comerciales
  - Síntesis y análisis de piezas manufacturadas
  - Integración de elementos y subsistemas
  - Planos de ensamble y de taller

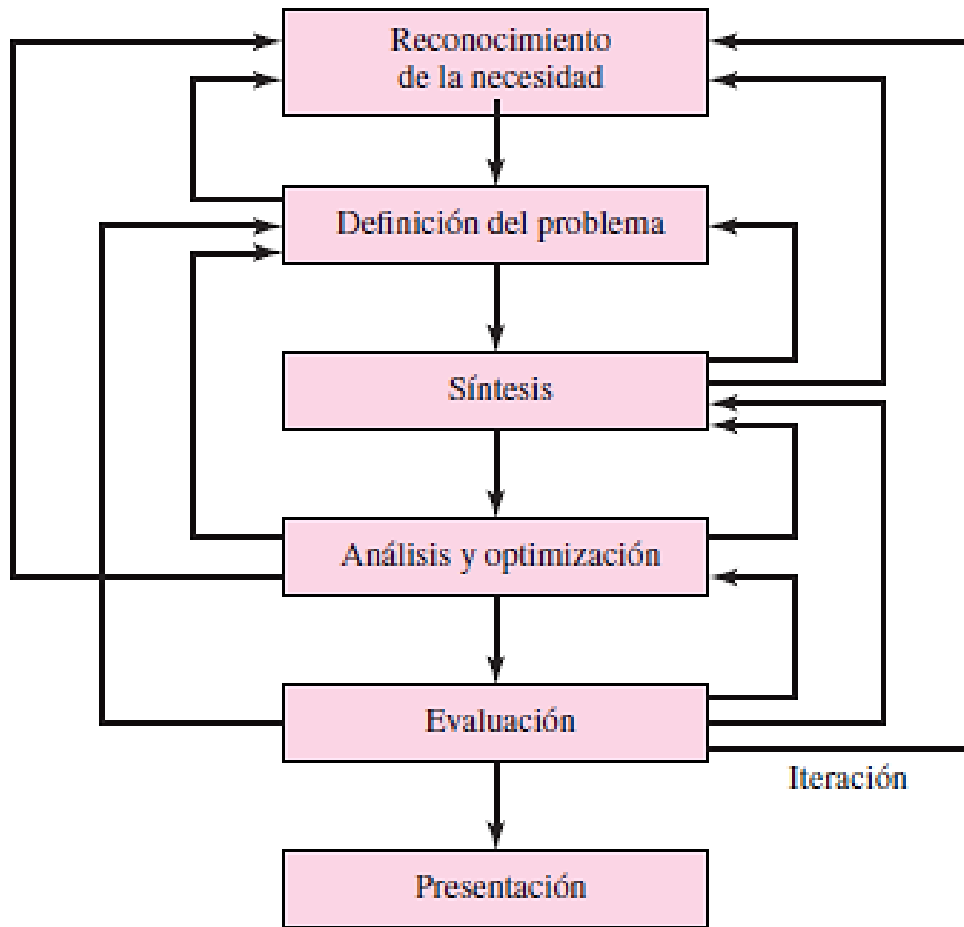
- Prototipos y pruebas
  - Prototipos: virtuales (CAD 3D, CAE, CAM) y reales
  - Pruebas estáticas y dinámicas
  - Retroalimentación
  
- Diseño definitivo
  - Planos definitivos: detalle, taller, ensamble y explosión
  - Diseño de detalles estéticos y especificación de acabados
  - Construcción de la pieza en serie
  
- Comunicación
  - Bitácora de diseño
  - Memorias de cálculo y planos
  - Manuales de instalación, operación y mantenimiento
  - Patente y registro comercial
  - Catálogos comerciales

### **2.10.3. *Proceso de diseño según Shigley***

El autor explica en su libro que cualquier proceso de diseño empieza con la identificación de una necesidad y la decisión de hacer algo al respecto. Luego se realiza muchas iteraciones hasta encontrar la solución al problema. Las fases del proceso de diseño que propone Shigley se muestran a continuación. (Budynas, y otros, 2008 pág. 6)



Figura 14-2.- Fases del proceso de diseño.



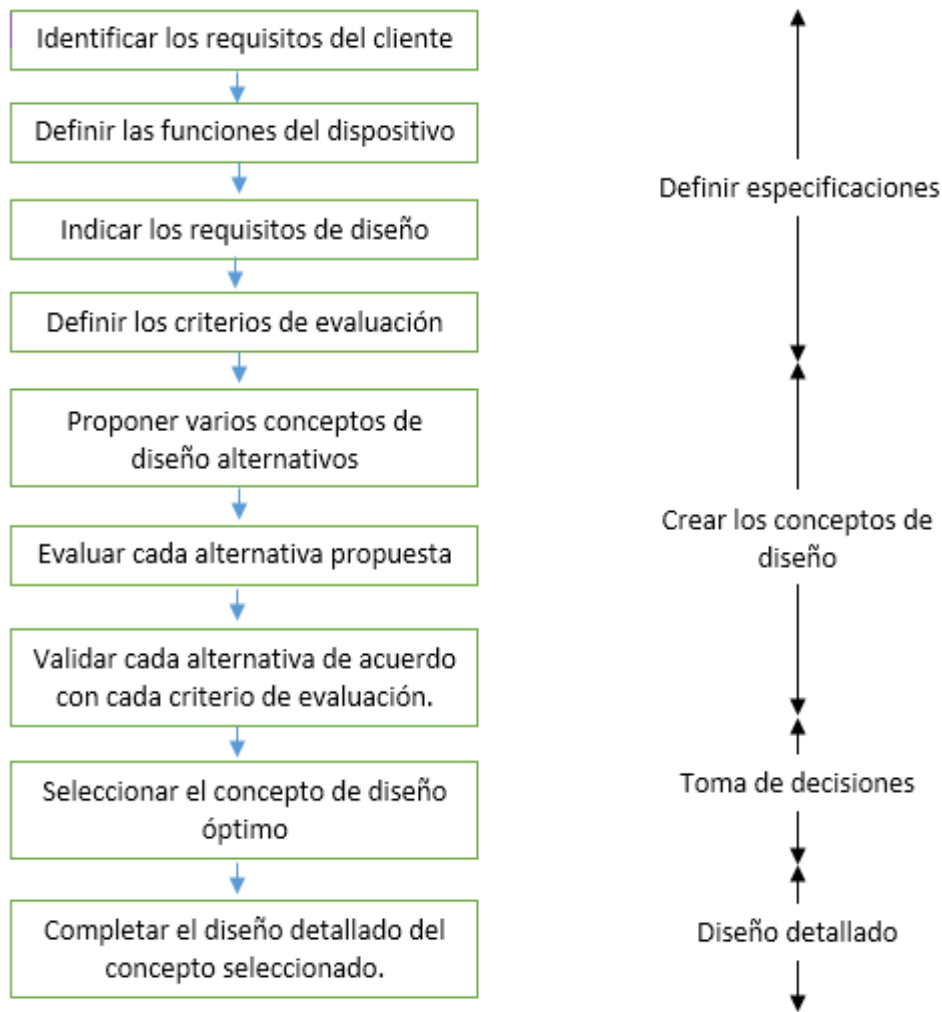
Fuente: (Budynas, y otros, 2008 pág. 6)

Este enfoque de diseño reconoce múltiples retroalimentaciones e iteraciones

#### 2.10.4. *Proceso de diseño según Mott*

El enfoque que propone el autor se basa bastante en el cliente. El subraya la importancia de identificar con cuidado las necesidades y las expectativas del cliente, antes de comenzar a diseñar un aparato mecánico. Los pasos del proceso de diseño que señala el autor son los siguientes:

Figura 15-2.- Pasos en el proceso de diseño



Fuente: (Mott, 2006 pág. 12)

La mayor parte de diseños pasan por un ciclo de actividades como se muestra en la figura 16-2. El diseñador debe proponer más de un concepto de diseño, y éste debe satisfacer las funciones y requisitos del diseño, de ahí que se elige el más óptimo y viable para producir. (Mott, 2006 pág. 12)

### 2.11. Diseño metodológico del calentador solar cilíndrico parabólico

Después de hacer un análisis de todos los diseños metodológicos que proponen los autores descritos se decide un diseño compuesto entre lo que plantea Shigley, Díaz y Mott, debido a que sus propuestas de procesos de diseño son las más apropiadas y tienen similitud con proyectos ya realizados anteriormente, se parte de un problema, posteriormente hay que analizar

el estado del arte para ver la factibilidad del proyecto, se escoge una metodología de diseño, se diseña el sistema seleccionando los materiales más adecuados, para finalmente construir y evaluar.

Los pasos para el proceso de diseño son los siguientes:

- Diseño Preliminar
  - Reconocimiento de la necesidad o el problema a analizar.
  - Revisión y análisis del estado del arte.
  - Definición del problema

Se parte con un problema o una necesidad, en nuestro caso es el desarrollo de energías amigables con el medio ambiente, para cada vez más dejar de lado los combustibles fósiles.

- Metodología de diseño
  - Proponer varios conceptos de diseño alternativos
  - Evaluar cada alternativa propuesta
  - Validar cada alternativa de acuerdo con cada criterio de evaluación
  - Seleccionar el concepto de diseño óptimo

En el diseño metodológico se han presentado varios conceptos y procedimientos para el diseño, el presente trabajo se basará en el proceso de diseño según Díaz.

- Diseño de detalle y análisis de alternativas
  - Selección de elementos comerciales
  - Síntesis y análisis de piezas manufacturadas
  - Integración de elementos y subsistemas
  - Planos de ensamble y de taller

En este paso ya se entra a profundidad en la construcción del calentador solar, se analizan los materiales más óptimos para lograr el máximo de eficiencia térmica.

- Prototipos y pruebas
  - Prototipos: virtuales (CAD 3D, CAE, CAM) y reales
  - Pruebas estáticas y dinámicas
  - Retroalimentación

Una vez construido el calentador se procede a realizarle pruebas, son necesarias para poder modificar algún material o elemento y así lograr la máxima eficiencia.

- Diseño definitivo
  - Planos definitivos: detalle, taller, ensamble y explosión
  - Diseño de detalles estéticos y especificación de acabados
  - Evaluación
  - Presentación

Una vez culminadas las pruebas realizar los planos, evaluar de forma analítica y experimental o también por medio de simulaciones.

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DEL CALENTADOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO

En el presente capítulo se diseña el Colector Solar Cilíndrico Parabólico partiendo del análisis de alternativas de cada elemento que compone el colector, después se realiza el modelo matemático del calentamiento de agua y finalmente la construcción del calentador solar para su posterior evaluación y operación.

#### 3.1. Reconocimiento de la necesidad

El calentador solar cilíndrico parabólico deberá cumplir especificaciones que se mencionan en la tabla 4-3:

Tabla 4-3.- Especificaciones del calentador solar cilíndrico parabólico

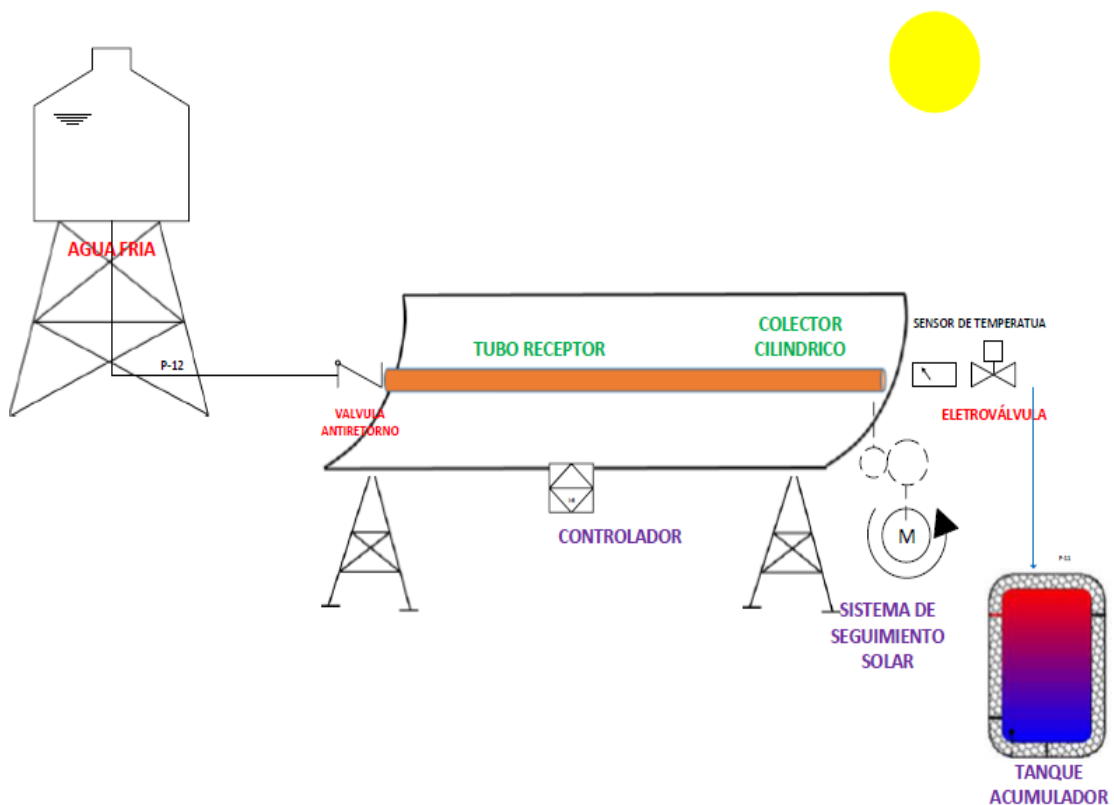
ELEMENTO	ESPECIFICACIONES
Tubo absorbedor	El Tubo deberá poseer la capacidad de absorber el calor proveniente de la radiación solar, analizando materiales o algún tipo de tratamiento. Ya que este tubo no puede ir aislado, analizar la mejor opción para evitar las pérdidas de calor por convección
Colector	El colector debe ser una superficie que refleje al máximo los rayos provenientes del sol estos serán direccionados hacia el tubo absorbedor, este se encuentra en la línea focal, se lo hará utilizando materiales con alta eficiencia de reflectividad.
Fluido	Temperatura de ingreso 15 °C Temperatura de salida 70 °C
Sistema de seguimiento	Hora de inicio 9:00 am Hora de finalización 4:00 pm

Fuente: (Autores)

#### 3.2. Análisis de alternativas

Para empezar con este análisis se va a describir el funcionamiento del sistema del colector solar cilíndrico parabólico.

Figura 16-3.- Esquema del colector solar cilíndrico parabólico



Fuente: (Autores)

La figura 16-3 muestra el esquema del diseño final del sistema de calentamiento en función a la mejor alternativa seleccionada.

- El agua ingresa al sistema a una temperatura de 14 – 15 °C (Temperatura del agua en la ciudad de Riobamba).
- Una vez allí el agua se calienta debido a los rayos solares concentrados en la línea focal por medio del reflector.
- Se coloca 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 70°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 9:00 am hasta las 4:00 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

### **3.2.1. Reflector solar**

Es el encargado de direccionar los rayos solares hacia la línea focal en donde se encuentra el tubo absorbedor. Para la construcción del calentador solar cilíndrico parabólico conviene que el reflector posea una alta reflectividad y baja absorptividad, así toda la irradiación proveniente del sol llegue hasta la línea focal, logrando mejor rendimiento óptico.

- Solución 1.- Acero inoxidable brillante

El acero inoxidable es una aleación de carbono y cromo, que con un tratamiento superficial se consigue su brillo tipo espejo, para este caso se utiliza un acero inoxidable ASTM A240/480, esta opción es comúnmente usada en los colectores solares ya que es de fácil adquisición en el mercado y a bajo costo. El rendimiento del acero inoxidable brillante disminuye con el tiempo, además es un acero, que absorbe calor.

Reflectividad 0,57 (Echazú, y otros)

Absortividad 0,5

- Solución 2.- Espejo

En este caso al vidrio se lo curva en caliente, posteriormente se coloca una capa de fina de plata, protegida mediante una película de cobre, y otra de pintura epoxi, para que adopte la forma parabólica deseada, el resultado será como cualquier espejo usado en el domicilio.

Reflectividad 0,87

Absortividad 0,2

- Solución 3.- Chapa de aluminio

Su durabilidad es baja, debido a que el aluminio se deteriora rápido, disminuyendo la reflectividad, mientras se encuentra expuesto a la intemperie, no se recomienda para aplicaciones industriales de larga duración.

Reflectividad 0,8

Absortividad 0,3

### **3.2.2. Tubo absorbedor**

En el tubo absorbedor se van a concentrar los rayos que ya previamente han sido desviados por medio del captador solar. Este tubo debe cumplir con propiedades de alta absorptividad, y muy

baja reflectividad, además se debe aislar el tubo para evitar pérdidas de calor por convección, para ello se colocara un tubo de vidrio al exterior de alta transmisividad.

#### 3.2.2.1. *Tubo absorbedor externo*

- Solución 1.- Tubo de vidrio

El tubo de vidrio utilizado es de borosilicato con un espesor necesario para la resistir a fenómenos naturales tales como el granizo.

Estos tubos presentan una alta transmisividad, que permite el paso de los rayos solares hacia el tubo absorbedor, provocando en un efecto invernadero, lo cual evita que se pierda calor por convección.

#### 3.2.2.2. *Tubo absorbedor interno*

- Solución 1.- Tubería de cobre

La tubería de cobre es una de las mejores opciones al hablar de calentamiento de agua con energía solar, soporta altas temperaturas del agua y altas presiones. Este material presenta un valor de conducción térmica de 385 [W/m°K] (Holman, 1999). Para aplicaciones solares lo recomendable es pintar la tubería de color negro así se logra aumentar el valor de absorptividad casi a un valor de 0,95 y se disminuye al máximo la reflectividad.

Lo recomendable es una tubería tipo K, estas son rígidas, adecuada para usos con grandes presiones.

Su principal desventaja es el costo.

- Solución 2.- Tubería acero galvanizado

Al igual que el que la tubería de cobre, soporta altas temperaturas y altas presiones, pero presenta bajos valores de absorptividad y conducción térmica cuyos valores son de 0,34 y 50 W/m°K respectivamente. (Holman, 1999)

Su ventaja es el costo en comparación a la tubería de cobre.

- Solución 3.- Tubería de aluminio

Las tuberías de aluminio son una buena opción para aplicaciones solares posee un alto grado de conductividad térmica 220 W/m°K (Holman, 1999). La desventaja es que posee un bajo valor



de absorptividad (0.10), debido a que este material es altamente reflectivo, pero al igual que los materiales ya mencionados se le deberá aplicar pintura negra aumentar el valor de absorptividad.

### **3.2.3. Pintura**

La pintura es un procedimiento necesario para las aplicaciones solares. Por medio de la pintura se logra aumentar el valor de absorptividad y con ello aumentar la temperatura del fluido. La pintura debe ser lo suficientemente resistente para soportar las altas temperaturas que se producen debido a la incidencia de los rayos solares.

- Solución 1.- Pintura electroestática

Consiste en la aplicación de un revestimiento en polvo a materiales metálicos, el proceso de secado se lo hace en hornos y colgados. La pintura electroestática permite una mejor resistencia a la corrosión, a la abrasión, y lo más importante para a las condiciones climáticas extremas, como efectos del sol, rayos UV, calor, frío y humedad.

- Solución 2.- Pintura epóxica

Esta pintura presenta resina epóxica, hecha a base de solventes. Brindan gran protección a diferentes ataques tales como corrosión, abrasión. Además es de fácil adquisición y aplicación. La desventaja es que aunque presenten gran resistencia para los agentes atmosféricos, su color puede llegar a amarillarse o decolorarse debido a los efectos de los rayos ultravioletas.

### **3.2.4. Sistema de seguimiento solar**

El sistema de seguimiento permite que a lo largo del día se aproveche al máximo los rayos solares que van a llegar al captador y por ende al tubo absorbedor.

El sistema de seguimiento será de un eje, por tanto se ubica a lo largo de norte a sur y el seguimiento se lo hará de este a oeste.

- Solución 1.- Motor paso a paso

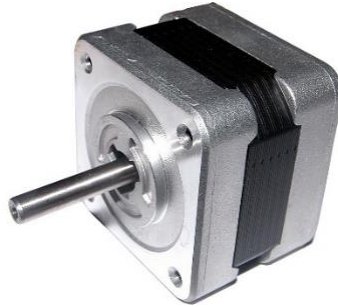
Son dispositivos rotativos, electromagnéticos, que convierten pulsos digitales en rotación mecánica.

Los beneficios de estos motores son:

- No se requiere hacer mantenimiento muy seguido debido a que no poseen escobillas

- No requiere dispositivos de realimentación
- Alta confiabilidad
- Se los puede mover un paso a la vez por cada pulso que se le aplique
- Los pasos pueden variar desde 1,8 grados hasta los 90 grados

Figura 17-3.- Motor paso a paso



Fuente: (<http://www.superrobotica.com/S330300.htm>)

- Solución 2.- Motorreductor

Consta de un motor monofásico o trifásico, reductores de engranajes, y a menudo variadores de velocidad eléctricos o electrónicos, son adecuados para el accionamiento de cualquier máquina que necesiten reducir su velocidad de una manera eficaz.

Las ventajas que presenta este tipo de motor son:

- Son regulares en cuanto a potencia y par transmitidos
- Eficiente en la transmisión de potencia
- Transmite altos torques
- Se lo puede controlar, mediante un pulso de pequeños pasos

Figura 18-3.- Motorreductor



Fuente: (<http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/motorreductor-trifasico-134833.html>)



- Solución 2.- Arduino

La principal ventaja es su fácil uso, se tiene disponible en software y hardware. Sirve para desarrollar elementos autónomos o bien conectarse a otros dispositivos o interactuar con otros programas

Figura 21-3.- Arduino



Fuente: ([http://www.electronicaestudio.com/arduino\\_productos.htm](http://www.electronicaestudio.com/arduino_productos.htm))

### 3.3. Soluciones para la construcción del colector solar cilíndrico parabólico

Una vez analizado las posibles soluciones para cada componente del colector, se indican las soluciones finales en la tabla 5-3, está servirá para el diseño y la construcción del colector.

Tabla 5-3.- Soluciones para cada módulo

ELEMENTO	OPCIONES		
CAPTADOR SOLAR	Acero inoxidable brillante	Espejos	Chapa de aluminio
TUBO ABSORBEDOR Externo	Tubo de vidrio	Tubo de vidrio	Tubo de vidrio
TUBO ABSORBEDOR Interno	Tubería de cobre	Tubería acero galvanizado	Tubo de aluminio
PINTURA	Pintura electroestática	Pintura epoxica	Pintura epoxica
SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR	Motorreductor	Motor paso a paso	Actuador lineal eléctrico
CONTROLADOR SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR	Temporizador	PLC	Temporizador
CONTROLADOR	Arduino	PLC	
	<b>SOLUCIÓN 1</b>	<b>SOLUCIÓN 2</b>	<b>SOLUCIÓN 3</b>

Fuente: (Autores)

### 3.4. Evaluación y selección

El método de criterios ponderados, permite obtener resultados globales significativos. Se seleccionaron soluciones para cada elemento, se realizaron tablas donde cada criterio se compara con los demás y se asignan los siguientes valores:

- 1 Si el criterio de las filas es superior que al de las columnas
- 0,5 si el criterio de las filas es equivalente al de las columnas
- 0 si el criterio de las filas es inferior al de las columnas

#### 3.4.1. Criterios de evaluación del módulo

Mediante el método de evaluación de criterios se puede comparar y obtener la mejor solución. Los criterios a considerar son:

*Eficiencia.*- El diseño y el análisis debe ser el más exacto posible para obtener un alto rendimiento del sistema.

*Nivel de automatización.*- Es un criterio muy importante para lograr un alto rendimiento, el nivel de automatización debe ser lo más precisa posible.

*Confort – ergonomía.*- El sistema deber ser ergonómico, con las medidas adecuadas especialmente para cuando se deba tomar datos, o al momento de cambiar algún accesorio.

*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.

Tabla 6-3.- Evaluación de criterios

CRITERIO	eficiencia	Nivel de automatización	Ergonomía	Materiales	Sistema de seguimiento	$\Sigma +1$	Ponderación
Eficiencia	-	1	1	1	1	5	5/15
Nivel de	0	-	0,5	0	0,5	2	2/15

automatización							
Ergonomía	0	0,5	-	0	0	1,5	1,5/15
Materiales	0	1	1	-	1	4	4/15
Sistema de seguimiento	0	0,5	1	0	-	2,5	2,5/15

Fuente: (Autores)

Tabla 7-3.- Evaluación del peso específico de Eficiencia

EFICIENCIA	SOL 1	SOL 2	SOL 3	$\Sigma + 1$	PONDERACION
SOL 1	-	0,5	1	2,5	2,5/6
SOL 2	0,5	-	1	2,5	2,5/6
SOL 3	0	0	-	1	1/6

Fuente: (Autores)

Tabla 8-3.- Evaluación del peso específico del nivel de automatización

NIVEL DE AUTOMATIZACION	SOL 1	SOL 2	SOL 3	$\Sigma + 1$	PONDERACION
SOL 1	-	0,5	0,5	2	2/6
SOL 2	0,5	-	0,5	2	2/6
SOL 3	0,5	0,5	-	2	2/6

Fuente: (Autores)

Tabla 9-3.- Evaluación de peso específico del nivel de ergonomía

ERGONOMÍA	SOL 1	SOL 2	SOL 3	$\Sigma + 1$	PONDERACION
SOL 1	-	0,5	1	2,5	2,5/6
SOL 2	0,5	-	1	2,5	2,5/6
SOL 3	0	0	-	1	1/6

Fuente: (Autores)

Tabla 10-3.- Evaluación de peso específico del nivel de materiales

MATERIALES	SOL 1	SOL 2	SOL 3	$\Sigma + 1$	PONDERACION
SOL 1	-	1	1	3	3/6
SOL 2	0	-	1	2	2/6
SOL 3	0	0	-	1	1/6

Fuente: (Autores)

Tabla 11-3.- Evaluación de peso específico del nivel del sistema de seguimiento

SISTEMA DE SEGUIMIENTO	SOL 1	SOL 2	SOL 3	$\Sigma + 1$	PONDERACION
SOL 1	-	0,5	1	2,5	2,5/6
SOL 2	0,5	-	1	2,5	2,5/6
SOL 3	0	0	-	1	1/6

Fuente: (Autores)

Por medio del método de evaluación de criterios se concluyó que se escogerá la solución 1. Por medio de esta se garantiza al sistema eficiencia, nivel de automatización correcto, confort al momento de manipular el equipo, selección de materiales adecuados para cada uno de los elementos que componen el calentador, y un sistema de seguimiento adecuado para cumplir tener un correcto seguimiento del sol a lo largo del día.

### 3.5. Cálculos

#### 3.5.1. Cálculo estructural

Se diseñó la estructura del calentador solar cilíndrico parabólico con tubo estructural cuadrado de 40x2.5 mm, de acero A36, recubrimiento negro, uniones soldadas.

La estructura del colector soporta todos los elementos presentes en el calentador, en la tabla 12-3 se detallan los elementos con su peso.

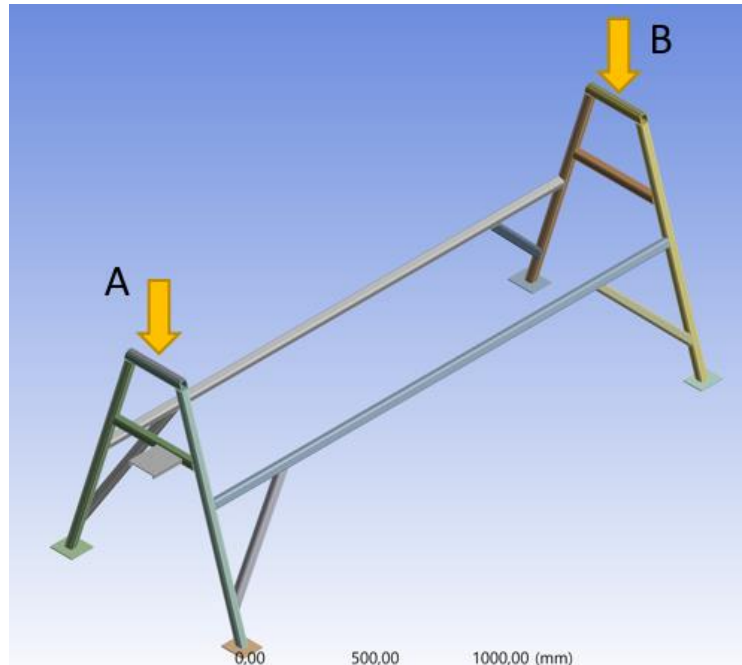
Tabla 12-3.- Pesos de los elementos del calentador

ELEMENTO	PESO (kg)
Tubería de cobre	2,4
Estructura del reflector	5,2
Reflector (acero inox)	12,64
Tubería de vidrio	4
motorreductor	14
Accesorio	3
Contrapeso	20
TOTAL	61,24

Fuente: (Autores)

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

Figura 22-3.- Geometría



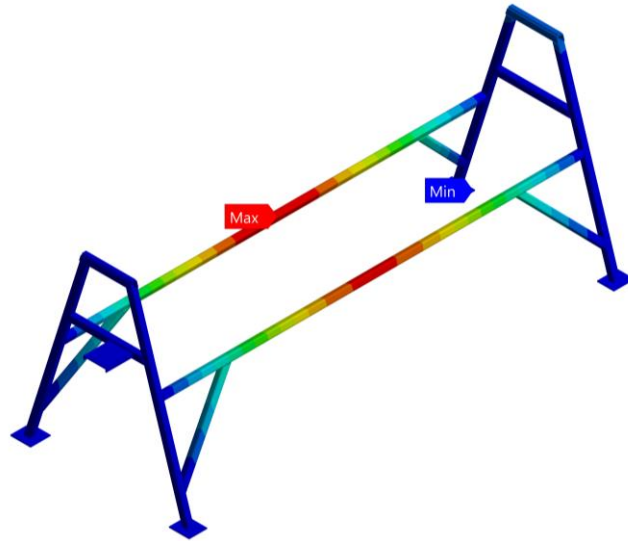
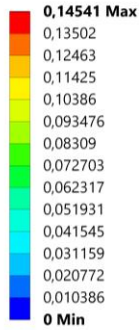
Fuente: (Autores)

En la figura 22-3 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 23-3.- Deformación total de la estructura

A: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
8/7/2017 14:38

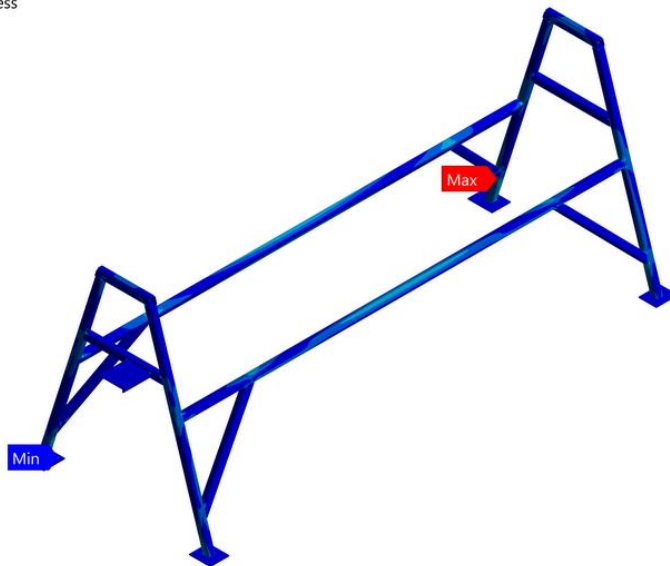
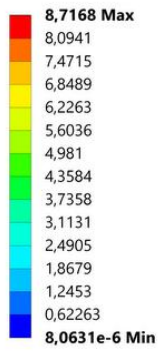


Fuente: (Autores)

En la figura 23-3, se muestra una deformación máxima de 0,14 mm.

Figura 24-3.- Esfuerzo equivalente (Von Mises)

Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
8/7/2017 14:38



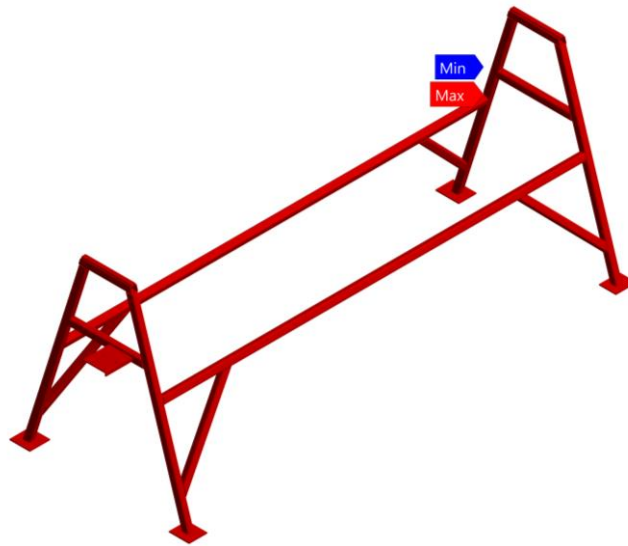
Fuente: (Autores)

El acero A36 presenta un límite de fluencia de 250 MPa, según el análisis realizado en ANSYS el esfuerzo equivalente es igual a 8,71 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 25-3:

A: Static Structural  
Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 1  
8/7/2017 14:39



Figura 25-3.- Factor de seguridad



Fuente: (autores)

### 3.5.2. Cálculo mecánico

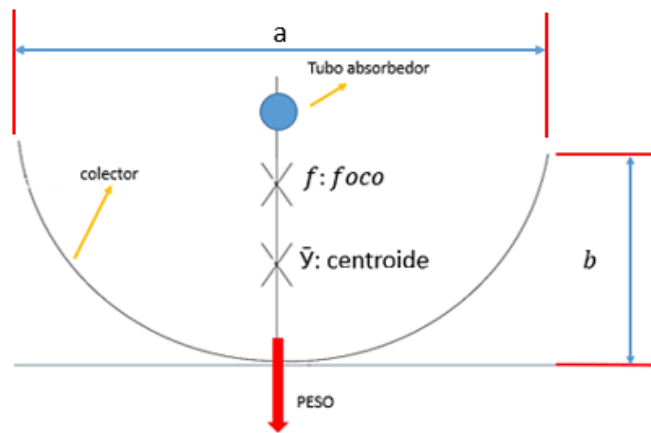
Dentro del cálculo mecánico corresponde la selección del motorreductor a partir del cálculo del torque, la selección del sistema de transmisión y el diseño del contrapeso.

#### 3.5.2.1. Torque

El cálculo del torque producido por el colector es necesario realizarlo para la correcta selección del motor y que este funcione con normalidad a lo largo del día.

Para dicho cálculo se deben tener en cuenta varios factores geométricos que se muestran en la figura 26-3:

Figura 26-3.- Variables colector solar



Fuente: (Autores)

En la figura 26-3, se verifican los parámetros geométricos que están presentes en el colector, no confundir el punto focal con el centroide.

Primeramente se calculan las coordenadas del foco, partiendo de la ecuación de la parábola:

$$x^2 = 4fy \quad (11)$$

En este trabajo la ecuación seleccionada para la parábola es la siguiente:

$$x^2 = 90y \quad (12)$$

De esta relación se encuentra el valor del foco:

$$\begin{aligned} 4f &= 90 \\ f &= \frac{90}{4} \\ f &= 22,5cm \end{aligned}$$

Ancho del colector

$$a = 1m$$

Perímetro de la parábola según la siguiente relación descrita en el trabajo de (Baragozza Bastidas, y otros, 2002)

$$p = 0,5\sqrt{a^2 + 16f^2} + \frac{a^2}{8f} \ln\left(\frac{4f\sqrt{a^2 + 16f^2}}{a}\right) \quad (13)$$

$$p = 1,121m$$

Longitud de la parábola

$$l = 2,44m$$

Área lateral de la parábola

$$A_T = l * p \quad (14)$$

$$A_T = 1,121 * 2,44 = 2,735m^2$$

Espesor de la plancha de acero inoxidable

$$e = 0,6mm = 0,0006m$$

Volumen del recipiente

$$V = A_T * e \quad (15)$$

$$V = 2,735 m^2 * 0,0006m = 0,0016 m^3$$

Peso específico del acero inoxidable

$$\gamma = 7,9 g/cm^3$$

Peso de la lámina de acero inoxidable

$$P = V * \gamma \quad (16)$$

$$P = \left(1600cm^3 * 7,9 \frac{g}{cm^3}\right) = 12640 g$$

$$P = 12,64 kg$$

Centroide de la parábola

$$\bar{y} = \frac{3}{5} b \quad (17)$$

$$\bar{y} = \frac{3}{5} (29\text{cm}) = 17,4 \text{ cm desde el origen}$$

En la tabla 13-3 se especifican los pesos de los componentes del calentador solar, el peso total multiplicado por el centroide se obtiene el torque del sistema.

Tabla 13-3.- Peso de elementos

ELEMENTO	PESO (Kg)
Tubería de cobre	2,4
Estructura del reflector	5,2
Plancha de acero inoxidable	12,64
Tubería de vidrio	4
PESO TOTAL	24,24

Fuente: (Autores)

Cálculo del torque producido por el colector

$$M = P * \bar{y} \quad (18)$$

Donde:

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

$\bar{y}$ : Centroide

$$M = 24,24 \text{ kg} * 0,174\text{m} = 4,21 \text{ kg} * \text{m} = 364,97 \text{ lb} * \text{in}$$

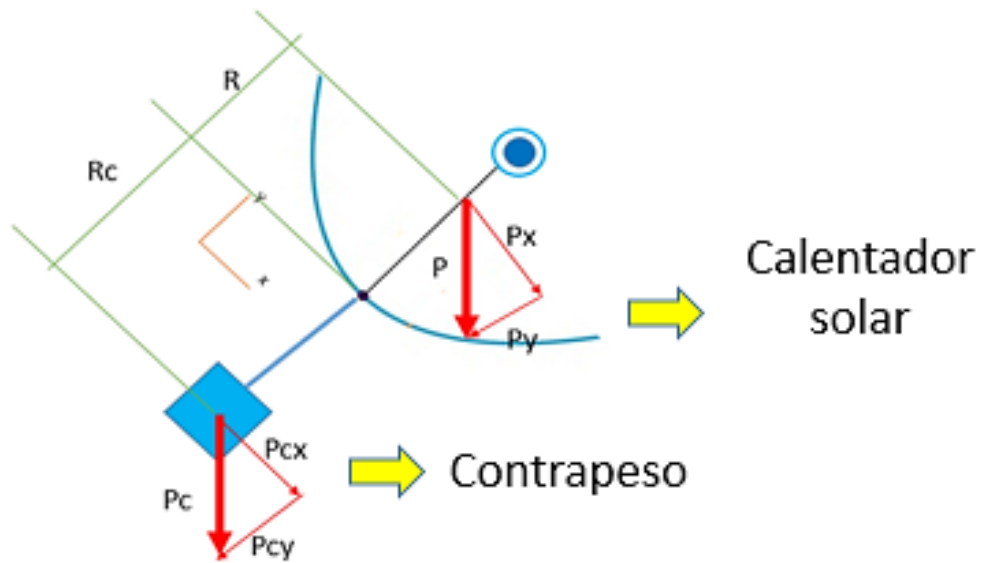
### 3.5.2.2. Contrapeso

Debido a que el eje de giro no coincide con el centro de gravedad del calentador solar es necesario ubicar el contrapeso para desplazar el centro de masa y con esto reducir la potencia del motor.

Para que haya un equilibrio estático entre el colector y el contrapeso, la sumatoria de todos los momentos con respecto al eje de giro debe ser igual a cero.

$$\Sigma M = 0$$

Figura 27-3.- Esquema colector solar, sumatoria de fuerzas



Fuente: (Autores)

En la figura 27-3, se realiza el diagrama de fuerzas del sistema. La sumatoria de fuerzas debe ser igual a cero, por eso la importancia del contrapeso.

Para el equilibrio estático:

$$P_x(R) - P_{cx}(R_c) = 0 \quad (19)$$

Donde:

$P$ : Peso de los elementos del sistema

$P_c$ : Peso del contrapeso

$R$ : Centro de gravedad del colector solar

$R_c$ : Centro de gravedad del contrapeso

$$\begin{aligned} P_x &= P * \text{sen } 45 & P_{cx} &= P_c * \text{sen } 45 \\ P * \text{sen } 45 (R) - P_c * \text{sen } 45 (R_c) &= 0 \\ P (R) &= P_c (R_c) \end{aligned} \quad (20)$$

### 3.5.2.3. Selección del motor

El elemento elegido para dar movimiento al sistema de seguimiento solar es un motorreductor debido a sus diferentes ventajas:

- Una regulación muy buena de la velocidad y la potencia transmitida.
- Menor espacio requerido para su instalación.
- Fácil mantenimiento.
- Mayor eficiencia en la transmisión de potencia que brinda el motor

Además para la selección del motor se debe tener en cuenta que el mismo debe ser capaz de producir el par generado por el colector. Por lo cual se ha elegido un motorreductor trifásico de la marca LAFERT con las siguientes características:

Tabla 14-3.- Selección del motor - trifásico

Type	kW	HP	min <sup>-1</sup>	M <sub>n</sub> Nm	IE1 $\eta$			cos $\varphi$	I <sub>n</sub>		I <sub>s</sub> /I <sub>n</sub>	M <sub>s</sub> /M <sub>n</sub>	M <sub>f</sub> /M <sub>n</sub>	M <sub>r</sub> /M <sub>n</sub>	J 10 <sup>-3</sup> kgm <sup>2</sup> kg		
					50%	75%	100%		400V	380-420V							
1500 min <sup>-1</sup> (4 poles)																	
AM 56Z AA	4	0.06	0.08	1300	0.4	42.0	44.0	48.0	0.70	0.28	0.32	2.6	2.1	2.0	2.1	0.14	2.7
AM 56Z BA	4	0.09	0.12	1330	0.6	43.0	47.0	51.0	0.74	0.35	0.40	2.5	2.2	2.1	2.2	0.16	2.9
AM 63Z AA	4	0.12	0.16	1350	0.8	46.0	50.0	57.0	0.65	0.50	0.55	2.4	2.0	1.9	2.0	0.25	3.3
AM 63Z BA	4	0.18	0.25	1330	1.3	47.0	50.0	58.0	0.70	0.65	0.70	2.3	1.9	1.8	1.9	0.27	4.1
AM 63Z CA	4*	0.25	0.33	1360	1.8	49.0	52.5	58.0	0.74	0.85	0.90	2.7	2.2	2.0	2.1	0.30	4.2
AM 71Z AA	4	0.25	0.33	1340	1.8	55.0	59.0	64.0	0.66	0.90	1.00	3.2	1.9	1.8	2.0	0.65	5.7
AM 71Z BA	4	0.37	0.50	1370	2.6	60.0	63.0	67.0	0.67	1.20	1.25	3.3	2.2	2.1	2.2	0.76	6.0
AM 71Z CA	4*	0.55 <sup>o</sup>	0.75 <sup>o</sup>	1380	3.8	61.0	64.0	69.0	0.68	1.70	1.80	3.6	2.4	2.3	2.4	1.00	7.3

Fuente: (LAFERT catálogo, Pág. 18)

En la tabla 14-3, se observa las características del motor: Potencia 0,25 HP, 1630 rpm, 0,18 kW. **Anexo 1.**

Es importante calcular el torque que entrega el motor a la salida para ver si cumple con las condiciones del sistema, ser un motorreductor primero debemos obtener el dato de la velocidad que se obtiene con dicho motor, la relación de transmisión es de 40.

#### DATOS

$$P = 0,25 \text{ HP}$$

$$RPM_e = 1630$$

$$i = 40$$

$$RPM_S = \frac{RPM_e}{i} \quad (21)$$

$$RPM_S = \frac{1630}{40}$$

$$RPM_S = 40,75$$

Una vez obtenido éste dato es posible calcular el torque a la salida del motorreductor de la siguiente manera:

$$T = \frac{HP * 716}{RPM_S} \quad (22)$$

$$T = \frac{0,24 * 716}{40,75}$$

$$T = 4,216 \text{ kg.m} = 365,57 \text{ lb.in}$$

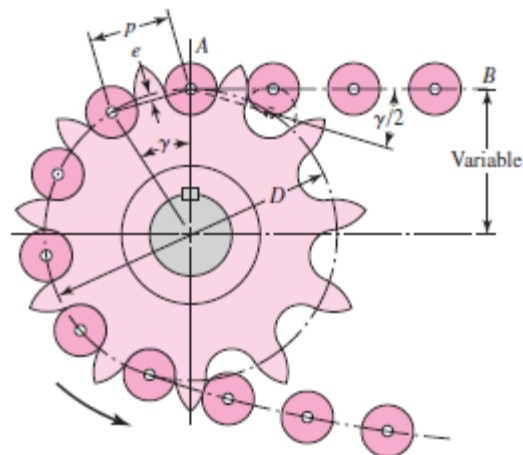
El par a la salida del motor es mayor al par generado por el colector, por lo cual la selección es adecuada.

#### 3.5.2.4. 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

Figura 28-3.- Acoplamiento cadena y catalina



Fuente: (Budynas, y otros, 2008 pág. 889)

- Potencia de diseño

El primer dato indispensable es la potencia de diseño, que se calcula con la potencia que brinda el motor.

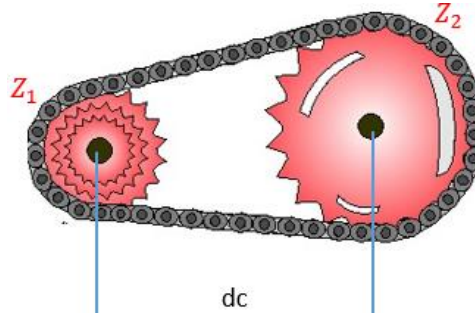
$$P = 0,18kW = 0,24HP$$



$$RPM = 40,75 \text{ rpm}$$

$$P_D = 0,24 \text{ HP}$$

Figura 29-3.- Transmisión por cadena



Fuentes: (Mecanican, 2017)

La rueda conductora y conducida se las seleccionó del catálogo Challenge debido a la baja velocidad que va a tener el sistema se selecciona una rueda conductora de 13 dientes, y una relación de transmisión de 3.

$$Z_1 = 13$$

$$i = 3$$

El número de dientes de la rueda conducida se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Z_2 = Z_1 * i \quad (23)$$

$$Z_2 = 13 * 3$$

$$Z_2 = 39$$

Se calcula también la velocidad que tendrá la rueda conducida, y que será la velocidad que tenga el sistema de seguimiento.

$$n_2 = \frac{n_1}{i} \quad (24)$$

$$n_2 = \frac{40,75}{3}$$

$$n_2 = 13,58 \text{ rpm}$$

Piñones del catálogo Challenge – Transmisión de Potencia. **Anexo 2.**

Tabla 15-3.- Selección de Catalinas

Teeth	Outer Dia do	Pitch Dia dp	Hub Dia dm	Simplex Length thro' Bore A	Stock Bore D1	Hub Dia dm	Duplex Length thro' Bore A	Stock Bore D1	Hub Dia dm	Triplex Length thro' Bore A	Stock Bore D1	Type
8	28.0	24.89	15	22	8	15	22	8	15	32	8	1
9	31.0	27.85	18	22	8	18	22	8	18	32	8	1
10	34.0	30.82	20	22	8	20	22	8	20	32	10	1
11	37.0	33.80	22	25	8	22	25	10	22	35	12	1
12	40.0	36.80	25	25	8	25	25	10	25	35	12	1
13	43.0	39.80	28	25	10	28	25	10	28	35	12	1
14	46.3	42.80	31	25	10	31	25	10	31	35	12	1
15	49.3	45.81	34	25	10	34	25	10	34	35	12	1
16	52.3	48.82	37	28	10	37	30	12	37	35	12	1
17	55.3	51.83	40	28	10	40	30	12	40	35	12	1
18	58.3	54.85	43	28	10	43	30	12	43	35	12	1
19	61.3	57.87	45	28	10	46	30	12	46	35	12	1
20	64.3	60.89	46	28	10	49	30	12	49	35	12	1
28	89.0	85.07	60	28	12	73	30	16	73	40	16	1
29	92.0	88.09	60	28	12	76	30	16	76	40	16	1
30	94.7	91.12	60	28	12	79	30	16	79	40	16	1
31	98.3	94.15	65	30	14	80	30	16	80	40	16	1
32	101.3	97.17	65	30	14	80	30	16	80	40	16	1
33	104.3	100.20	65	30	14	80	30	16	80	40	16	1
34	107.3	103.23	65	30	14	80	30	16	85	40	16	1
35	110.4	106.26	65	30	14	80	30	16	85	40	16	1
36	113.4	109.29	70	30	14	90	30	16	90	40	16	1
37	116.4	112.32	70	30	14	90	30	16	90	40	16	1
38	119.5	115.34	70	30	14	90	30	16	90	40	16	1
39	122.5	118.37	70	30	14	90	30	16	90	40	16	1
40	125.5	121.40	70	30	14	90	30	16	90	40	16	1

Fuente: (CHALLENGE catálogo, Pág. 142)

Diámetro de la rueda conductora.

$$d_p = 39,8 \text{ mm} = 1,5669''$$

Diámetro de la rueda conducida.

$$D_p = 118,37 \text{ mm} = 4,66''$$

Paso diametral.

$$p = 9,525 \text{ mm} = 0,375''$$

Distancia entre centros.

$$e = D + \frac{d}{2} \tag{25}$$

$$e = 4,66 + \frac{1,5669}{2} = 5,44345'' = 13,82 \text{ cm}$$

Longitud de la cadena.

$$L = \frac{2 * e}{p} + \frac{Z_2 + Z_1}{2} + \frac{(Z_2 - Z_1)^2 p}{4\pi^2 e} \quad (26)$$

$$L = \frac{2 * 5,44345}{0,375} + \frac{(39 + 13)}{2} + \frac{(39 - 13)^2 0,375}{4\pi^2 5,44345} = 56,211" = 1427 \text{ mm}$$

Velocidad de la cadena.

Es importante que la velocidad de la cadena no supere los 12 m/s. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$S = \frac{Zpn}{12} \quad (27)$$

$$S = \frac{(13 * 0,375 * 40,75)}{12} = 16,55 \text{ pie}/\text{min} = 0,084 \text{ m}/\text{seg}$$

Donde:

Z: Número de dientes de la rueda conductora

p: Paso [plg]

n: Velocidad de la rueda conductora [RPM]

Se puede observar que la velocidad obtenida es adecuada para la aplicación en la que se la desea realizar.

Carga de trabajo de la cadena

$$L = \frac{33000 * \text{HP}}{S} \quad (28)$$

Donde:

L: Carga de trabajo [lb]

HP: Potencia de diseño [HP]

S: Velocidad de la cadena [pie/min]

$$L = \frac{33000 * 0,24}{16,55}$$

$$L = 478,55 \text{ lb}$$

Torque de salida en la rueda conducida

Este torque va a ser mucho mayor al que sale del motor, debido que la cadena al transmitir la potencia, reduce la velocidad pero aumenta el par. Se calcula mediante la siguiente relación:

$$T_s = L * \left(\frac{D}{2}\right) \quad (29)$$

$$T_s = 478,55 \text{ lb} * \left(\frac{4,66}{2} \text{ in}\right)$$

$$T_s = 1115,021 \text{ lb. in}$$

Como era de esperarse el torque que va a entregar la rueda conducida es mucho mayor que el par que genera el colector. Por lo tanto el sistema de seguimiento va a funcionar con total normalidad y no va a tener inconvenientes en el giro del calentador solar.

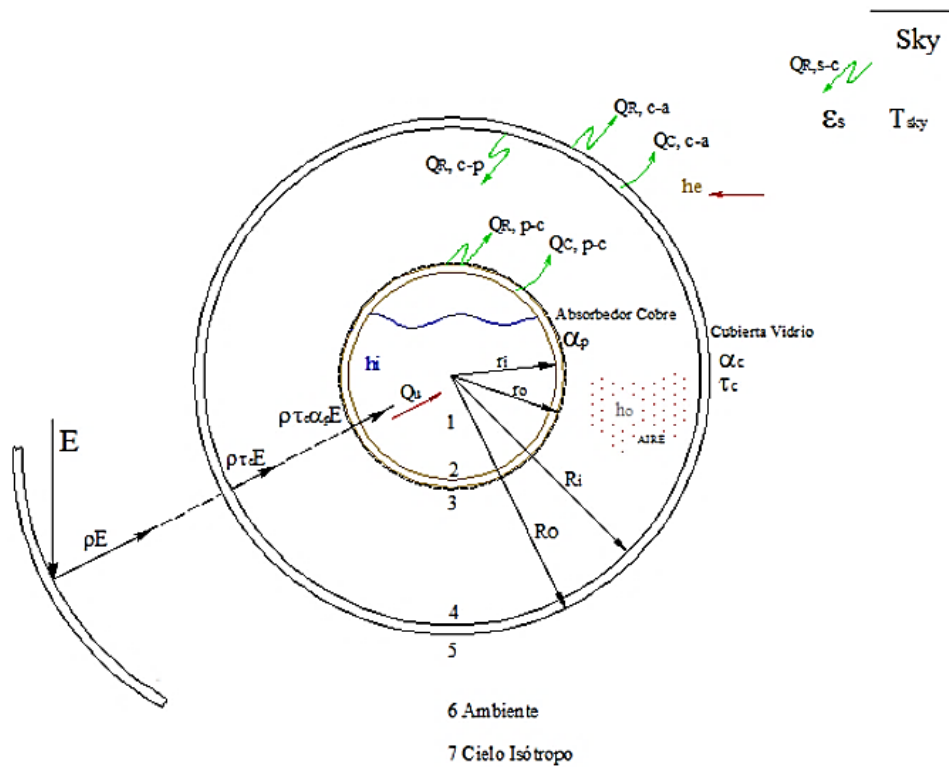
### **3.5.3. Análisis térmico**

#### *3.5.3.1. Cálculo del tiempo de calentamiento del fluido estancado en el tubo absorbedor hasta la temperatura de 70°C*

Para obtener el calor útil generado por el colector solar, es necesario calcular las pérdidas térmicas del sistema, mediante el coeficiente de pérdida  $U_L$ , el cual depende del área del receptor, y también mediante el factor de extracción de pérdida de calor  $F_R$ , que sirve para explicar los gradientes de temperatura a lo largo del receptor. Para estimar estos valores es importante recordar que el tubo absorbedor de cobre está recubierto por un tubo de vidrio para reducir las pérdidas mencionadas anteriormente. Cabe recordar que existen pérdidas térmicas por convección, por radiación y por conducción, debido al calor que se pierde a través de la estructura de soporte del colector.

Si el fluido circula a través del tubo absorbedor, un solo valor de  $U_L$  no es aconsejable, debido a los gradientes de temperatura que existen a lo largo del absorbedor. Por lo tanto se divide en varios segmentos, cada uno con un  $U_L$  constante. Si es que el fluido permanece en reposo no es necesario dividir al tubo en varias partes, ya que no existe gradiente de temperaturas a lo largo del absorbedor.

Figura 30-3.-Flujos de transferencia de calor para el balance energético en el tubo absorbedor



Fuente: (Toro, 2015)

La pérdida de calor en el calentador 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; ésta pérdida de calor debe ser igual en los tres casos y se determinan por las siguientes expresiones:

$$Q_{perdido,c-iv} = \frac{2\pi k_{ef} L}{\ln\left(\frac{D_{iv}}{D_c}\right)} (T_c - T_{iv}) + \frac{\sigma A_c (T_c^4 - T_{iv}^4)}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1 - \epsilon_v}{\epsilon_v} \left(\frac{D_c}{D_{iv}}\right)} \quad (30)$$

Donde:

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

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

$L$ : Longitud del tubo de cobre [m]

$T_c$ : Temperatura de la tubería de cobre [°K]

$T_{iv}$ : Temperatura de la parte interna de la cubierta de vidrio [°K]

$D_{iv}$ : Diámetro de la parte interna de la tubería de vidrio [m]

$D_c$ : Diámetro de la tubería de cobre [m]

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

$A_c$ : Área de la tubería de cobre [m<sup>2</sup>]

$\varepsilon_v$ : Emisividad de la cubierta de vidrio [adimensional]

$\varepsilon_c$ : Emisividad de la tubería de vidrio [adimensional]

El área de la tubería de cobre se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A_c = A_{cobre} = (\pi D_c L) \quad (31)$$

La conductividad térmica efectiva se calcula mediante la siguiente expresión:

$$k_{ef} = 0,386k_a \left(\frac{Pr}{0,861 + Pr}\right)^{\frac{1}{4}} (F_{cil} Ra)^{\frac{1}{4}} \quad (32)$$

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]

Si el tubo de vidrio se encuentra al vacío, la convección entre el tubo de cobre y la parte interna de la cubierta de vidrio se puede suprimir, y de esta manera  $k_{ef}$  valdría cero, caso contrario se calcula este valor ya que tiene un efecto significativo en las pérdidas totales de calor.

Se calcula la temperatura promedio entre la tubería de vidrio y la de cobre, y evaluar las propiedades del aire entre el tubo de cobre y la cubierta de vidrio.

$$T_{prom} = \frac{T_{iv} + T_c}{2} \quad (33)$$

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

$$Ra = \frac{g\beta(T_c - T_{iv})L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (34)$$

Donde:

$Ra$ : Número de Rayleigh. [Adimensional]

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

$\beta$ : 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 a ser la distancia entre los dos cilindros, es decir:

$$L_c = \frac{D_{iv} - D_c}{2} \quad (35)$$

Donde:

$L_c$  = Longitud característica. [m]

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

$$F_{cil} = \frac{\left[ \ln \left( \frac{D_{iv}}{D_c} \right) \right]^4}{L_c^3 \left( D_c^{-3/5} + D_{iv}^{-3/5} \right)^5} \quad (36)$$

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

$$Q_{perdido,iv-ev} = \frac{2\pi kL(T_{iv} - T_{ev})}{\ln \left( \frac{D_{ev}}{D_{iv}} \right)} \quad (37)$$

Donde:

$Q_{perdido,iv-ev}$ : 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]

$T_{ev}$ : Temperatura de la parte exterior de la cubierta de vidrio [°K]

$D_{ev}$ : Diámetro de la parte exterior de la cubierta de vidrio [m]

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

$$Q_{perdido,ev-amb} = h_v A_v (T_{ev} - T_{amb}) + \varepsilon_v \sigma A_v (T_{ev}^4 - T_{cielo}^4) \quad (38)$$

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]

$T_{cielo}$ : Temperatura del cielo [K]

Para el cálculo de del coeficiente de transferencia de calor es 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.

$$T_{prom} = \frac{T_{ev} + T_{amb}}{2} \quad (39)$$

Donde:

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

$T_{ev}$ : Temperatura de la cubierta de vidrio [K]

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

El número de Reynolds se obtiene con la expresión:

$$Re = \frac{\rho V D_{ev}}{\mu} \quad (40)$$

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)

$$Nu = 0,4 + 0,54(Re)^{0,52} = \frac{h_v * D_{ev}}{k_a} \quad (41)$$

Para un Reynolds entre (1000 – 50000)

$$Nu = 0,3(Re)^{0,6} = \frac{h_v * D_{ev}}{k_a} \quad (42)$$

A partir de la expresión 42 se encuentra el coeficiente de convección debido al viento.

El procedimiento para encontrar las pérdidas de calor en el colector se realiza asumiéndose un dato de temperatura de la parte exterior de la cubierta de vidrio ya que es un dato desconocido, esta estimación debe ser cercana a la temperatura ambiente. La temperatura del tubo de cobre es un dato conocido que fue medido mediante un pirómetro. Con el dato de temperatura de la cubierta de vidrio se resuelve la ecuación de las pérdidas de calor por convección y radiación desde la cubierta de vidrio hacia el ambiente, luego de esto se calcula las pérdidas de calor desde el tubo absorbedor de cobre hacia la parte interior de la cubierta de vidrio. Si ambos valores resultan iguales quiere decir que el dato asumido es correcto, de lo contrario se vuelve a asumir otro valor, con lo cual el proceso se vuelve iterativo. Una vez encontrados estos valores, se reemplaza el valor del calor perdido en la ecuación de la pérdida de calor desde la parte interna hacia la parte externa de la cubierta de vidrio, encontrando aquí la temperatura de la parte interna de la cubierta de vidrio.

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

$$U_L = \frac{(Q_{perdido})}{A_c(T_c - T_{amb})} \quad (43)$$

Cabe recordar que se usa esta ecuación ya que el agua se va a mantener en reposo dentro del tubo, por lo tanto no hay flujo de fluido.

Para poder obtener el valor del calor útil generado por el colector es 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:

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_{ec}}{h_{fi}D_{ic}} + \left(\frac{D_{ec}}{2k} \ln\left(\frac{D_{ec}}{D_{ic}}\right)\right)} \quad (44)$$

Donde:

$D_{ec}$ : Diámetro externo de la tubería de cobre [m]

$D_{ic}$ : Diámetro interno de la tubería de cobre [m]

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

Se realiza un cálculo del coeficiente de convección interna dentro del tubo para el fluido de trabajo, debido a que el agua se encuentra en reposo se produce convección natural.

Para este cálculo es necesario el número de Grashof y Nusselt, y a su vez las propiedades del agua como la capacidad calorífica, número de Prandtl, el coeficiente de expansión volumétrica y la viscosidad cinemática, todas ellas evaluadas a la temperatura promedio entre la temperatura de fluido y la temperatura ambiente. Estos datos se encuentran tabulados en función a la temperatura.

El número de Grashof se determina mediante la siguiente expresión:

$$Gr_d = \frac{g \beta (T_c - T_{prom}) D_{ic}^3}{\nu^2} \quad (45)$$

Una vez obtenido este valor se procede a calcular Nusselt mediante la siguiente expresión:

$$Nu_D = 0,55(Gr_d Pr)^{1/4} \quad (46)$$

El coeficiente interno de transferencia de calor se obtiene al despejar la siguiente ecuación:

$$Nu_D = \frac{h_{fi} * D_{ic}}{k} \quad (47)$$

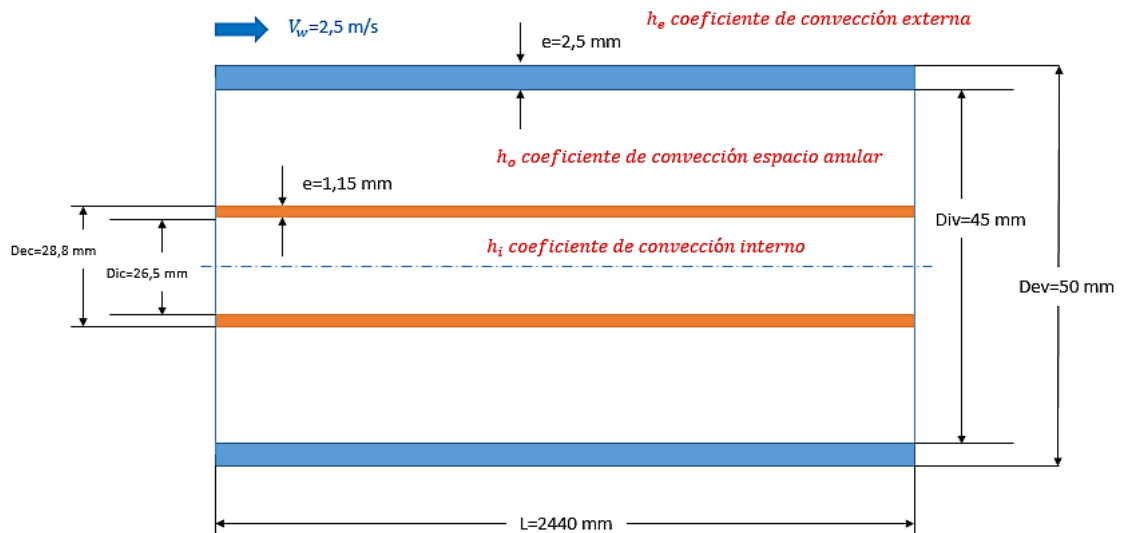
Entonces:

$$h_{fi} = \frac{Nu k}{D_{ic}} \quad (48)$$

Donde:

$k$  = Conductividad térmica del fluido [W/m °C]

Figura 31-3.- Esquema del tubo absorbedor



Fuente: (Autores)

En los colectores solares también es importante definir un valor que compare la cantidad de energía obtenida útil real del colector con la ganancia de energía útil si la superficie del colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido. Este valor es llamado factor de remoción de calor del colector  $F_R$  y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$F_R = \frac{(\dot{m} C_p (T_{sf} - T_{ef}))}{A_c (R - U_L (T_{ef} - T_{amb}))} \quad (49)$$

Donde:

$F_R$ : Factor de remoción de calor del colector [Jm<sup>2</sup>/s.w<sup>2</sup>]

$\dot{m}$ : Caudal másico del fluido de transferencia de calor [kg/s]

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

$T_{sf}$ : Temperatura de salida del fluido de transferencia de calor [K]

$T_{ef}$ : Temperatura de entrada del fluido de transferencia de calor [K]

$R$ : Radiación absorbida por unidad de área [W/m<sup>2</sup>]

También es importante definir el factor de flujo del colector como el cociente entre  $F_R$  y  $F'$ . Esto se lo hace para el análisis de temperaturas a diferentes velocidades del fluido. Entonces se obtiene la siguiente expresión:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L F'} \left( 1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right) \quad (50)$$

El factor de flujo del colector es función del valor adimensional de  $\frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L F'}$ .

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.

$$Q_u = F_R A_a R - A_c U_L (T_c - T_{amb}) \quad (51)$$

Donde:

$A_a$ : Área de apertura del colector solar [m<sup>2</sup>]

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:

$$A_a = (A - D_{ev})L \quad (52)$$

Donde:

$A$ : Ancho de plancha reflectante de acero inoxidable [m]

$L$ : Largo de plancha reflectante de acero inoxidable [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:

$$Q_u = \frac{M}{t} C_p (T_{sf} - T_{ef}) \quad (53)$$

Despejando  $t$  se obtiene lo siguiente:

$$t = \frac{M}{Q_u} C_p (T_{sf} - T_{ef}) \quad (54)$$

Donde:

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

$Q_u$ : 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]

### 3.5.3.2. Cálculo del incremento de temperatura del fluido cuando atraviesa el tubo absorbedor a diferentes velocidades.

Para calcular el incremento de temperatura a diferentes velocidades de fluido se parte de la expresión de calor:

$$Q_u = \dot{m} C_p \Delta T \quad (55)$$

Despejando la variación de temperatura:

$$\Delta T = \frac{\dot{m} C_p}{Q_u} \quad (56)$$

Este incremento de temperatura va a depender de la variación de velocidad con la que se experimente, y por ende va a depender del flujo másico. Esto se explica mediante las siguientes expresiones.

$$Q = A * V \quad (57)$$

Donde:

$A$ : Área de la sección transversal de la tubería de cobre [m<sup>2</sup>]

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

$Q$ : Caudal [m<sup>3</sup>/s]

El caudal es el dato que debe variar para poder tener diferentes velocidades en la tubería del receptor.

Además se conoce que el flujo másico es igual a:

$$\dot{m} = \rho * Q \quad (58)$$

Donde:

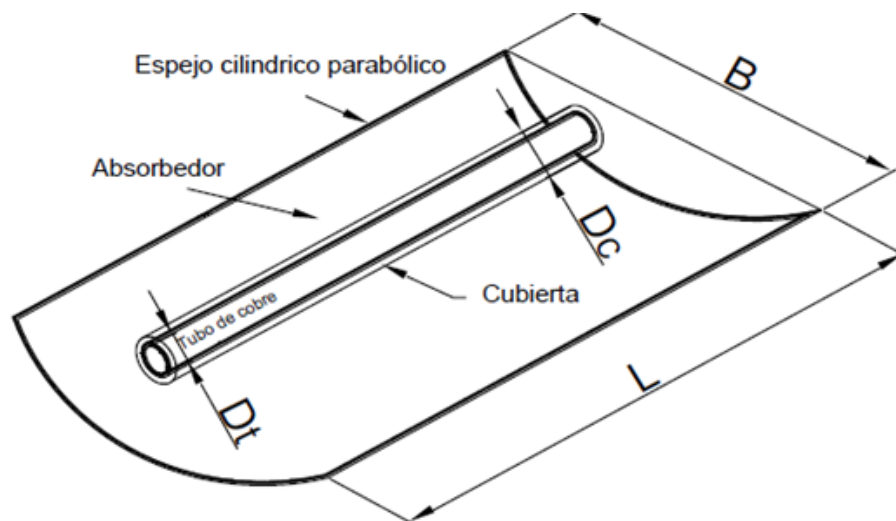
$\rho$ : Densidad del fluido [Kg/m<sup>3</sup>]

Reemplazando la expresión de caudal dentro de la fórmula de flujo másico se tiene:

$$\dot{m} = \rho * A * V \quad (59)$$

Por lo tanto se observa que el valor del flujo másico depende del valor de la velocidad, y éste a su vez del caudal que ingresa en la tubería de cobre.

Figura 32-3. Esquema colector solar



Fuente: (Benavides Salcedo, 2006 pág. 21)

El factor de concentración se lo halla mediante el cociente del área de apertura del concentrador y el área del tubo absorbedor.

$$C = \frac{A_a}{A_t} = \frac{(B - D_c) * L}{D_t * \pi * L} \quad (60)$$

### 3.5.3.3. 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)

$$\eta_c = \frac{\text{Energía útil que absorbe el fluido de trabajo}}{\text{Energía captada}} = \frac{Q_{ut}}{I * A_a} \quad (61)$$

Donde:

$Q_{ut}$ : Calor útil que absorbe el fluido de trabajo [W]

$I$ : Radiación solar directa incidente sobre el concentrador [W/m<sup>2</sup>]

$A_a$ : Área de apertura del concentrador [m<sup>2</sup>]

### 3.5.3.4. Tanque de almacenamiento

En este apartado se va a tratar del diseño óptimo con el que se realiza el tanque para que resista los esfuerzos a los cuáles va a estar sometido, además de la selección del aislante y de las pérdidas térmicas que se producen en el mismo.

- *Diseño geométrico*

Se determina las dimensiones adecuadas de un tanque de almacenamiento cilíndrico, donde permanecerá el fluido caliente que se obtiene del calentador cilíndrico parabólico.

Para el diseño, es importante basarse en la norma, ASME “Reglas para la construcción de recipientes a presión”, en donde se detalla el cálculo de longitud, el diámetro, la presión de diseño, el tipo de material y el espesor que debe tener el tanque.

Para esto se tiene parámetros ya definidos que ayudaran con el diseño, y son los siguientes:

*Capacidad de almacenamiento:* El tanque será diseñado para almacenar 20 L, debido a que el uso del agua será para el aseo de una persona, esto significa proveer de agua caliente para el lavamanos del baño de la secretaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

*Temperatura de fluido almacenado:* La temperatura final del fluido es de 70°C. Para un diseño más óptimo del tanque, la temperatura de diseño es de 90°C, con lo cual se tiene un factor de seguridad de 1,5.

*Presión de operación:* La presión a la que está sometida el tanque es de 14,5 psi.

*Material:* Se seleccionó un acero 1020, el cual es aceptado por la norma ASME.

Se define también las características mecánicas del material:

Esfuerzo último a la tensión: 55100 [psi]

Esfuerzo de fluencia: 29700 [psi]

Módulo de elasticidad: 29700 [ksi]

Conductividad térmica: 41 [W/mK]

Se realiza un análisis de las soldaduras hechas en el tanque, basándose en la sección UW de la norma, en la cual se indica que la eficiencia depende de la inspección de la soldadura, la máxima eficiencia a obtener es de 1, en este caso será de 0,7 debido a que no se dispone con una inspección que sea certificada.

- Presión de diseño

Este valor es importante porque con él se definen las dimensiones que deberá tener el material, y se lo puede obtener mediante las siguientes ecuaciones:

Si:  $P_o > 300 \text{ psi}$  entonces:

$$P = 1,1P_o \quad (62)$$

Si:  $P_o < 300 \text{ psi}$  entonces:

$$P = P_o + 30 \text{ psi} \quad (63)$$

Donde:

$P_o$ : Presión de operación [psi]



$P$ : Presión de diseño [psi]

Por lo tanto la presión diseño para este caso será:

$$P_o = 14,5 \text{ psi}$$

$$P = 14,5 \text{ psi} + 30 \text{ psi}$$

$$P = 44,5 \text{ psi}$$

Una vez encontrado este valor se calculan las dimensiones del tanque, partiendo de un factor  $F$  que es una relación entre la longitud y el diámetro del tanque.

$$F = \frac{P}{ESC} \quad (64)$$

Donde:

$P$ : Presión de diseño [psi]

$E$ : Eficiencia de la soldadura [adimensional]

$S$ : Valor del esfuerzo máximo del material [psi]

$C$ : Corrosión máxima permitida [in]

El valor de la corrosión máxima está en función del espesor del material.

$$C = \frac{1}{6} * e \quad (65)$$

Al ser un tanque pequeño el espesor seleccionado del material es de 2 mm, si este espesor no cumple con las condiciones de diseño, se escogerá un espesor mayor.

$$C = \frac{1}{6} * 0,0787 \text{ in}$$

$$C = 0,0131 \text{ in}$$

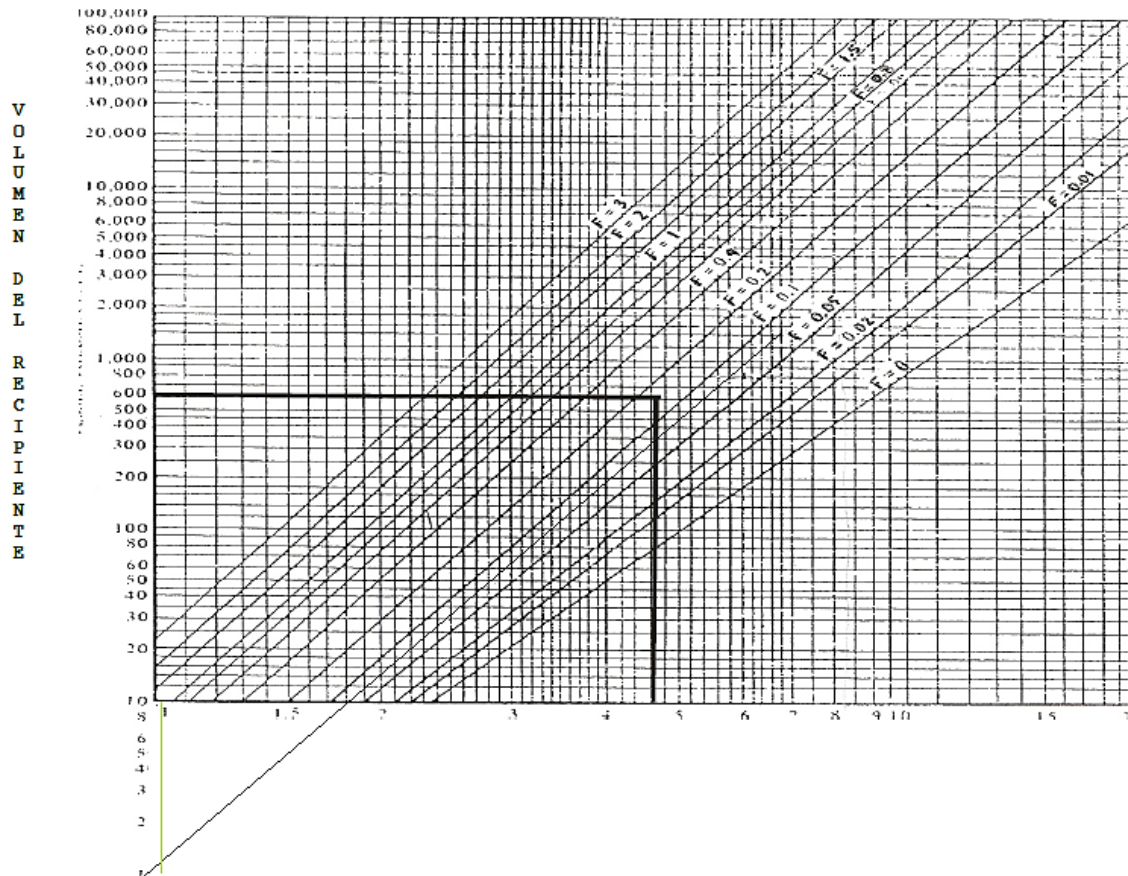
Por lo tanto:

$$F = \frac{44,5psi}{(0,7) * (55100psi) * (0,0131 in)}$$

$$F = 0,088$$

Con el volumen del recipiente que es igual a 0,706 pie<sup>3</sup> y el factor F de valor 0,088, se ingresa en la siguiente figura y se determina el diámetro del tanque.

Figura 33-3.- Determinación gráfica del diámetro del tanque de almacenamiento



Fuente: (Mejía , y otros, 2008 pág. 14)

Según la figura 33-3, el diámetro hallado es de 0,80 pies (línea verde), igual a 243 mm, aproximando a un valor comercial se escoge un diámetro de 250 mm. Con este valor se elige la longitud óptima del tanque mediante la siguiente expresión:

$$L = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (66)$$

Donde:

$L$ : Longitud óptima del tanque [m]

$V$ : Volumen del tanque [m<sup>3</sup>]

$D$ : Diámetro del tanque [m]

$$L = \frac{4 * (0,02)m^3}{\pi * (0,250)^2m^2}$$

$$L = 0,407m \approx 400 \text{ mm}$$

Es necesario además comprobar que el tanque de almacenamiento soporte la presión externa, y esto depende del espesor del tanque, el procedimiento que se va a seguir se basa en la norma ASME sección VIII.

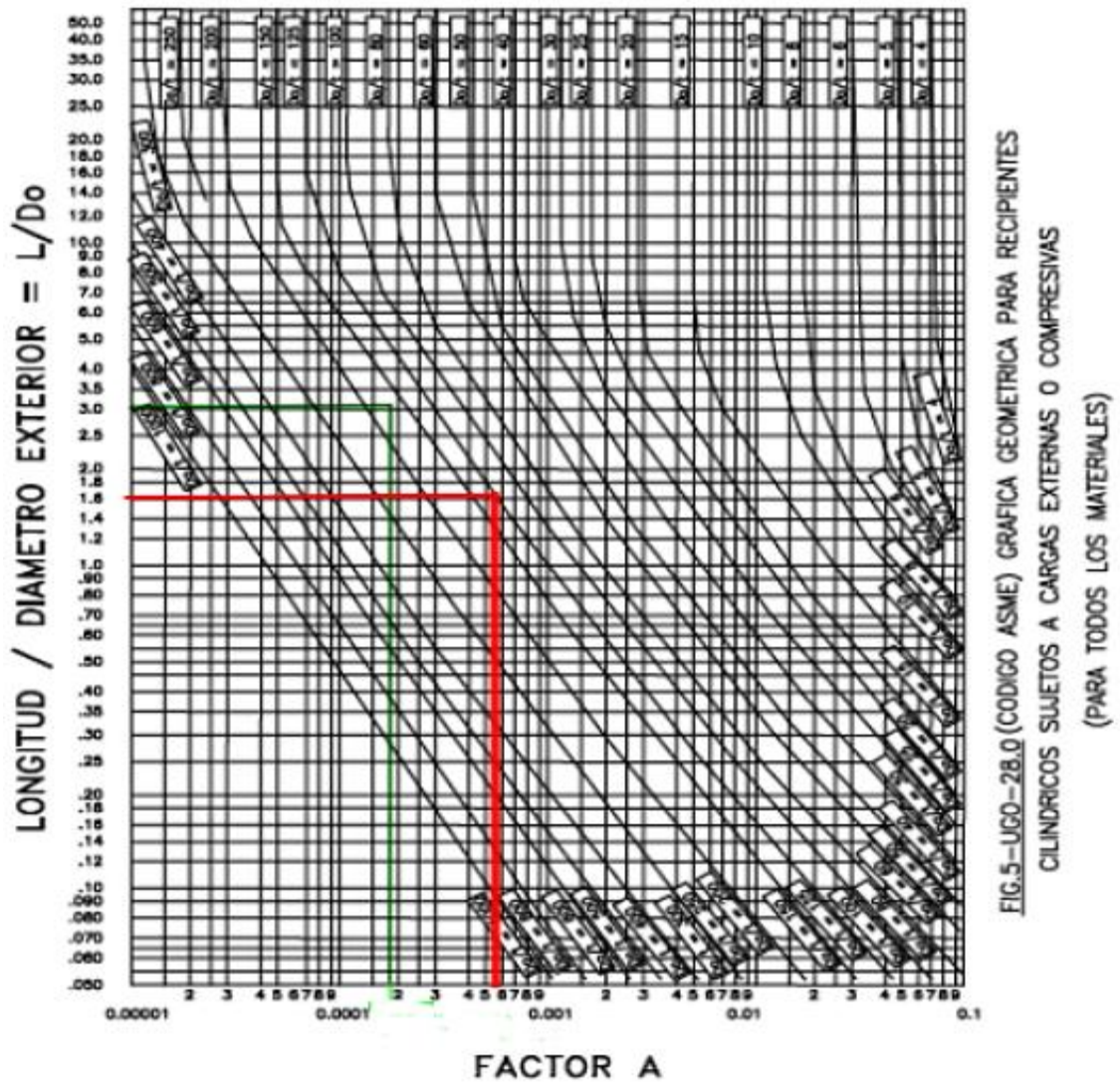
a. Con el espesor seleccionado  $t$ , se calcula las siguientes expresiones:

$$\frac{L}{D} = \frac{400}{250} = 1,6$$

$$\frac{D}{t} = \frac{250}{2} = 125$$

b. Con estos valores, ingresar en la siguiente gráfica y obtener un factor A

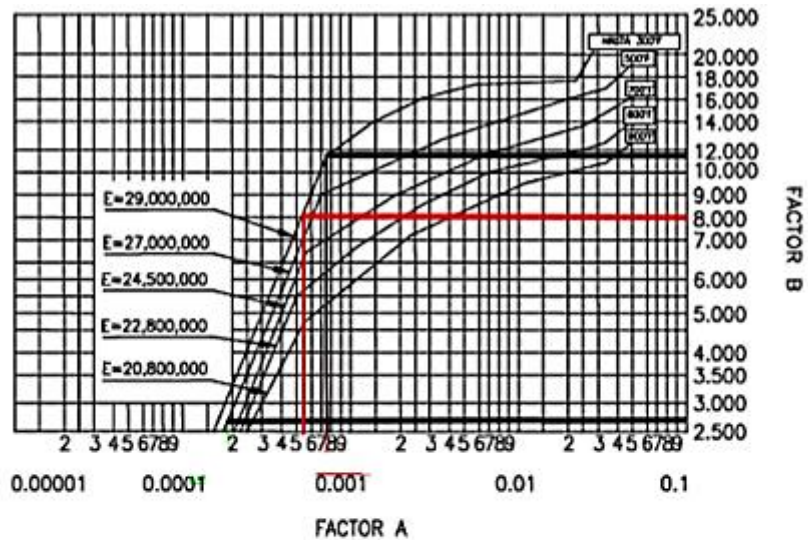
Figura 34-3.- Determinación del factor A



Fuente: (Mejía , y otros, 2008 pág. 22)

- c. Con el valor del factor A (línea roja) y la temperatura de trabajo se procede a la siguiente gráfica y se obtiene el valor del factor B.

Figura 35-3.- Determinación del factor B



LOS VALORES DE ESTA GRAFICA SON APLICABLES CUANDO EL RECIPIENTE ES FABRICADO CON ACERO AL CARBON Y LA RESISTENCIA A LA FLUENCIA ESPECIFICADA ES DE 30,000 PSI. O MAYOR. EN ESTA CATEGORIA PERTENECEN LOS SIGUIENTES MATERIALES USADOS MAS FRECUENTEMENTE:

- |          |                    |                |
|----------|--------------------|----------------|
| SA-283 C | } TODOS LOS GRADOS | } ACEROS INOX. |
| SA-285 C |                    |                |
| SA-515   |                    |                |
| SA-516   |                    |                |
| SA-53-B  |                    |                |
| SA-106-B |                    |                |

FIG. 5-UCS-28.2 (CODIGO ASME)

**NOTA:**

EN LOS CASOS EN QUE EL VALOR "A" CAIGA A LA DERECHA DEL EXTREMO DE LA LINEA DE TEMPERATURA, SUPONGASE UNA INTERSECCION CON LA PROLONGACION HORIZONTAL DEL EXTREMO SUPERIOR DE LA LINEA DE TEMPERATURA.

Fuente: (Mejía , y otros, 2008 pág. 23)

- d. Con el valor del factor B, que es igual a 8000 como indica la línea roja se calcula la presión máxima de trabajo que puede soportar el recipiente mediante la siguiente expresión:

$$P_t = \frac{4B}{3\left(\frac{D}{t}\right)} \quad (67)$$

$$P_t = \frac{4(8000)}{3(125)} = 85,33 \text{ psi}$$

La norma indica que la presión de trabajo debe ser mayor que la presión de diseño, caso contrario se debe aumentar el espesor del tanque, en este caso la presión de trabajo si cumplió con este requisito por lo tanto el espesor escogido es aceptable.

### 3.5.3.5. Pérdidas térmicas en el tanque de almacenamiento

El tanque de almacenamiento corresponde una parte importante del sistema, ya que ahí se alojará el fluido que se calienta en el calentador solar, siendo el suministro de agua caliente, por eso es importante que las pérdidas de calor en el tanque sean lo menor posible, esto se lo logra aislando térmicamente al depósito.

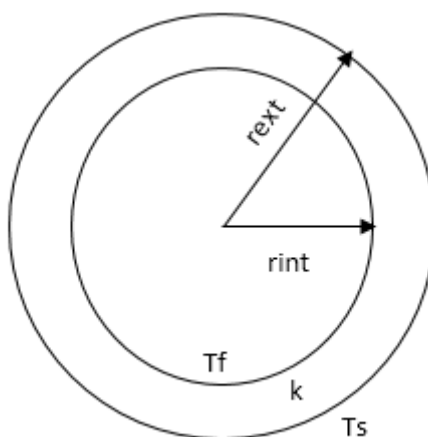
Existen en el mercado varios aislantes térmicos como papel corrugado, lana de vidrio, poliestireno, cartón, etc. En este caso se ha elegido lana de vidrio, debido a su bajo costo y a sus buenas propiedades.

A continuación se presenta los cálculos a seguir para determinar las pérdidas de calor en el tanque de almacenamiento bajo los siguientes parámetros:

- Depósito vertical cilíndrico
- Longitud del depósito: 400 [mm]
- Diámetro del depósito: 250 [mm]
- Temperatura del fluido: 70 [°C]
- Temperatura ambiente promedio: 15 [°C]
- Espesor del aislante: 40 [mm]
- Conductividad térmica del aislante: 0,04 [W/(m K)]
- Velocidad del aire: 4 [m/s]
- Resistencia convectiva interior nula, debido a que se almacena agua con un coeficiente de convección mucho mayor en comparación con el exterior.
- Se desprecia la resistencia térmica del material del depósito ya que tiene una conductividad muy alta.

Lo primero es calcular la resistencia térmica de la capa cilíndrica.

Figura 36-3.- Sección transversal del depósito cilíndrico



Fuente: Autores

$$r_{int} = \frac{D_{int}}{2} \quad (68)$$

Donde:

$D_{int}$ : Diámetro del depósito [mm]

$$r_{int} = \frac{250mm}{2} = 125 mm$$

El radio exterior es igual a la suma del radio interior más el espesor del aislante:

$$r_{ext} = r_{int} + e \quad (69)$$

$$r_{ext} = (125 + 40)mm = 165 mm$$

Una vez obtenidos el radio interior y el radio exterior se procede a calcular la resistencia térmica de la capa cilíndrica mediante la siguiente expresión:

$$R_{c-c} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi k} \quad (70)$$

Donde:

$R_{c-c}$ : Resistencia térmica de la capa de lana de vidrio. [mk/W]

$k$ : Conductividad térmica de la lana de vidrio. [W/mk]

$$R_{c-c} = \frac{\ln\left(\frac{165}{125}\right)}{2\pi(0,04)}$$

$$R_{c-c} = 1,10 \frac{mk}{W}$$

Es necesario también calcular el coeficiente de convección debido al aire para superficies exteriores, y para esto se encuentra primero un parámetro que está en base a la velocidad del aire y al diámetro del tanque,  $vD$ , donde:

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

$D$ : Diámetro exterior [m]

Si:  $vD \leq 0,00855 \frac{m^2}{s}$  entonces se tiene régimen laminar y el coeficiente de convección se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$h_{conv} = \frac{0,0081}{D} + 3,14 \sqrt{\frac{v}{D}} \quad (71)$$

Si:  $vD \geq 0,00855 \frac{m^2}{s}$  entonces se tiene régimen turbulento y el coeficiente de convección se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$h_{conv} = \frac{8,9v^{0,9}}{D^{0,1}} \quad (72)$$

Se determinará en qué régimen se encuentra sometido el tanque.

$$vD = \left(4 \frac{m}{s}\right) * (0,33m)$$

$$vD = 1,32 \frac{m^2}{s}$$

Con el valor de este parámetro se determina que el tanque se encuentra en régimen turbulento.

$$h_{conv} = \frac{8,9 * 4^{0,9}}{0,33^{0,1}}$$

$$h_{conv} = 34,62 \frac{W}{m^2K}$$



También se calcula el coeficiente de transferencia de calor por radiación, que se encuentra por la siguiente expresión según la guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos.

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s + T_{amb})(T_s^2 + T_{amb}^2) \quad (73)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Emisividad de la superficie del tanque [adimensional]

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

$T_s$ : Temperatura de la pared del tanque [K]

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

$$h_{rad} = (0,9)(5,67 * 10^{-8})(291 + 288)(291^2 + 288^2)$$

$$h_{rad} = 4,95 \frac{W}{m^2K}$$

Una vez obtenidos los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación se suma para obtener un coeficiente total.

$$h_{total} = h_{conv} + h_{rad} \quad (74)$$

$$h_{total} = 34,62 + 4,95 = 39,57 \frac{W}{m^2K}$$

Con este valor se calcula la resistencia térmica convectiva - radiante para una configuración de capa cilíndrica mediante la siguiente expresión:

$$R_{conv-rad-cil} = \frac{1}{2\pi r_{ext} h_{total}} \quad (75)$$

$$R_{conv-rad-cil} = \frac{1}{2\pi(0,165m) \left(39,57 \frac{W}{m^2K}\right)}$$

$$R_{conv-rad-cil} = 0,024 \frac{mK}{W}$$

Se encuentra finalmente el valor de la resistencia térmica total que es igual a la suma de la resistencia de la capa cilíndrica y la resistencia convectiva-radiante.

$$R_{ter\_total} = R_{conv-rad-cil} + R_{c-c} \quad (76)$$

$$R_{ter\_total} = 0,024 + 1,10 = 1,124 \frac{mK}{W}$$

Entonces la razón de pérdida de calor por metro es igual a:

$$Q_{per} = \frac{T_{int} - T_{amb}}{R_{ter\_total}} \quad (77)$$

Donde:

$T_{int}$ : Temperatura en el interior del tanque de almacenamiento [K]

$$Q_{per} = \frac{333 - 286}{1,124} = 41,81 \frac{W}{m}$$

En el tanque cilíndrico existe intercambio de calor por la superficie superior, inferior y lateral, por lo tanto el flujo de calor total perdido en el tanque queda determinado por la siguiente expresión:

$$Q_{total\_per} = \frac{Q_{per}}{2\pi r_{int}} (S_{sup} + S_L + S_{inf}) \quad (78)$$

Donde:

$S_{sup}$ : Área de la superficie superior del tanque cilíndrico [m<sup>2</sup>]

$S_L$ : Área de la superficie lateral del tanque cilíndrico [m<sup>2</sup>]

$S_{inf}$ : Área de la superficie inferior del tanque cilíndrico [m<sup>2</sup>]

$$Q_{total\_per} = \frac{Q_{per}}{2\pi r_{int}} (\pi r_{int}^2 + 2\pi r_{int}L + \pi r_{int}^2)$$

$$Q_{total\_per} = \frac{41,81}{2\pi(0,125)} (2\pi(0,125^2) + 2\pi(0,125)(0,4))$$

$$Q_{total\_per} = 21,95 W$$

### 3.5.3.6. Análisis del tiempo de decrecimiento de la temperatura en el tanque

Se realiza un análisis en el cual se obtenga el tiempo en el que la temperatura decrece hasta cierto valor, ya que durante un intervalo diferencial de tiempo,  $dt$ , la temperatura del tanque decrece una cantidad diferencial  $dT$ . El balance de energía para el tanque de almacenamiento para el intervalo de tiempo  $dt$  se expresa como la transferencia de calor desde el tanque hacia el ambiente es igual al decrecimiento de la energía del depósito durante  $dt$ .

$$UA(T - T_{amb})dt = -mCp dT \quad (79)$$

La masa  $m$  se expresa como  $m = \rho V$  y  $dT = d(T - T_{amb})$ , además se establece que la temperatura ambiente es constante, la ecuación 79 queda expresada de la siguiente manera:

$$\frac{d(T - T_{amb})}{T - T_{amb}} = -\frac{UA}{\rho V Cp} dt \quad (80)$$

Si se integra esta ecuación desde  $t=0$  en el cual  $T = T_i$ , hasta cualquier instante  $t$ , se obtiene para  $T=T(t)$ :

$$\ln\left(\frac{T(t) - T_{amb}}{T_i - T_{amb}}\right) = -\frac{UA}{\rho V Cp} * t \quad (81)$$

De la ecuación 81 se despeja el tiempo  $t$  y se alcanza una expresión que permite determinar el tiempo en que la temperatura decrece hacia cierto valor.

$$t = \frac{\ln\left(\frac{T(t) - T_{amb}}{T_i - T_{amb}}\right)}{-\frac{UA}{\rho V Cp}} \quad (82)$$

Donde:

$T(t)$ : Temperatura del fluido dentro del tanque en un tiempo  $t$  [°C]

$T_{amb}$ : Temperatura del ambiente [°C]

$T_i$ : Temperatura inicial del fluido dentro del tanque [°C]

$U$ : Coeficiente global de transferencia de calor [W/m<sup>2</sup>°C]

$A$ : Área de transferencia de calor [m<sup>2</sup>]

$C_p$ : Calor específico del agua evaluado a la temperatura filmica entre la temperatura del agua y el ambiente [J/kg°K]

$\rho$ : Densidad del del agua evaluado a la temperatura filmica entre la temperatura del agua y el ambiente [kg/m<sup>3</sup>]

$V$ : Volumen de agua dentro del tanque [m<sup>3</sup>]

El coeficiente global de pérdidas transferencia de calor se despeja de la siguiente ecuación de calor:

$$Q_{total_{per}} = UA(T_i - T_{amb}) \quad (83)$$

$$U = \frac{Q_{total_{per}}}{A(T_i - T_{amb})} \quad (84)$$

Reemplazando datos:

$$U = \frac{21,45}{0,3141(70 - 15)}$$

$$U = 1,27 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$$

De la ecuación 82 se calcula el tiempo en el que el agua se enfría hasta diferentes temperaturas, los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 16-3.- Tiempo de enfriamiento de agua a diferentes temperaturas.

Temperatura [°C]	Tiempo [segundos]	Tiempo [horas]
70	0,00	0,00
65	19776,66	5,49
60	41638,75	11,57
55	66078,48	18,36

50	93785,96	26,05
45	125771,90	34,94
40	163603,24	45,45
35	209905,05	58,31
30	269598,48	74,89
25	353731,63	98,26
20	497558,20	138,21

Fuente:(Autores)

En la tabla 16-3 se muestra el tiempo que transcurre mientras el agua se enfría a diferentes valores de temperatura. Se observa que el agua disminuye su temperatura hasta un valor de confort aceptable de 30°C cuando han transcurrido 74 horas, es decir aproximadamente 3 días.

El valor hallado es aceptable, significa que el material y el espesor escogidos del aislante son correctos.

### **3.6. Modelación matemática que permite encontrar el perfil de temperaturas en sentido longitudinal del tubo absorbedor**

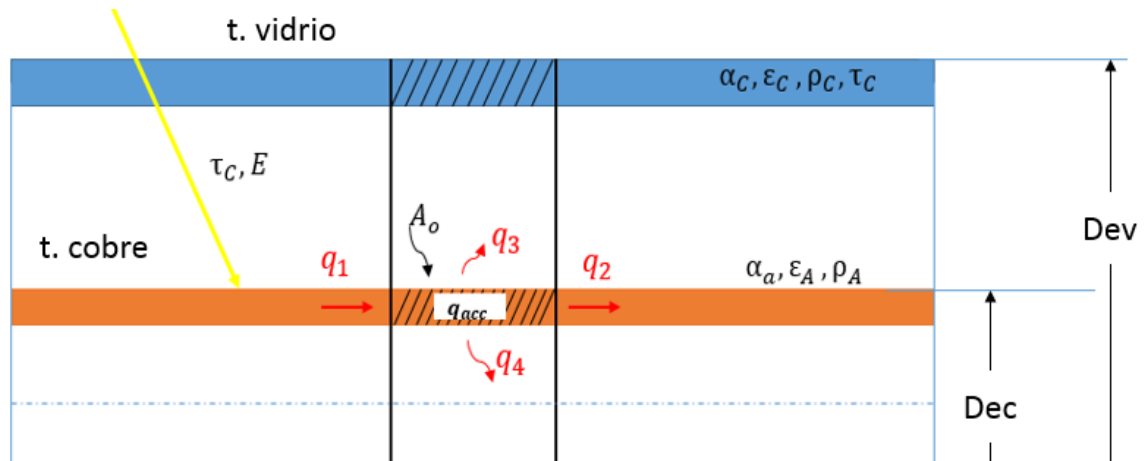
En el tubo absorbedor existe una ganancia térmica en sentido radial y longitudinal. El siguiente análisis se realiza para una ganancia de calor de forma longitudinal.

Para la modelación matemática se considera un elemento infinitesimal  $dx$  de la tubería de cobre, en este caso se obtendrá un perfil de temperaturas en sentido longitudinal del tubo absorbedor, por lo tanto se plantea las siguientes consideraciones:

- No se considera la distribución térmica en el área efectiva del sistema, ya que la mayor ganancia de calor se produce en sentido radial, de esta manera se simplifica el estudio.
- No existe un cambio de fase dentro del fluido.
- Se trata de un sistema cerrado.
- Estado estacionario.

Al analizar el proceso en estado estacionario, se reduce significativamente el análisis de la transferencia de calor en el tubo receptor.

Figura 37-3.- Modelación matemática



Fuente: (Autores)

El calor que ingresa por conducción en el elemento infinitesimal  $dx$  viene dada por la siguiente expresión:

$$Q_1 = -kA_c \frac{\partial T}{\partial x} \quad (85)$$

El calor que sale por la sección  $x + dx$  es igual a:

$$Q_2 = -kA_c \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ -kA_c \frac{\partial T}{\partial x} \right] dx \quad (86)$$

$$Q_2 = -kA_c \frac{\partial T}{\partial x} - kA_c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx$$

Existe calor por convección hacia el ambiente y hacia el fluido y se determina por las siguientes expresiones respectivamente:

$$Q_3 = U_0 \pi D_{ev} dx (T_c - T_{amb}) \quad (87)$$

$$Q_4 = U_i \pi D_{ic} dx (T_c - T_i) \quad (88)$$

La ganancia de calor en el tubo absorbedor debido a la radiación solar incidente viene expresada por:

$$Q_{sol} = \rho \tau \alpha I \pi D_c dx \quad (89)$$

El calor acumulado dentro del elemento infinitesimal en el que se realiza el análisis está directamente relacionado con el aumento de temperatura y el calor específico del material. Esta acumulación de calor se encuentra determinada por la siguiente expresión en función de la velocidad en la variación de temperatura:

$$Q_{acu} = \rho_c C_p A_c d_x \frac{\partial T}{\partial t} \quad (90)$$

Realizando un balance de energía se determina que el calor que ingresa en el elemento infinitesimal menos el calor que sale es igual al calor acumulado en la masa de espesor  $dx$ .

$$Q_e - Q_s = Q_{acu}$$

$$Q_1 + Q_{sol} - (Q_2 + Q_3 + Q_4) = Q_{acu}$$

Reemplazando:

$$-kA_c \frac{\partial T}{\partial x} + \rho\tau\alpha l\pi D_c d_x$$

$$- \left[ -kA_c \frac{\partial T}{\partial x} - kA_c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} d_x + U_0\pi D_{ev} d_x (T_c - T_{amb}) + U_i\pi D_{ic} d_x (T_c - T_i) \right]$$

$$= \rho_c C_p A_c d_x \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$-kA_c \frac{\partial T}{\partial x} + \rho\tau\alpha l\pi D_c d_x + kA_c \frac{\partial T}{\partial x} + kA_c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} d_x - U_0\pi D_{ev} d_x (T_c - T_{amb})$$

$$- U_i\pi D_{ic} d_x (T_c - T_i) = \rho_c C_p A_c d_x \frac{\partial T}{\partial t}$$

En este punto se hacen ciertas consideraciones para facilitar la resolución de la ecuación diferencial, llega un instante en el que se consigue un equilibrio térmico, por lo tanto el calor que recibe del sol sería el mismo que entra al fluido, tomando en cuenta lo dicho se llega a lo siguiente:

$$kA_c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} d_x - U_0\pi D_{ev} d_x (T_c - T_{amb}) = \rho_c C_p A_c d_x \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$kA_c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - U_0\pi D_{ev} (T_c - T_{amb}) = \rho_c C_p A_c \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{U_0\pi D_{ev} (T_c - T_{amb})}{kA_c} = \frac{\rho_c C_p}{K} \frac{\partial T}{\partial t}$$

El término  $\frac{k}{\rho_c C_p}$  depende de las propiedades físicas del material y representan la difusividad térmica:

$$\frac{k}{\rho_c C_p} = \alpha$$

Reemplazando:

$$(T_c - T_{amb}) = \theta$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{U_0 \pi D_{ec} \theta}{k A_c} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (91)$$

La siguiente resolución permite encontrar un perfil de temperaturas en el tubo absorbedor bajo régimen estacionario y en sentido longitudinal.

En el estado estacionario no hay variación de temperatura con respecto al tiempo, por lo tanto la expresión es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{U_0 \pi D_{ec} \theta}{k A_c} = 0$$

A partir de esta ecuación diferencial matemática de segundo orden, se encuentra una ecuación que determine un perfil de temperaturas que experimenta el fluido al encontrarse en reposo en toda la longitud de la tubería de cobre.

Al llegar a esta ecuación se observa que existen parámetros térmicos conocidos que son considerados como constantes.

$$m^2 = \frac{U_0 \pi D_{ec}}{k A_c}$$

$$m^2 = \frac{4(10,83)\pi(0,05)}{(385)(\pi)(0,0288)^2}$$

$$m = 2,6$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - m^2 \theta = 0$$

Resolviendo

$$\theta = \theta^{rx}$$



$$\theta' = r\theta^{rx}$$

$$\theta'' = r^2\theta^{rx}$$

Reemplazando valores se obtiene:

$$r^2 - m^2 = 0$$

Por lo tanto:

$$r = \pm m$$

La solución de la ecuación diferencial queda determinada:

$$\theta = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}$$

Se establece las condiciones de contorno



Cuando  $x=0$

$$\theta_0 = C_1 e^{m(0)} + C_2 e^{-m(0)}$$

$$\theta_0 = C_1 + C_2$$

$$\frac{d\theta}{dx} = mC_1 e^{mx} - mC_2 e^{-mx}$$

Sí:

$$\frac{d\theta}{dx} = 0$$

$$x = L$$

Entonces:

$$0 = mC_1 e^{mL} - mC_2 e^{-mL}$$

$$0 = m(C_1 e^{mL} - C_2 e^{-mL})$$

$$C_2 = C_1 e^{2mL}$$

$$\theta_0 = C_1 + C_1 e^{2mL}$$

$$C_1 = \frac{\theta_0}{1 + e^{2mL}}$$

$$C_2 = \frac{\theta_0}{1 + e^{2mL}} * e^{2mL}$$

$$C_2 = \frac{\theta_0}{1 + e^{-2mL}}$$

$$\theta_0 = T - T_{amb}$$

Por lo tanto:

$$\theta = \frac{\theta_0}{1 + e^{2mL}} e^{mx} + \frac{\theta_0}{1 + e^{-2mL}} e^{-mx}$$

Esta ecuación es la expresión hallada con las primeras condiciones de contorno

Se resuelva de la misma manera para las segundas condiciones de contorno y se llega a la siguiente expresión:

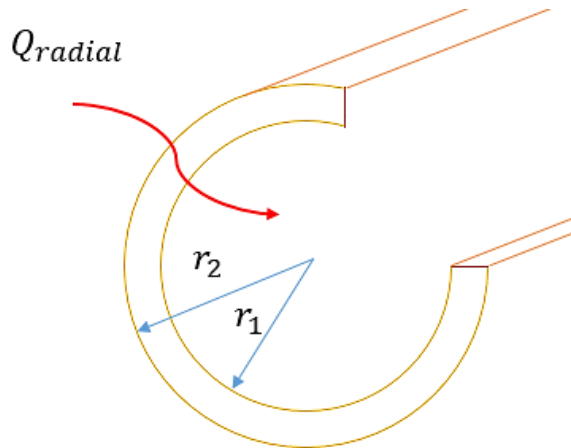
$$\theta_x = \frac{(\theta_L - \theta_0 e^{-mL})e^{mx} + (\theta_0 e^{mL} - \theta_L)e^{-mx}}{e^{mL} - e^{-mL}} \quad (92)$$

Con esta expresión se encuentra el perfil de temperatura en sentido longitudinal en el tubo cuando se encuentra calentándose en el interior en estado estacionario.

Para un análisis en sentido radial se toma un elemento infinitesimal en la sección transversal del tubo absorbedor. La modelación matemática para el sentido radial se lo realiza en coordenadas cilíndricas.

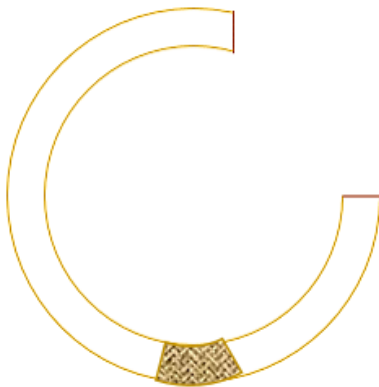
Las siguientes figuras indican la ganancia de calor en sentido radial y el elemento infinitesimal en la sección transversal del tubo.

Figura 38-3.- Ganancia de calor en sentido radial en el tubo absorbedor



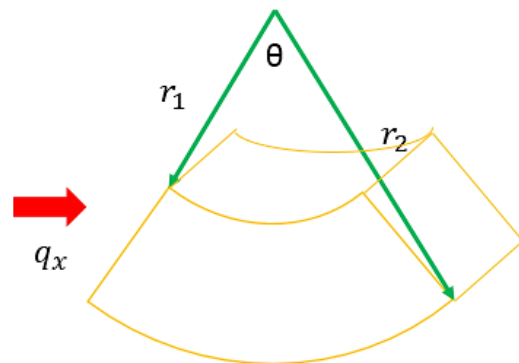
Fuente: (Autores)

Figura 39-3.- Elemento infinitesimal en la sección transversal del tubo absorbedor



Fuente: (Autores)

Figura 40-3.- Ganancia de calor en x en el elemento infinitesimal



Fuente: (Autores)

Si existe flujo variable en el tubo absorbedor la modelación matemática cambia, debido a que se toman en cuenta variables como las pérdidas por fricción en el tubo debido a que existe flujo másico y la velocidad a la que transita el fluido. El análisis térmico inicial en sentido longitudinal es similar al realizado cuando el fluido se encuentra estancado, se toma un elemento infinitesimal  $dx$  en el cual se realiza un balance energético, con la diferencia que en este balance se incluyen las variables mencionadas de pérdidas por fricción y de velocidad de fluido. Con lo cual se obtendrá un perfil de temperaturas que indica como el agua incrementa su temperatura a medida que atraviesa la tubería de cobre.



Figura 42-3.- App Compass



Fuente: (<https://play.google.com/store/apps/details?id=tntstudio.supercompass>)

Figura 43-3.- Procedimiento de ubicación del colector



Fuente: (Autores)

### 3.10. Resultado final colector solar cilíndrico parabólico

Figura 44-3.- Calentador Solar Cilíndrico Parabólico



Fuente: (Autores)

## CAPÍTULO IV

### 4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

#### 4.1. Resultados de los parámetros geométricos del colector solar cilíndrico parabólico

Establecer las dimensiones adecuadas del calentador solar es una de las partes más importantes del sistema de calentamiento, ya que de éstas depende una correcta captación de rayos solares, además que influye de manera considerable en los resultados del proceso térmico que ocurre en el colector.

Tabla 17-4.- Parámetros geométricos del colector solar cilíndrico parabólico

NOMBRE	Valor	Unidades
Ancho del concentrador.	1	M
Longitud del concentrador.	2,44	M
Diámetro del receptor.	0,0254	M
Diámetro de cubierta de vidrio.	0,05	M
Área de apertura.	2,3424	m <sup>2</sup>
Área del receptor.	0,1947	m <sup>2</sup>
Factor de concentración.	12,03	-
Altura de la parábola.	0,29	M
Distancia focal teórica.	0,225	M
Distancia focal experimental.	0,235	M

Fuente: (Autores)

El rango de valores de factor de concentración para un colector cilíndrico parabólico se encuentra de 10 hasta 40 aproximadamente, como se observa en la tabla 17-4 el valor de este factor se encuentra dentro de este rango, eso quiere decir que el diámetro del tubo receptor y las dimensiones de ancho y largo del colector son apropiados para tener una buena concentración de imagen y por lo tanto una captación alta de radiación.

Otro valor importante es la distancia focal, existe un valor teórico y otro experimental. El valor teórico parte de la ecuación de la parábola, y es a esa distancia en donde se debería ubicar el tubo receptor, pero varios autores y expertos en la construcción de este tipo de colectores recomiendan ubicar el foco de manera experimental, es decir, moviendo el tubo en el eje focal y colocarlo en donde se observe una gran cantidad de rayos solares reflejados, con eso se asegura

la mayor captación de radiación en el tubo absorbedor, debido a errores geométricos principalmente en la durante construcción.

#### 4.2. Resultados de la insolación en la ciudad de Riobamba

El cálculo de la insolación se realiza con la ecuación 1 explicada en el capítulo 2. Para esto es necesario establecer las coordenadas del lugar donde se quiere calcular dicho valor, en este caso es la ciudad de Riobamba, que tiene las siguientes coordenadas:

- Latitud: -1,6667
- Longitud:-78,6333

Pero para obtener datos más exactos se usa las coordenadas de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, que es donde se encuentra el colector solar cilíndrico parabólico.

- Latitud: -1,6578
- Longitud:-78,6763

Éstas coordenadas fueron halladas mediante la aplicación Google Maps.

Las mediciones de insolación se experimentaron durante el mes de noviembre de 2016, desde las 9 de la mañana hasta las 4 de la tarde, y se tomaron valores promedio. En la tabla 18-4 se muestra los valores de insolación promedio, por cada hora del día

Tabla 18-4.- Radiación directa en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

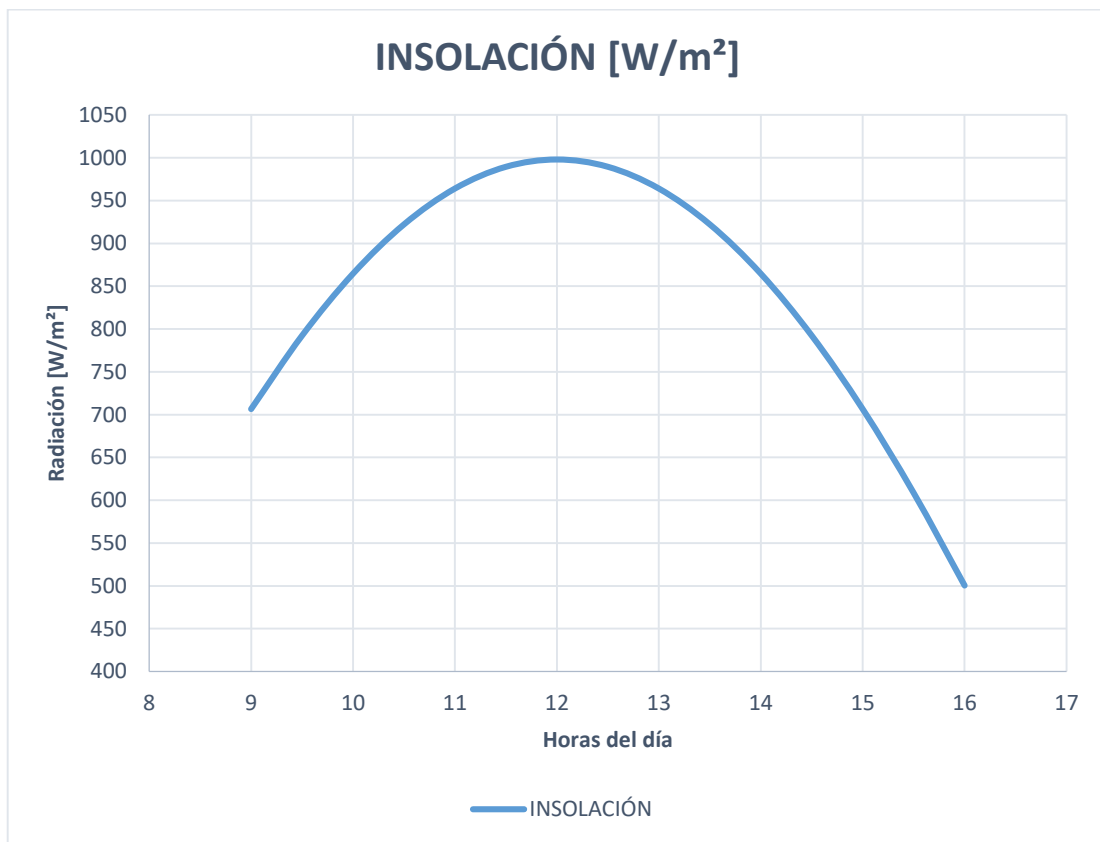
HORA	Ángulo horario (H)	Ángulo de declinación ( $\delta$ )	Ángulo de Incidencia ( $\Theta$ )	Ángulo Zenith (Z)	Insolación (I) [W/m <sup>2</sup> ]
9:00	-45°	-5,32340375°	44,75340656°	0,786331779°	706,4463074
9.30	-37,5°	-5,32340375°	37,31061543°	0,656251521°	792,2849314
10:00	-30°	-5,32340375°	29,85742555°	0,526416182°	864,6132654
10:30	-22,5°	-5,32340375°	22,39767596°	0,397081075°	922,1937515
11:00	-15°	-5,32340375°	14,93379374°	0,268984852°	964,0411717
11:30	-7,5°	-5,32340375°	7,467466811°	0,145458824°	989,4395051
12:00	0°	-5,32340375°	0°	0,063976855°	997,954179
12:30	7,5°	-5,32340375°	7,467466811°	0,145458824°	989,4395051



13:00	15°	-5,32340375°	14,93379374°	0,268984852°	964,0411717
13:30	22,5°	-5,32340375°	22,39767596°	0,397081075°	922,1937515
14:00	30°	-5,32340375°	29,85742555°	0,526416182°	864,6132654
14:30	37,5°	-5,32340375°	37,31061543°	0,656251521°	792,2849314
15:00	45°	-5,32340375°	44,75340656°	0,786331779°	706,4463074
15:30	52,5°	-5,32340375°	52,17911197°	0,916544021°	608,5661161
16:00	60°	-5,32340375°	59,57469992°	1,04682903°	500,3191147

Fuente: (Autores)

Figura 45-4.- Insolación de la ciudad de Riobamba



Fuente: (Autores)

La mayor radiación es al medio día como se indica en la figura 45-4, en este punto el colector obtendrá la mayor ganancia de calor útil, y desde ahí se observa que la radiación disminuye a medida que transcurren las horas de la tarde.

Es necesario entender que estos valores no corresponden a la radiación efectiva que va a incidir en el colector, ya que esta depende del rendimiento óptico del calentador solar. A continuación se muestra una tabla con valores de radiación efectiva por unidad de área:

Tabla 19-4.- Valores de radiación efectiva por unidad de área en el colector

Radiación directa (I) [W/m <sup>2</sup> ]	Reflectividad de la superficie concentradora ( $\rho$ )	Absortividad del tubo receptor ( $\alpha$ )	Factor de intercepción ( $\gamma$ )	Transmisividad del tubo de vidrio ( $\tau$ )	Rendimiento óptico ( $\eta_o$ ) [%]	Radiación efectiva [W/m <sup>2</sup> ]
706,44630	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	308,71703
792,28493	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	346,22851
864,61326	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	377,83599
922,19375	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	402,99866
964,04117	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	421,28599
989,43951	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	432,38506
997,9549	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	436,10597
989,43951	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	432,38506
964,04717	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	421,28599
922,17515	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	402,99866
864,61326	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	377,83599
792,28494	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	346,22851
706,44674	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	308,71703
608,56161	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	265,94339
500,31911	0,572	0,92	0,9	0,92	43,7	218,63945

Fuente: (Autores)

Los valores de radiación efectiva por unidad de área son los que determinarán la cantidad de calor útil que se obtiene en el calentador solar, por ello es importante establecer un sistema de seguimiento para lograr captar la mayor cantidad de radiación posible.

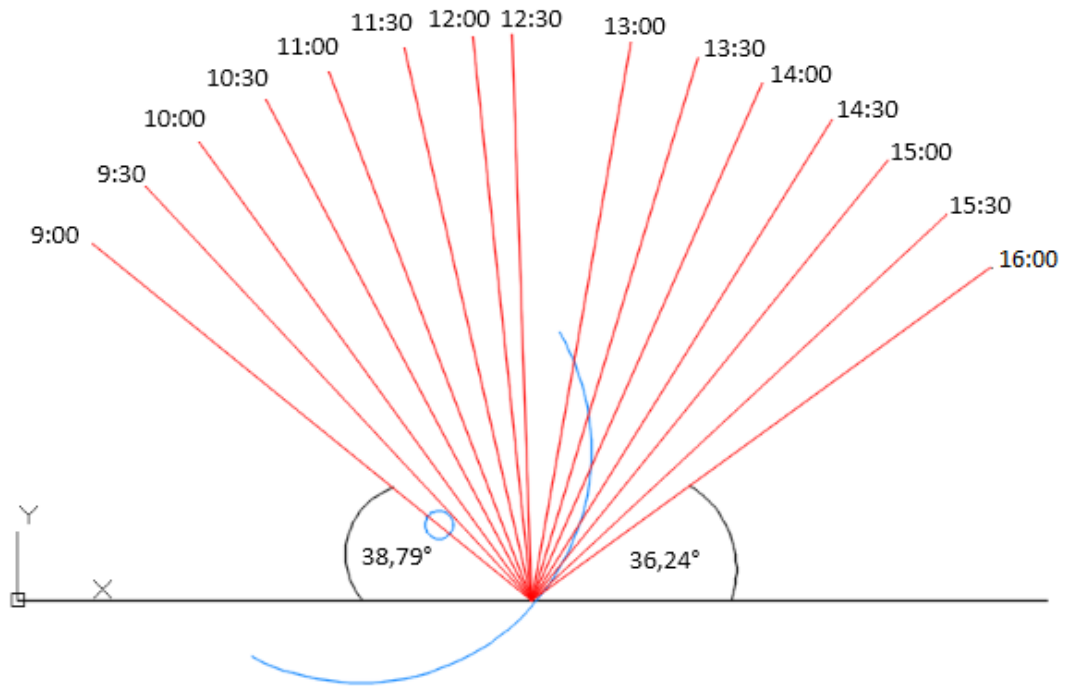
Pero es importante establecer el ángulo de elevación que se obtiene a diferentes horas del día, estos valores se los obtuvo de la página web Sunearthtools, en la cual se ingresa las coordenadas del lugar, la fecha y la hora, y de esta manera brinda datos de ángulos de elevación que forma el sol, esto ayuda a obtener un sistema de seguimiento más óptimo. Esto se explica de mejor manera en la tabla 20-4 y figura 46-4:

Tabla 20-4.- Ángulo de elevación para diferentes horas del día

FECHA	Noviembre 2016
COORDENADAS	-1,6578; -78,6763
LUGAR	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
HORA	ELEVACIÓN
9:00	38,79°
9:30	46,27°
10:00	53,75°
10:30	61,23°
11:00	68,69°
11:30	76,12°
12:00	83,42°
12:30	87,48°
13:00	80,97°
13:30	73,6°
14:00	66,15°
14:30	58,68°
15:00	51,2°
15:30	43,72°
16:00	36,24°

Fuente: (www.sunearthtools.com)

Figura 46-4.- Posiciones del colector solar a diferentes horas



Fuente: (Autores)

En la gráfica 46-4 se observa las diferentes posiciones que ocupa el calentador a diferentes horas durante un día, de esta forma se sabe que el calentador queda perpendicular al sol aproximadamente a las 12:30 pm casi durante todo el año, debido a la ubicación de Ecuador el ángulo de incidencia no varía significativamente, este dato ayuda a programar el temporizador y el variador de frecuencia, con el que se regula la velocidad del calentador, de la siguiente manera:

- Temporizador: Este se activa cada 6 min, y de esta forma activa al motor y hace girar al calentador aproximadamente 1,5 grados.
- Frecuencia: Este valor se lo dejo en 5,10 Hz, con esto se obtiene una velocidad adecuada del colector.

Con estos dos datos programados de esa manera se asegura que a las 12:30 pm el colector quede de forma perpendicular al sol, con lo cual se obtiene un sistema de seguimiento aceptable.

A continuación en las siguientes figuras se muestra la posición inicial y final del colector solar.

Figura 47-4.- Posición inicial



Fuente: (Autores)

Figura 48-4.- Posición final



Fuente: (Autores)

### **4.3. Resultados del análisis térmico**

Las pruebas experimentales en el colector solar cilíndrico parabólico se dividieron en dos partes:

- Medición del tiempo de calentamiento de un litro de agua hasta 70°C mientras permanece estancado en el tubo receptor.
- Experimentación del incremento de temperatura en el fluido cuando este pasa a través del tubo absorbedor a diferentes velocidades.

En ambos casos en el análisis térmico se itera con la temperatura del tubo de vidrio, como se explicó en el capítulo 3.

#### **4.3.1. Resultados experimentales y teóricos del tiempo de calentamiento de agua hasta 70°C**

Para realizar las pruebas experimentales se tomaron datos del tiempo que demora en calentarse el agua dentro del tubo absorbedor hasta 70°C mientras permanece el fluido estancado. Esta prueba se la realizó durante el mes de noviembre de 2016 desde las 9 de la mañana hasta las 4 de la tarde, en intervalos de 30 minutos.

La parte teórica se lo realizó en el programa Engineering Equation Solver (EES), debido a las constantes iteraciones que se realizan. A continuación se presenta la programación para la máxima radiación directa que se obtuvo a las 12 del mediodía.

## "DATOS"

Dec=0,0254 [m]

Dic=0,0244 [m]

Dev= 0,05[m]

Div=0,0475 [m]

l= 997 [W/m<sup>2</sup>]

Tamb= 290 [k]

Tcielo=275 [k]

Tiv=298,5 [k]

Tev= 298[k]

g=9,81 [m/s<sup>2</sup>]

L= 2,44 [m]

CEB=5,6704E-08 [W/((m<sup>2</sup>)\*(K<sup>4</sup>))]

Eo=0,89

Ec=0,95

T=0,92

Ref= 0,572

Ab=0,92

Fi=0,9

Tc=352,5 [k]

Aa=2,3424 [m<sup>2</sup>]

"Diámetro externo de tubería de cobre"

"Diámetro interno de tubería. de cobre"

"Diámetro externo tubería de vidrio"

"Diámetro interno tubería de vidrio"

"Irradiación"

"Temperatura ambiente"

"Temperatura del cielo"

"Temperatura interna del vidrio"

"Temperatura externa del vidrio"

"Gravedad"

"Longitud de la tubería"

"Constante de Stefan Boltzman"

"Emisividad del vidrio"

"Emisividad del cobre"

"Transmisividad del vidrio"

"Reflexividad superficie reflectora"

"Absortividad tubería de cobre"

"Factor de intercepción"

"Temperatura tubería de cobre"

"Área de apertura"

## "CÁLCULO DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DEBIDO AL VIENTO"

"Propiedades del Aire"

"Datos"

$T_{prom} = (T_{ev} + T_{amb}) / 2$

"Temperatura promedio"

$K = 0,02514 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$

"Conductividad térmica del aire1"

$\nu_{da} = 1,825E-05 \text{ [kg/(m}^2\text{s)]}$

"Viscosidad dinamica del aire1"

$\rho_{da} = 1,204 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

"Densidad del aire1"

$V_{a1} = 2 \text{ [m/s]}$

"Velocidad del aire1"

$Re_1 = (\rho_{da} * V_{a1} * Dev) / \nu_{da}$

"Reynolds"

$Nu_1 = 0,3 * (Re_1)^{0,6}$

"Nusselt"

$h_v = (Nu_1 * K) / Dev$

"Coeficiente de transferencia debido al viento"

## "CÁLCULO DE CALOR PERDIDO DE LA CUBIERTA AL AMBIENTE"

$A_v = \pi * Dev * L$

"Área cubierta de vidrio"

$Q_{p1} = (h_v * A_v * (T_{ev} - T_{amb})) + (E_o * CEB * A_v * ((T_{ev}^4) - (T_{cielo}^4)))$

## "CÁLCULO DE CALOR PERDIDO DE LA TUBERÍA DE COBRE A LA CUBIERTA DE VIDRIO"

$A_c = \pi * Dec * L$

"Area tubería de cobre"

$L_c = (Div - Dec) / 2$

"Longitud característica"

## "Propiedades del Aire entre la cubierta y la tubería de cobre"

$T_{prom2} = (T_c + T_{iv})/2$  "Temperatura promedio entre el cobre y el vidrio"

$K_1 = 0,02735 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$  "Conductividad térmica del aire"

$Pr = 0,7228$  "Número de Prandtl"

$\nu_{aire1} = 1,798 \times 10^{-5} \text{ [(m}^2\text{)/s]}$  "Viscosidad cinemática del aire"

$B_1 = 1/T_{prom2}$  "Coeficiente de expansión térmica"

$Ra = (g \cdot B_1 \cdot (T_c - T_{iv}) \cdot (L_c^3) \cdot Pr) / (\nu_{aire1}^2)$  "Número de Rayleigh para el aire"

## "Factor geométrico para dos cilindros concéntricos"

$F_{cil} = ((\ln(Div/Dec))^4) / ((L_c^3) \cdot (((Dec^{-3/5}) + (Div^{-3/5}))^5))$

## "Conductividad térmica efectiva"

$k_{ef} = (0,386 \cdot K_1) \cdot ((Pr / (0,861 + Pr))^{1/4}) \cdot ((F_{cil} \cdot Ra)^{1/4})$

## "Razón de Transferencia de Calor entre cilindros por convección"

$Q_{contv} = ((2 \cdot \pi \cdot k_{ef} \cdot (T_c - T_{iv})) / (\ln(Div/Dec))) \cdot L$

## "Razón de Transferencia de Calor entre cilindros por radiación"

$Q_{radtv} = (CEB \cdot A_c \cdot ((T_c^4) - (T_{iv}^4))) / ((1/E_c) + (((1 - E_o)/E_o) \cdot (Dec/Div)))$

## "Razón total de la pérdida de calor entre la cubierta de vidrio y la tubería"

$Q_{p2} = Q_{contv} + Q_{radtv}$

## "CÁLCULO DE COEFICIENTE DE PÉRDIDAS"

$U_l = Q_{p2} / (A_c \cdot (T_c - T_{amb}))$

## "CÁLCULO DE CALOR ÚTIL"

$Nu_2 = 4,364$  "Nusselt dentro de la tubería de cobre"

$k_a = 0,623 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$  "Conductividad térmica del fluido"

$h_{fi} = (Nu_2 \cdot k_a) / Dic$  "Coeficiente de transferencia dentro del tubo"

$k_c = 385 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$  "Conductividad térmica del cobre"

$F = (1/U_l) / ((1/U_l) + (Dec / (h_{fi} \cdot Dic)) + ((Dec \cdot \ln(Dec/Dic)) / (2 \cdot k_c)))$  "Factor de eficiencia del colector"

$R = I \cdot T \cdot Re \cdot F \cdot A_b$  "Radiación por unidad de área en la apertura"

$Q_u = (F \cdot A_a \cdot R) - (A_c \cdot U_l \cdot (T_c - T_{amb}))$  "Calor útil en el colector"



### "CÁLCULO DEL TIEMPO DE CALENTAMIENTO"

$C_p=4179 \text{ [J/(Kg*K)]}$	"Calor específico del fluido"
$M=1,44 \text{ [Kg]}$	"Masa de agua"
$T_{ef}=288 \text{ [K]}$	"Temperatura de entrada del fluido"
$T_{sf}=343 \text{ [k]}$	"Temperatura de salida del fluido"
$time=(M*C_p*(T_{sf}-T_{ef}))/Q_u$	"Tiempo de calentamiento de agua"

### 4.3.2. Resultados del análisis térmico para calcular el tiempo de calentamiento con una radiación de $997 \text{ W/m}^2$

$A_a = 2,342 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_b = 0,92$
$A_c = 0,1947 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_v = 0,3833 \text{ [m}^2\text{]}$
$B_1 = 0,003072 \text{ [1/K]}$	$CEB = 5,670E-08 \text{ [W/((m}^2\text{)*(K}^4\text{))]}$
$C_p = 4179 \text{ [J/(Kg*K)]}$	$da_1 = 1,204 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
$Dec = 0,0254 \text{ [m]}$	$Dev = 0,05 \text{ [m]}$
$Dic = 0,0244 \text{ [m]}$	$Div = 0,0475 \text{ [m]}$
$Ec = 0,95$	$EO = 0,89$
$F = 0,9077$	$F_{cil} = 0,1365 \text{ [dim/m}^8\text{]}$
$Fi = 0,9$	$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
$h_{fi} = 111,4 \text{ [W/m}^2\text{-K]}$	$h_v = 29,52 \text{ [W/m}^2\text{-K]}$
$I = 997 \text{ [W/m}^2\text{]}$	$K = 0,02514 \text{ [W/(m*K)]}$
$K_1 = 0,02735 \text{ [W/(m*K)]}$	$ka = 0,623 \text{ [W/(m*K)]}$
$kc = 385 \text{ [W/(m*K)]}$	$kef = 0,04415 \text{ [W/m-K]}$
$L = 2,44 \text{ [m]}$	$Lc = 0,01105 \text{ [m]}$
$M = 1,44 \text{ [kg]}$	$Nu_1 = 58,71$
$Nu_2 = 4,364$	$Pr = 0,7228$
$Q_{contv} = 58,39 \text{ [W]}$	$Q_{p1} = 132,4 \text{ [W]}$
$Q_{p2} = 132,4 \text{ [W]}$	$Q_{radtv} = 74,02 \text{ [W]}$
$Q_u = 791,3 \text{ [W]}$	$R = 434,4 \text{ [W/m}^2\text{]}$
$Ra = 4910$	$Re_1 = 6597$

$R_{ef} = 0,572$   $T = 0,92$   
 $T_{amb} = 290$  [K]  $T_c = 352,5$  [K]  
 $T_{cielo} = 275$  [K]  $T_{ef} = 288$  [K]  
 $T_{ev} = 298$  [K] **time = 418,3** [J/W]  
 $T_{iv} = 298,5$  [K]  $T_{prom} = 294$  [K]  
 $T_{prom2} = 325,5$  [K]  $T_{sf} = 343$  [K]  
 $U_l = 10,88$  [W/m<sup>2</sup>K]  $V_{a1} = 2$  [m/s]  
 $v_{caire1} = 0,00001798$  [(m<sup>2</sup>)/s]  $v_{da} = 0,00001825$  [kg/(m\*s)]

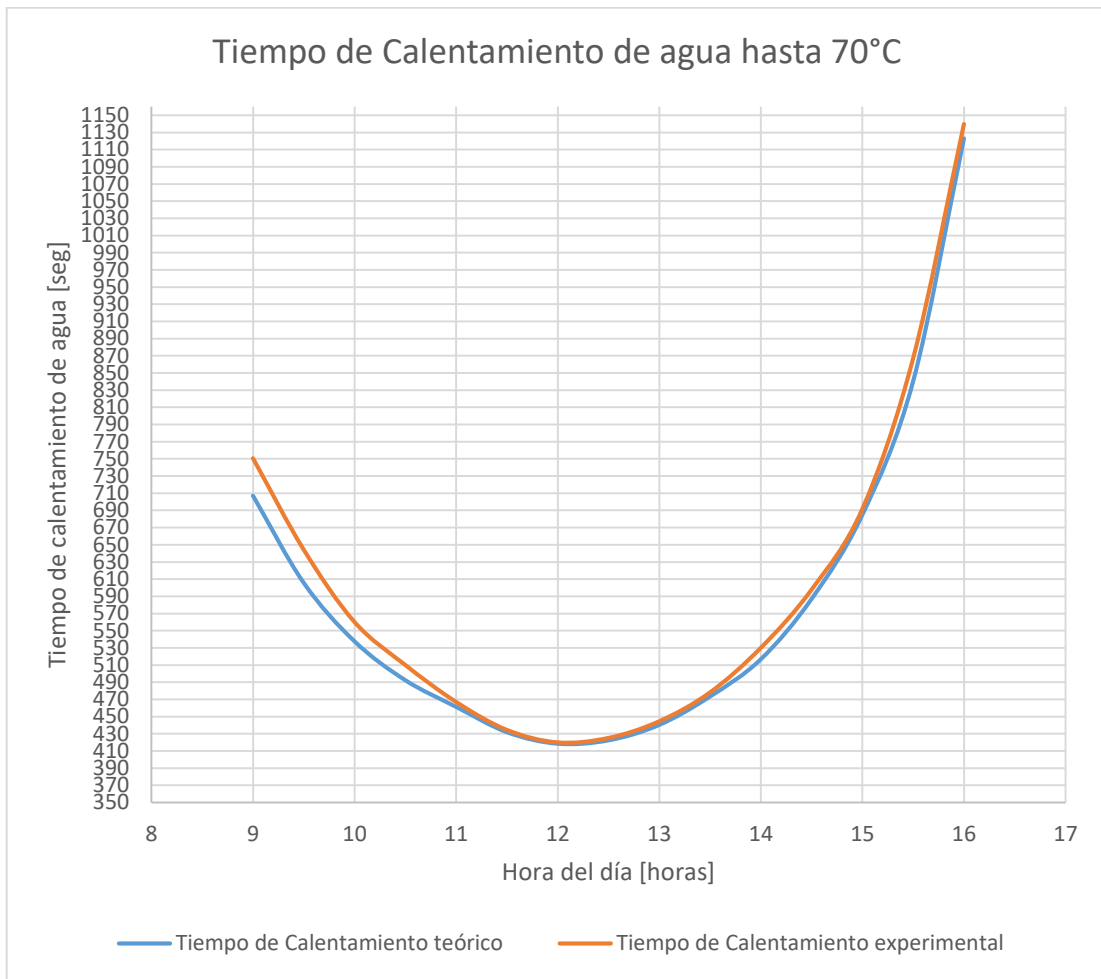
Time es el tiempo que se demora en calentarse el agua hasta la temperatura de 70°C, en este caso para la máxima radiación del día es de 418,3 segundos o 6 minutos con 58 segundos. A continuación en la siguiente tabla se detallan los resultados teóricos y experimentales con las diferentes radiaciones obtenidas durante el día.

Tabla 21-4.- Tiempo de calentamiento de agua teórico con diferentes medidas de radiación

Hora	Insolación [W/m <sup>2</sup> ]	Radiación efectiva [W/m <sup>2</sup> ]	Calor Útil [W]	Coefficiente de pérdidas [W/m <sup>2</sup> K]	Tiempo teórico [seg]	Tiempo experimental [seg]
9:00	706	307,6	510,7	10,68	707	750,8
9:30	792	345,1	591,3	10,74	605,5	644,3
10:00	864	376,5	660,7	10,72	537,4	560,2
10:30	922	401,7	715,2	10,79	492,2	510,2
11:00	964	420	756,7	10,76	461,2	467,2
11:30	989	430,9	780,6	10,83	431,7	434,6
12:00	997	434,4	791,3	10,88	418,3	420,1
12:30	989	430,9	783,9	10,88	422,2	425,3
13:00	964	420	758,7	10,82	440,2	444,7
13:30	922	401,7	718,5	10,83	473,2	478,3
14:00	864	376,5	664	10,76	516,6	530,2
14:30	792	345,1	594,7	10,79	586,9	598
15:00	706	307,6	514	10,78	684,9	691,9
15:30	608	264,9	422,5	10,76	840,3	867,2
16:00	500	217,9	321,4	10,75	1123	1139,8

Fuente: (Autores)

Figura 49-4.- Tiempo de calentamiento de agua hasta 70°C a diferentes horas del día



Fuente: (Autores)

En la gráfica 49-4 se observa que en las primeras horas del día de 9 a 11 de la mañana existe una diferencia notable en el tiempo de calentamiento, debido a la incidencia de radiación menor, por lo tanto la radiación real era menor que la radiación teórica, a partir de las 12 del mediodía se observa que la gráfica se estabiliza y los tiempos de calentamiento teórico y experimental son muy cercanos.

Como era de esperarse, el tiempo de calentamiento de agua es menor a medida que la radiación aumenta, la gráfica muestra que aproximadamente desde las 11 am hasta las 13:30 pm el tiempo que demora en calentarse el agua es bajo, a partir de esa hora el tiempo vuelve a aumentar debido a que la radiación empieza a disminuir.

### 4.3.3. Resultados del incremento de temperatura del agua a diferentes velocidades

El modo de cálculo fue basado en la ejecución del programa Engineering Equation Solver (EES), la programación es la misma que la mostrada en el apartado anterior con la diferencia de que existe ahora flujo másico, con lo cual se aumenta en la programación datos de velocidad de fluido para obtener diferentes valores de temperatura.

El caudal medido dentro del sistema es de 0,25 L/s. A partir de ese caudal y del área del tubo se calculó las diferentes velocidades con las que se experimentó.

A continuación se muestra la programación de la modelación matemática usada para calcular el incremento de temperatura a una velocidad de 0,034m/s.

```
"DATOS"  
Dec=0,0254 [m] "Diámetro externo de tubería de cobre"  
Dic=0,0234 [m] "Diámetro interno de tubería de cobre"  
Dev= 0,05[m] "Diámetro externo tubería de vidrio"  
Div=0,0475 [m] "Diámetro interno tubería de vidrio"  
I= 997 [W/m^2] "Irradiación"  
Tamb= 290 [k] "Temperatura ambiente"  
Tcielo=275 [k] "Temperatura del cielo"  
Tiv=298,5 [k] "Temperatura interna del vidrio"  
Tev= 298 [k] "Temperatura externa del vidrio"  
g=9,81 [m/s^2] "Gravedad"  
L= 2,44 [m] "Longitud de la tubería"  
CEB=5,6704E-08 [W/((m^2)*(K^4))] "Constante de Stefan Boltzman"  
Eo=0,89 "Emisividad del vidrio"  
Ec=0,95 "Emisividad del cobre"  
T=0,92 "Transmisividad del vidrio"  
Ref= 0,572 "Reflexividad superficie reflectora"  
Ab=0,92 "Absortividad tubería de cobre"  
Fi=0,9 "Factor de intercepción"  
Tc=352,5[k] "Temperatura tubería de cobre"  
Aa=2,3424 [m^2] "Área de apertura"  
Cp=4179 [J/(Kg*K)] "Calor específico del fluido"  
Tef=288 [K] "Temperatura de entrada del fluido"
```

### "CÁLCULO DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DEBIDO AL VIENTO"

#### "Propiedades del Aire"

$$T_{prom} = (T_{ev} + T_{amb})/2$$

"Temperatura promedio"

$$K = 0,02551 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$$

"Conductividad termica del aire1"

$$\nu_{da} = 1,849E-05 \text{ [kg/(m}^2\text{s)]}$$

"Viscosidad dinamica del aire1"

$$\rho_{da} = 1,184 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

"densidad del aire1"

$$V_{a1} = 2 \text{ [m/s]}$$

"Velocidad del aire1"

$$Re_1 = (\rho_{da} * V_{a1} * \nu_{da}) / \nu_{da}$$

"Reynolds"

$$Nu_1 = 0,3 * (Re_1)^{0,6}$$

"Nusselt"

$$h_v = (Nu_1 * K) / \nu_{da}$$

"Coeficiente de transferencia debido al viento"

### "CALCULO FLUJO MÁSIICO"

$$V = 0,034 \text{ [m/s]}$$

"VELOCIDAD DEL AGUA"

$$St = (\pi * (D_{ec}^2)) / 4$$

"Sección transversal de la tubería de cobre"

$$\rho_{den} = 998 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

"Densidad del agua en tuberia de cobre"

$$m_p = \rho_{den} * St * V$$

"Flujo másico"

### "CÁLCULO CALOR PERDIDO DE LA CUBIERTA AL AMBIENTE"

$$A_v = \pi * D_{ev} * L$$

"Área cubierta de vidrio"

$$Q_{p1} = (h_v * A_v * (T_{ev} - T_{amb})) + (E_o * CEB * A_v * ((T_{ev}^4) - (T_{cielo}^4)))$$

"Calor perdido de la cubierta al ambiente"

### "CÁLCULO DE CALOR PERDIDO DE LA TUB. DE COBRE A LA CUBIERTA DE VIDRIO"

$$A_c = \pi * D_{ec} * L$$

"Área tubería de cobre"

$$L_c = (D_{iv} - D_{ec}) / 2$$

"Longitud característica para dos cilindros concéntricos"

#### "Propiedades del Aire"

$$T_{prom1} = (T_c + T_{iv}) / 2$$

"Temperatura promedio entre el cobre y el vidrio"

$$K_1 = 0,02808 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$$

"Conductividad termica del aire"

$$Pr = 0,7202$$

"Número de Prandtl"

$$\nu_{caire1} = 1,896E-05 \text{ [(m}^2\text{)/s]}$$

"Viscosidad cinematica del aire"

$$B_1 = 1 / T_{prom1}$$

"Coeficiente de expansion termica"

#### "Número de Rayleigh"

$$Ra = (g * B_1 * (T_c - T_{iv}) * (L_c^3) * Pr) / (\nu_{caire1}^2)$$

#### "Factor geométrico para dos cilindros concéntricos"

$$F_{cil} = ((LN(D_{iv}/D_{ec}))^4) / ((L_c^3) * (((D_{ec}^{-3/5}) + (D_{iv}^{-3/5}))^5))$$

#### "Conductividad térmica efectiva"

$$k_{ef} = (0,386 * K_1) * ((Pr / (0,861 + Pr))^{1/4}) * ((F_{cil} * Ra)^{1/4})$$

#### "Razon de Transferencia de Calor entre cilindros por conveccion"

$$Q_{contv} = ((2 * \pi * k_{ef} * (T_c - T_{iv})) / (LN(D_{iv}/D_{ec}))) * L$$

#### "Razon de Transferencia de Calor entre cilindros por radiación"

$$Q_{radtv} = (CEB * A_c * ((T_c^4) - (T_{iv}^4))) / ((1/E_c) + (((1 - E_o)/E_o) * (D_{ec}/D_{iv})))$$

#### "Razón total de la pérdida de calor entre la cubierta de vidrio y la tubería"

$$Q_{p2} = Q_{contv} + Q_{radtv}$$

#### "CÁLCULO DE COEFICIENTE DE PÉRDIDAS"

$$UI=Qp2/(Ac*(Tc-Tamb))$$

#### "CÁLCULO DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR DENTRO DEL TUBO"

$$Tprom2= (Tef+Tc)/2$$
 "Temperatura promedio dentro de la tubería de cobre"

$$vdag=0,504E-03 [kg/(m*s)]$$
 "Viscosidad dinamica del agua"

$$dag=985,2 [kg/m^3]$$
 "densidad del agua"

$$Vag=0,034 [m/s]$$
 "Velocidad del agua"

$$Re2=(dag*Vag*Dic)/vdag$$
 "Reynolds del agua"

$$Prf=6,14$$
 "Prandtl del fluido a la temperatura del fluido"

$$Prc=1,96$$
 "Prandtl del fluido a la temperatura del cobre"

$$ff=((0,79*(LN(Re2)))-1,64)^{-2}$$
 "Factor de fricción dentro de la tubería"

#### "Nusselt dentro de la tubería de cobre"

$$Nu2=(((ff/8)*(Re2-1000)*(Prf))/(1+(12,7*(SQRT(ff/8))*((Prf^{2/3})-1))))*((Prf/Prc)^{0,11})$$

$$ka=0,649 [W/(m*K)]$$
 "Conductividad térmica del fluido"

$$hfi=(Nu2*ka)/Dic$$
 "Coeficiente de transferencia dentro del tubo"

$$kc=385[W/(m*K)]$$
 "Conductividad térmica del cobre"

#### "Factor de eficiencia del colector"

$$F=(1/UI)/((1/UI)+(Dec/(hfi*Dic))+((Dec*LN(Dec/Dic))/(2*kc)))$$

$$F1=(mp*Cp)/(Ac*UI*F)$$

$$F2=F1*(1-(EXP(-1/F1)))$$
 "Factor de flujo del colector"

$$FR=F*F2$$
 "Factor de remoción de calor"

$$R=I*T*Ref*Fi*Ab$$
 "Radiación por unidad de area en la apertura"

#### "CÁLCULO DE CALOR ÚTIL"

$$Qu=(FR*Aa*R)-(Ac*UI*(Tc-Tamb))$$
 "Calor útil en el colector"

$$Tsf=(Qu/(mp*Cp))+Tef$$
 "Temperatura de salida del fluido"

#### "CÁLCULO DE INCREMENTO DE TEMPERATURA"

$$DT=Tsf-Tef$$
 "Variación de temperatura"

#### 4.3.4. Resultados del análisis térmico para calcular el incremento de temperatura con una velocidad de 0,034 m/s

Para conseguir las velocidades deseadas fue necesario el uso de una válvula de paso a la entrada del sistema.

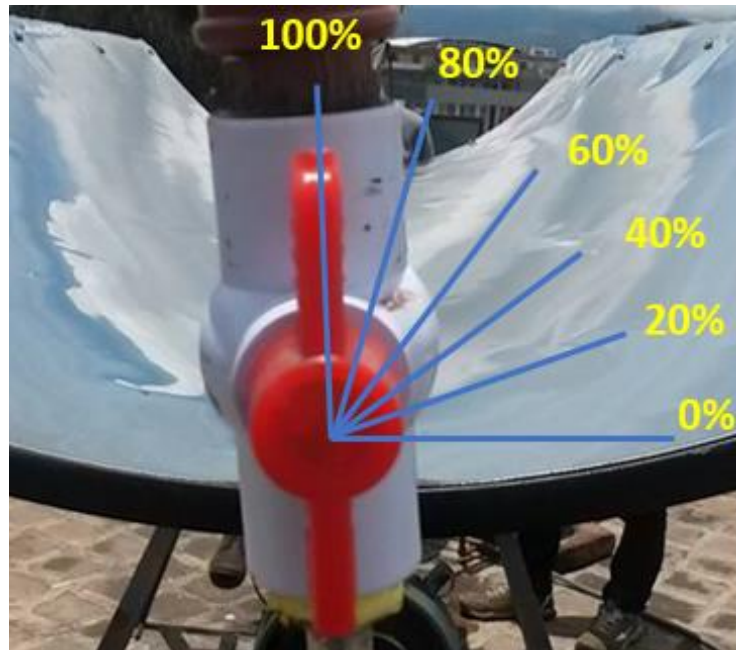
$Aa = 2,342 \text{ [m}^2\text{]}$   
 $Ac = 0,1947 \text{ [m}^2\text{]}$   
 $B1 = 0,003012 \text{ [1/K]}$   
 $Cp = 4179 \text{ [J/(Kg*K)]}$   
 $dag = 985,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$   
 $den = 998 \text{ [kg/m}^3\text{]}$   
 $Dic = 0,0234 \text{ [m]}$   
 $DT = 11,53 \text{ [K]}$   
 $Eo = 0,89$   
 $F1 = 40,23$   
 $Fcil = 0,1365 \text{ [dim/m}^8\text{]}$   
 $Fi = 0,9$   
 $g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$   
 $hv = 29,42 \text{ [W/m}^2\text{K]}$   
 $K = 0,02551 \text{ [W/(m*K)]}$   
 $ka = 0,649 \text{ [W/(m*K)]}$   
 $kef = 0,04541 \text{ [W/m-K]}$   
 $Lc = 0,01105 \text{ [m]}$   
 $Nu1 = 57,67$   
 $Pr = 0,7202$   
 $Prf = 6,14$   
 $Qp1 = 131,7 \text{ [W]}$   
 $Qradtv = 62,06 \text{ [W]}$   
 $R = 434,4 \text{ [W/m}^2\text{]}$   
 $Re1 = 6403$   
 $Ref = 0,572$   
 $T = 0,92$   
 $Tc = 363 \text{ [K]}$   
 $Tef = 293 \text{ [K]}$   
 $Tiv = 301 \text{ [K]}$   
 $Tprom1 = 332 \text{ [K]}$   
 $Tsf = 304,5 \text{ [K]}$   
 $V = 0,034 \text{ [m/s]}$   
 $Vag = 0,034 \text{ [m/s]}$   
 $vda = 0,00001849 \text{ [kg/(m*s)]}$

$Ab = 0,92$   
 $Av = 0,3833 \text{ [m}^2\text{]}$   
 $CEB = 5,670E-08 \text{ [W/((m}^2\text{)*(K}^4\text{))]}$   
 $da1 = 1,184 \text{ [kg/m}^3\text{]}$   
 $Dec = 0,0254 \text{ [m]}$   
 $Dev = 0,05 \text{ [m]}$   
 $Div = 0,0475 \text{ [m]}$   
 $Ec = 0,64$   
 $F = 0,9544$   
 $F2 = 0,9877$   
 $ff = 0,05762$   
 $FR = 0,9426$   
 $hfi = 218,3 \text{ [W/m}^2\text{K]}$   
 $I = 997 \text{ [W/m}^2\text{]}$   
 $K1 = 0,02808 \text{ [W/(m*K)]}$   
 $kc = 385 \text{ [W/(m*K)]}$   
 $L = 2,44 \text{ [m]}$   
 $mp = 0,01719 \text{ [kg/s]}$   
 $Nu2 = 7,873$   
 $Prc = 1,96$   
 $Qcontv = 68,95 \text{ [W]}$   
 $Qp2 = 131 \text{ [W]}$   
 $Qu = 828,2 \text{ [W]}$   
 $Ra = 4952$   
 $Re2 = 1555$   
 $St = 0,0005067 \text{ [m}^2\text{]}$   
 $Tamb = 293 \text{ [K]}$   
 $Tcielo = 275 \text{ [K]}$   
 $Tev = 300,5 \text{ [K]}$   
 $Tprom = 296,8 \text{ [K]}$   
 $Tprom2 = 328 \text{ [K]}$   
 $UI = 9,612 \text{ [W/m}^2\text{K]}$   
 $Va1 = 2 \text{ [m/s]}$   
 $vcaire1 = 0,00001896 \text{ [(m}^2\text{)/s]}$   
 $vdag = 0,000504 \text{ [kg/(m*s)]}$

DT es el incremento de temperatura que ocurre cuando el fluido ingresa en la tubería de cobre a una velocidad de 0,034 m/s y a una temperatura de 20°C. Dicho aumento de temperatura es de 11,53°C.

En la tabla 22-4 se muestran los resultados de incrementos de temperatura teóricos y experimentales a diferentes velocidades de fluido.

Figura 50-4.- Porcentaje de apertura de la válvula de paso



Fuente: (Autores)

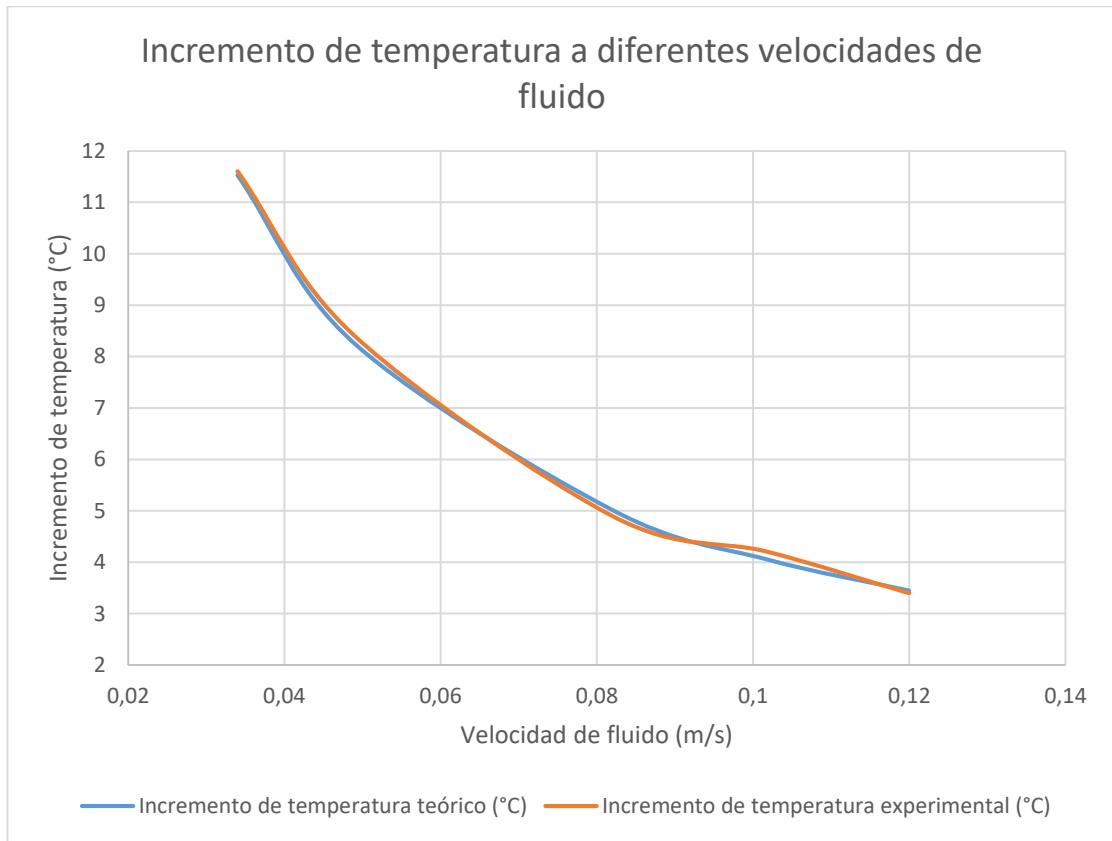
Tabla 22-4.- Incremento de temperatura a diferentes velocidades de fluido

Velocidad (m/s)	Flujo másico (kg/s)	Incremento de temperatura teórico (°C)	Incremento de temperatura experimental (°C)
0,12	0,06068	3,45	3,4
0,102	0,05158	4,049	4,2
0,082	0,04147	5,017	4,9
0,049	0,02478	8,253	8,4
0,034	0,01719	11,53	11,6

Fuente: (Autores)



Figura 51-4.- Incremento de temperatura a diferentes velocidades de fluido



Fuente: (Autores)

Como se observa en el gráfico 51-4 mientras el fluido pasa a través de la tubería a una velocidad muy baja, adquiere mayor temperatura, mientras la velocidad sigue aumentando el incremento de temperatura en el fluido disminuye. Por lo tanto como conclusión es que a menor velocidad de fluido mayor es el incremento en la temperatura.

#### 4.3.5. Resultados del perfil de temperatura en el tubo absorbedor en régimen estacionario

El perfil que se obtiene a partir de la ecuación del gradiente de temperaturas en sentido longitudinal. Esta ecuación indica el calentamiento lineal del agua y es una función de la longitud del tubo receptor de 2,44 m, por esta razón se ha dividido al tubo en intervalos de 0,3 m (tabla 23-4) para apreciar de mejor manera la tendencia de la curva:

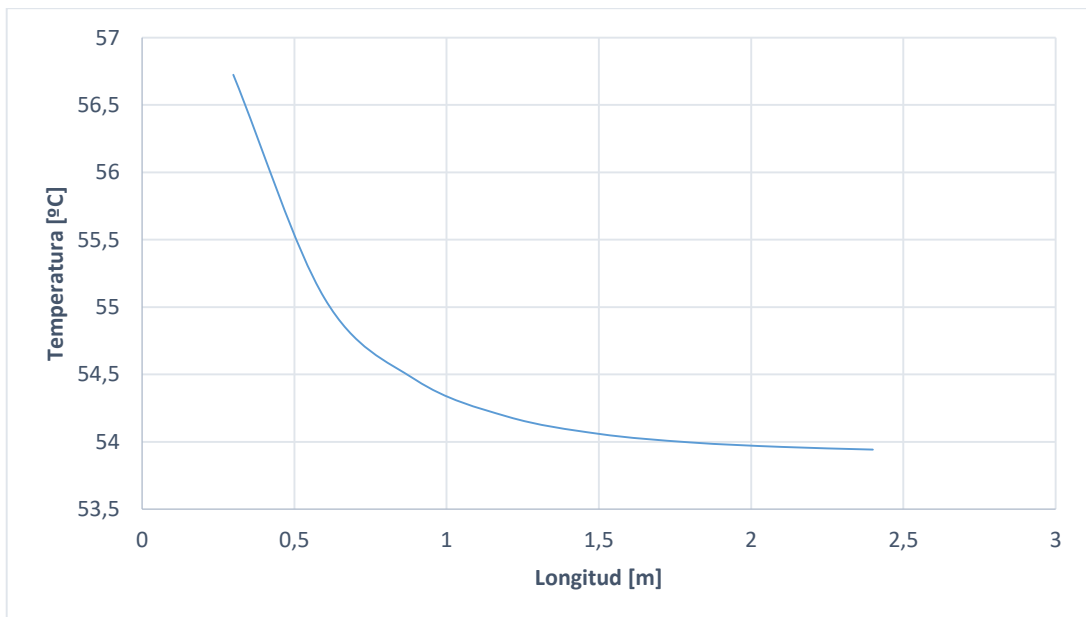
$$\theta_x = \frac{(\theta_L - \theta_0 e^{-mL})e^{mx} + (\theta_0 e^{mL} - \theta_L)e^{-mx}}{e^{mL} - e^{-mL}}$$

Tabla 23-4.- Resultado perfil de temperatura

L [m]	$\theta$ [°C]
0,3	56,7251262
0,6	55,0632486
0,9	54,4579657
1,2	54,1867693
1,5	54,0586807
1,8	53,9954274
2,1	53,9618426
2,4	53,9418558

Fuente: (Autores)

Figura 52-4.- Gradientes de temperatura en función de la longitud del tubo en régimen estacionario



Fuente: (Autores)

#### 4.4. Resultados de la comparación entre el colector solar cilíndrico parabólico y el colector solar de tubos al vacío.

A continuación se presenta la comparación entre la eficiencia y el tiempo de calentamiento del agua del colector solar cilíndrico parabólico y el colector solar de tubos al vacío. Para que la comparación sea real se toma como referencia el trabajo realizado por (Cabana, y otros), en el cual se analiza el incremento de temperatura de un calentador de tubos al vacío.

##### 4.4.1. Comparación del tiempo de calentamiento de agua entre el colector solar de tubos al vacío y el colector solar cilíndrico parabólico

Tabla 24-4.- Datos técnicos y experimentales de un tubo al vacío

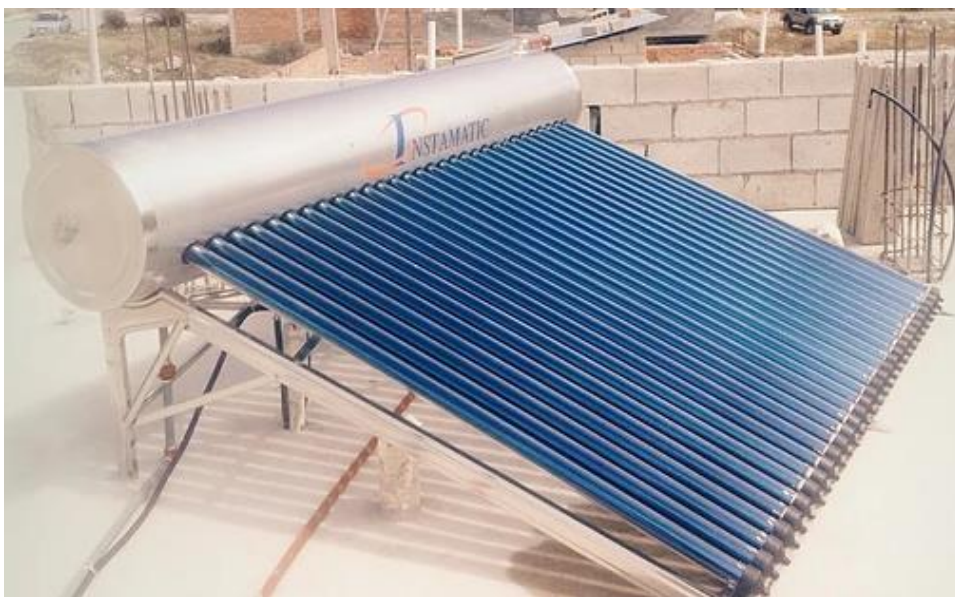
	DATOS TÉCNICOS	DATOS EXPERIMENTALES
Estructura	Tubos de doble capa de vidrio	Tubos de doble capa de vidrio
Diámetro externo del tubo	47±0.7 mm	46.8±0.05 mm
Diámetro interno del tubo	37±0.7 mm	33.4±0.05 mm
Espesor del tubo exterior	1.6±0.15 mm	1.95±0.05 mm
Espesor del tubo interior	1.6±0.15 mm	1.95±0.05 mm
Longitud del tubo	1542±4 mm	1470±1 mm
Material del recubrimiento	Al N/AIN	AgNO <sub>3</sub>
Absortancia	0.94 ~ 0.96	
Emitancia	0.04 ~ 0.06	
Vacío	P 5x10e-3 pa	
Transmitancia del tubo exterior	0.91	0.96
Coefficiente de pérdida de calor	0.6W/m <sup>2</sup>	
Cantidad de agua contenida	5060 pcs	1.3 lts

Fuente: (Cabana, y otros pág. 3)

Los actuales calentadores solares están conformados de un conjunto de tubos al vacío y un termo-tanque aislado, el número de tubos varía en función al volumen de agua que se desea obtener en el tanque.

Los colectores con tubos al vacío son estacionarios, no presentan ningún sistema de seguimiento solar para ello es importante que se coloque a una inclinación que debe estar dentro de un rango específico, además estos funcionan por termosifón quiere decir que el agua a medida que se calienta, por diferencia de densidades sube hacia la parte más alta alcanzando el termo-tanque y quedándose en la parte superior del mismo.

Figura 53-4.- Calentador solar de tubos al vacío

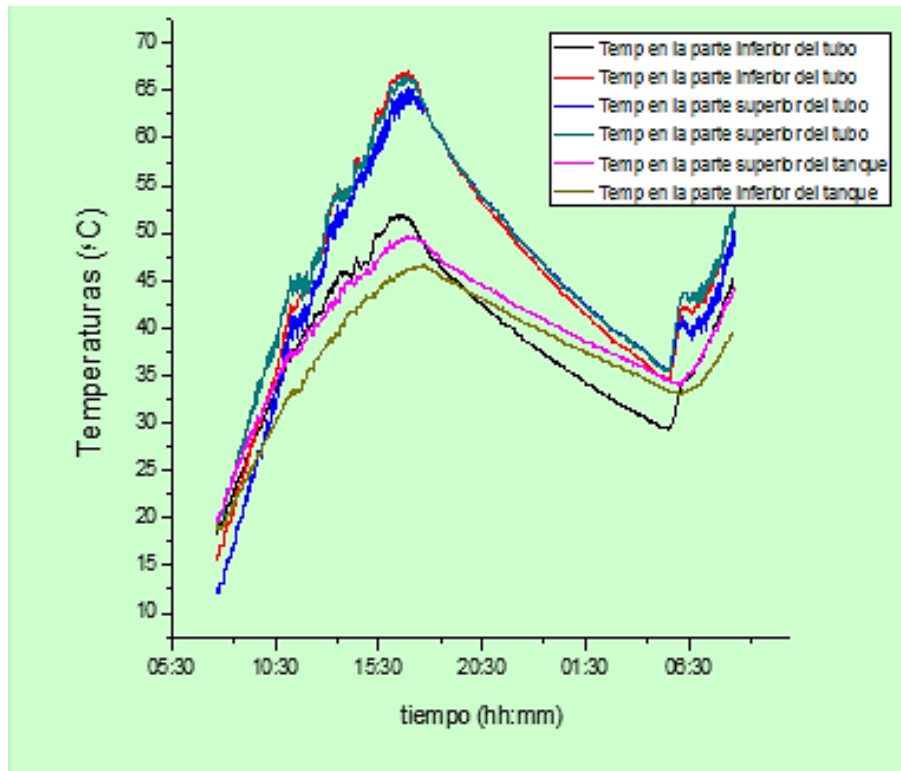


Fuente: (Ecuasun, 2016)

Se observa que la cantidad de agua que se calienta dentro de este tubo es de 1,30 litros, como se indica en la tabla 24-4, para aumentar el volumen estos calentadores usan de 15 a 30 tubos dependiendo el volumen del tanque. En el tubo absorbedor del calentador solar cilíndrico parabólico se tiene 1,44 litros de agua, que se calentara en menor tiempo de 12:00 pm a 2:00 pm, debido a que durante este tiempo se posee el mayor índice de irradiación.

En la figura 54-4 se muestra el incremento de temperatura en un colector de tubos al vacío desde la 8:00 hasta las 18:00

Figura 54-4.- Incremento de temperatura que experimenta el fluido dentro del tubo, inclinación 45°



Fuente: (Cabana, y otros pág. 6)

En la figura 54-4 se muestra que el fluido alcanza una temperatura máxima de aproximadamente 65°C desde las 8 de la mañana hasta las 5 de la tarde, esto quiere decir que se demora 9 horas en alcanzar dicha temperatura. Al hacer la comparación con la figura 49-4, se observa que el calentador solar cilíndrico parabólico alcanza una temperatura de 70 °C en un tiempo máximo de 19 minutos y un tiempo mínimo de 7 minutos. Pero se debe tomar en cuenta que la cantidad de volumen de agua calentado no es el mismo, el colector solar de tubos al vacío durante el día logra calentar 250 litros mientras que el cilíndrico parabólico logra calentar 50 litros. Esto se explica mejor en la siguiente tabla:

Tabla 25-4. Volumen alcanzado por cada uno de los colectores

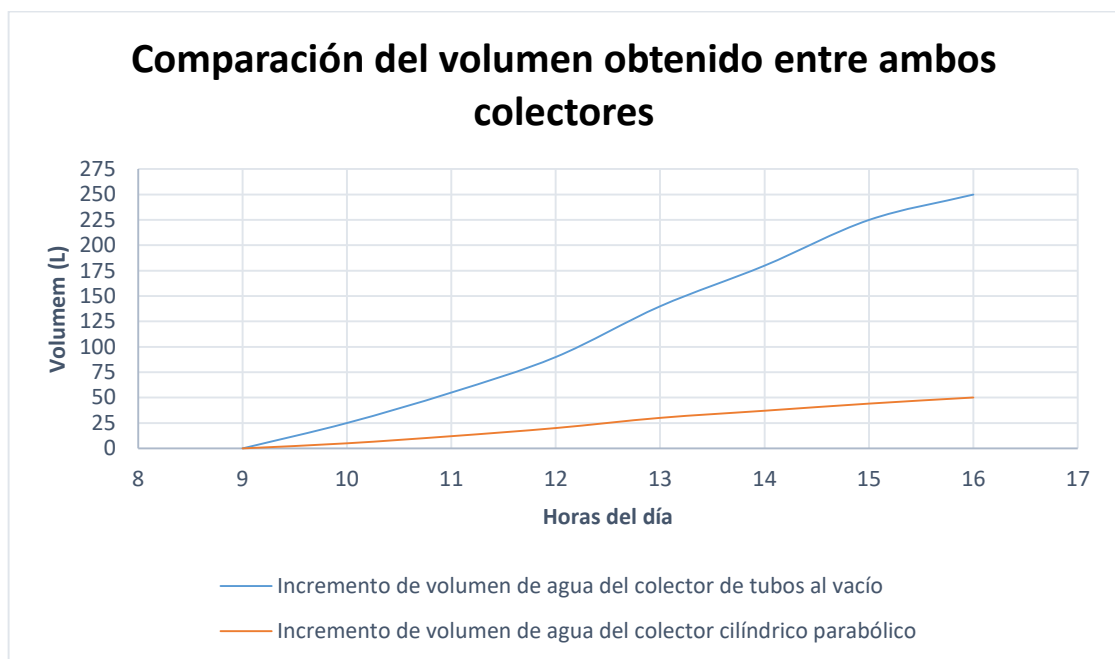
Horario	Agua extraída del colector solar de tubos al vacío	Agua extraída del colector solar cilíndrico parabólico
9:00 – 10:00	25	5
10:00 – 11:00	30	7
11:00 – 12:00	35	8
12:00 – 13:00	50	10
13:00 – 14:00	45	7

14:00 – 15:00	40	7
15:00 – 16:00	25	6
TOTAL	250	50

Fuente: (Autores)

Se observa de la tabla que en cada hora del día el colector solar de tubos al vacío obtiene mayor cantidad de volumen de agua en comparación con el colector solar cilíndrico parabólico.

Figura 55-4.-Comparación de volumen alcanzado de agua entre el colector solar de tubos al vacío y el colector solar cilíndrico parabólico



Fuente: (Autores)

En la figura se observa que la cantidad de agua alcanzada por el colector solar cilíndrico parabólico es de 50 litros, mientras que la cantidad alcanzada por el colector de tubos al vacío es de 250 litros, debido a que existe una mayor cantidad de tubos en este colector.

#### 4.4.2. Comparación de la eficiencia máxima y eficiencia promedio entre el colector solar de tubos al vacío y el colector solar cilíndrico parabólico

La eficiencia del calentador cilíndrico parabólico depende del calor útil, del área de apertura y de la radiación directa solar.

$$\eta_c = \frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía captada}} = \frac{Q_{ut}}{IA_a}$$

$$\eta_c = \frac{828,5 \text{ W}}{2,342 \text{ m}^2 * 997 \text{ W/m}^2}$$

$$\eta_c = 0,3548 \quad \sim \quad 35,48\%$$

Esta eficiencia es la máxima que puede llegar el colector al momento de mayor radiación que se obtiene a las 12 del mediodía. En la tabla 26-4 se muestra las eficiencias del colector en función de los parámetros mencionados durante todo el día

Tabla 26-4.- Eficiencia del colector solar cilíndrico parabólico durante las diferentes horas del día

Hora	Radiación [W/m <sup>2</sup> ]	Área de apertura [m <sup>2</sup> ]	Calor útil [W]	Eficiencia [%]
9:00	706	2,318	540,9	33,0520841
9:30	792	2,318	591,3	33,2084085
10:00	864	2,318	689,9	34,4476001
10:30	922	2,318	747,4	34,9710555
11:00	964	2,318	791	35,3985944
11:30	989	2,318	817,2	35,6466428
12:00	997	2,318	828,5	35,8495677
12:30	989	2,318	820,2	35,7775042
13:00	964	2,318	795,7	35,6089274
13:30	922	2,318	754,2	35,2892294
14:00	864	2,318	697,7	34,8370642
14:30	792	2,318	627	34,1530055
15:00	706	2,318	544,5	33,2720647
15:30	608	2,318	453,4	32,1709959
16:00	500	2,318	350,6	30,2502157

Fuente: (Autores)

La máxima eficiencia es de 35,84 % al medio día, y una eficiencia promedio de 34,26%.

La eficiencia máxima de un tubo al vacío con una inclinación de 45° se muestra en la siguiente tabla:

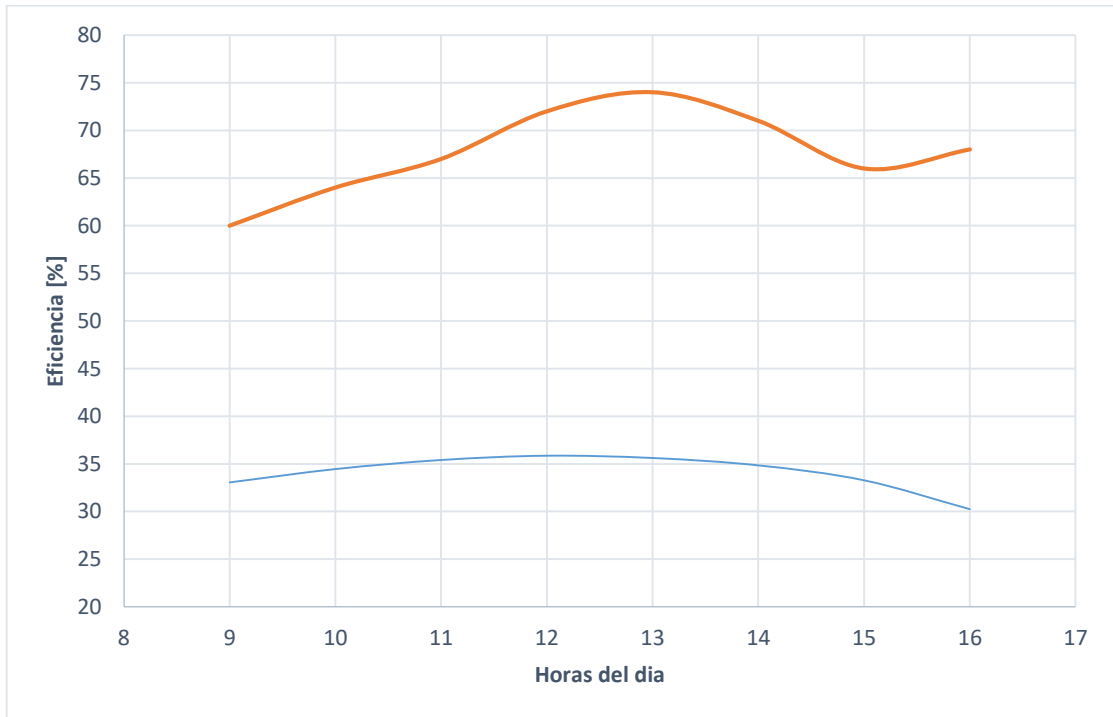
Tabla 27-4.- Eficiencia energética de colector con tubos al vacío

Horario	Radiación Solar kCal/m <sup>2</sup>	Energía Recibida kCal	Temperatura de entrada °C	Temperatura de salida °C	Agua extraída L	Energía extraída kCal	Eficiencia %
9:00 – 10:00	400	1124	23	50	25	675	60
10:00 – 11:00	450	1265	23	50	30	810	64
11:00 – 12:00	480	1349	24	50	35	910	67
12:00 – 13:00	640	1798	24	50	50	1300	72
13:00 – 14:00	600	1686	25	50	45	1250	74
14:00 – 15:00	560	1574	25	50	40	1125	71
15:00 – 16:00	450	1265	26	50	25	840	66
TOTAL	3580	10061			250	6910	68

Fuente: (Bérriz Pérez)

Se observa que la máxima eficiencia del colector es de 74 % y se produce a la 1 de la tarde. A continuación en la siguiente figura se muestra la comparación entre ambos colectores.

Figura 56-4.- Comparación de la eficiencia del calentador solar cilíndrico parabólico y del colector solar de tubos al vacío durante las diferentes horas del día



Fuente: (Autores)

En la figura 56-4 se observa que la eficiencia aumenta a medida que transcurren las horas debido a que aumenta la radiación y por lo tanto el calor útil en el colector, a partir de las 12 del día dicha eficiencia comienza a disminuir debido a la reducción de radiación.



La eficiencia térmica máxima del colector solar de tubos al vacío es mayor con un valor de 74%, mientras que la eficiencia máxima del colector solar cilíndrico parabólico es de 35,84%. Esto es debido a que el tubo del primer colector por encontrarse al vacío reduce significativamente las pérdidas térmicas lo cual ayuda a mejorar la eficiencia.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

El volumen de agua a calentar mediante este sistema es una media de 7 litros por hora, debido a que el sistema entra en funcionamiento desde las 9:00 am y termina su proceso a las 4:00 pm, se puede llegar a obtener 50 litros al día, de agua caliente. A partir de las 4 de la tarde el sistema de seguimiento vuelve a su posición inicial, sin embargo hay que tener en cuenta que existe radiación en todo momento, por lo tanto esa radiación existente después de las 4 pm puede ser aprovechada para mantener al sistema de calentamiento estable o para evitar una disminución de temperatura en el colector.

La modelación matemática permitió encontrar una ecuación que determina el gradiente de temperatura en estado estacionario. El perfil de temperatura en sentido longitudinal del tubo absorbedor es de tipo exponencial.

Se demostró que a mayor velocidad existe menor incremento de temperatura, se logró variando la apertura de la válvula, de un 20 % de apertura a una velocidad de 0,034 m/s, se consigue un incremento de 11,6 °C, y con un 100 % de apertura a una velocidad de 0,12 m/s se consiguió un incremento de 3,4 °C. Por lo tanto el agua presenta un menor incremento de temperatura a mayor velocidad debido a que al fluir de manera rápida está menos tiempo en contacto con el tubo absorbedor.

La ubicación del punto focal teórico no coincide con el punto focal experimental, debido a imperfecciones de construcción en el reflector solar, es importante ubicar el tubo absorbedor de manera experimental, ya que una mala posición no permite que haya una correcta incidencia de rayos solares en el tubo y por lo tanto el agua no alcanza la temperatura deseada.

A diferencia de un colector solar sin concentración (tubos al vacío), el colector solar cilíndrico parabólico debe hacer un seguimiento exacto de Este a Oeste, y ubicado de Norte a Sur, para que los rayos solares siempre estén en dirección al punto focal.

La eficiencia del calentador solar cilíndrico parabólico en comparación con el colector solar de un tubo al vacío es menor, debido a que las pérdidas térmicas en el sistema de calentamiento del colector cilíndrico parabólico son mayores, ya que el espacio anular entre la cubierta de vidrio y el tubo de cobre no se encuentra al vacío, a diferencia del tubo al vacío en el que se reducen significativamente las pérdidas. El sistema que brinda el mayor volumen de agua es el colector de tubos al vacío debido a que el área de captación solar es mucho mayor que el área del colector cilíndrico parabólico, es decir que se tiene una mayor cantidad de tubos.

Debido a la concentración de rayos solares en la línea focal en el tubo absorbedor la ganancia de calor útil es mayor a la de un tubo al vacío. Esto se debe a que el área de apertura del colector cilíndrico parabólico es mayor al área de apertura de un tubo al vacío.

## **5.2. Recomendaciones**

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 una modelación matemática en sentido longitudinal del tubo y se tendrán valores más exactos de calentamiento debido al área específica.

En futuros proyectos de investigación a partir de la ecuación fundamental encontrada para obtener un perfil de temperaturas, se debería realizar un análisis de modelación matemática en régimen transitorio considerándose todas las condiciones de contorno que intervienen en el sistema de calentamiento para observar cómo se produce el incremento de temperatura en función del tiempo que transcurre.

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, además se recomienda cambiar el reflector por materiales que contengan mayor índice de reflectividad y menor índice de absorptividad.

Experimentar con diferentes fluidos como: glicol, aceite térmico, sales fundidas, etc., para observar el comportamiento de la ganancia de calor útil y la variación en la eficiencia del colector.

Se recomienda realizar un plan de mantenimiento quincenal, que consiste en limpiar el reflector ya que reduciría su eficiencia óptica, además engrasar los sistemas móviles como chumaceras, catalinas y cadena. Por último aislar elementos eléctricos.

En el sistema de seguimiento se recomienda utilizar sensores de luz, estos ayudaran a que el seguimiento solar sea preciso a lo largo del día, y además un sistema de dos ejes que permita una mejor captación.

## BIBLIOGRAFÍA

**ARIAS, OLIVA.** *Investigadores diseñan calentador solar más eficiente y económico.* [En línea] marzo de 2012. [Consulta: 20 junio 2016]. Disponible en: <http://www.teorema.com.mx/cienciaytecnologia/investigadores-disenan-calentador-solar-mas-eficiente-y-economico/>.

**BARAGOZZA BASTIDAS, Edison & RISCO DE LEÓN, Juan.** *Diseño de un Colector Solar Cilíndrico Parabólico y Construcción de un Prototipo.* [En línea] Corporación Universitaria Tecnológica del Volívar, Facultad de Mecánica. Cartagena, Colombia. 2002. pp. 177-179. [Consulta: 14 marzo 2017]. Disponible en: [biblioteca.unitecnologica.edu.co/notas/tesis/0001057.pdf](http://biblioteca.unitecnologica.edu.co/notas/tesis/0001057.pdf)

**BENAVIDES SALCEDO, Enrique Santiago.** *Diseño y construcción de una cocina solar experimental de tipo cilíndrico parabólico con aplicación al sector rural marginal.* Escuela Superior Politécnica del Ejercito, Sangolquí, Ecuador. 2006. pp 80-84

**BUDYNAS, Richard & NISBETT, Keith.** *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley.* Octava ed. Mexico, McGraw-Hill, 2008. pp. 23-27.

**CABANA, Wilson, et al.** *Análisis del comportamiento térmico de un tubo de vacío para el calentamiento de agua .* [En línea] Arequipa. [Consulta: 01 julio 2017]. Disponible en: <http://perusolar.org/16spesonencias/ANALISIS%20DEL%20COMPORTAMIENTO%20TERMICO%20DE%20UN%20TUBO%20DE%20VACIO%20PARA%20EL%20CALENTAMIENTO%20DE%20AGUA.ppt>.

**CENGEL, Yunus.** *Termodinámica.* 3a ed. Mexico : Mc Graw Hill, 2010. pp. 17 - 27.

**CENGEL, Yunus & GHAJAR, Afshin.** *Transferencia de Calor.* 4a ed. Mexico, McGraw-Hill, 2011. pp. 700 - 708.

**DIAZ, Felipe.** *Diseño de elementos de máquinas.* Cuautitlán, Mexico. 2011. pp 34-37

**ECHAZÚ, CADENA & SARAVIA.** *Estudio de Materiales Reflectivos para Concentradores Solares.* [En línea]. Buenos Aires, Argemtima. [Consulta: 14 enero 2017]. Disponible en: <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2000/2000-t008-a003.pdf>

**ECHEVERRÍA LÓPEZ, César Antonio.** *Diseño de un colector cilindrico parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua.* Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú. 2011. pp 87. Disponible en: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1389/IME\\_159.pdf](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1389/IME_159.pdf).

- ECO SOLAR.** *Paneles solares - Estructura* [En línea] Guadalajara, Mexico. 2016. [Consulta: 17 febrero 2017]. Disponible en: <http://gunicornio.ecosolar1.com/cgi-bin/md/M10012/s1.pl>.
- ECUASUN.** *Calentadores Solares.* [En línea] 2016. [Consulta: 19 diciembre 2016]. Disponible en: <http://www.ecuasun.com/galeria>.
- ENERGÍA SOLAR.** *Energía Solar.* [En línea] .2015. [Consulta: 19 diciembre 2016]. Disponible en: <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/alta-temperatura>.
- ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.** *Energía e Impacto Ambiental.* [En línea]. 2010. [Consulta: 24 diciembre 2016]. Disponible en: <https://energiaunam.wordpress.com/2010/03/04/energia-solar-termica-parabolicarojas-garica-michael-jossue/>.
- FADISEL.** *Cocina solar reflector parabólico* [En línea] 2014. [Consulta: 18 agosto 2016]. Disponible en: [http://fadisel.es/solar-fadisol/cocinas-y-hornos/cocina-solar-reflector-parabolico-de-2-5-m-2-c-1011\\_r\\_483\\_2261.aspx](http://fadisel.es/solar-fadisol/cocinas-y-hornos/cocina-solar-reflector-parabolico-de-2-5-m-2-c-1011_r_483_2261.aspx).
- HALL, HOLOWENCO Y LAUGHLIN.** *Diseño de máquinas.* Mexico, McGraw-Hill, 1971. pp 1-3
- HAMROCK, Bernard, et al.** *Elementos de máquinas.* Mexico, McGraw-Hill, 2000. pp. 55.
- HERNÁNDEZ ECHEVERRÍA, Yoshito.** *Diseño de un concentrado solar de geometría paraboidal portátil.* Universidad tecnológica de la Mixteca. Oaxaca, Mexico. 2012. pp 24
- HOLMAN, J.P.** *Transferencia de Calor.* 8va ed. Madrid, España. McGrawHill. 1999. pp. 5.
- HOM, Manfred, RODRIGUEZ, Juan & VEGA , Patricia.** *Promoviendo la utilización de la energía solar en la Provincia de Espinar como alternativa ambiental para el hombre.* Cusco, Perú, 2004. pp 3
- IBARRA SALAZAR, Byron Alejandro & ROJAS PACHECO, Franklin Javier.** *Diseño y construcción de un prototipo de colector solar parabólico giratorio de mediana temperatura.* Quito, Ecuador. 2012. pp 44
- INCROPERA, Frank & DEWITT, David.** *Fundamentos de Transferencia de Calor.* Mexico. Prentice Hall. 1990. pp 70
- JIMÉNEZ ARIAS , Hernán Santiago & PORTALANZA MOLINA, Narcisa.** *Estandarización de Sistemas de calentamiento de agua con Energía Solar en la ciudad de Riobamba.* [En línea] . Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Mecánica. Riobamba, Ecuador.2009. pp. 32. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/269/1/15T00417.pdf>
- KALOGIROU, Soteris.** *Solar Thermal collectors and applications.* 2004. pp 65.

- LLORENTE SANCHÉZ, Irene.** *Estado del arte de tubos receptores para captadores cilíndrico parabólicos. Comparación de modelos estáticos.* [En línea]. Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería. 2015. [Consulta 3 de Febrero de 2017]. pp 33-40. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5652/fichero/PROYECTO+FIN+DE+CARRERA.+Irene+Llorente.pdf>
- LUREIRO, Mario.** *Energía Solar Térmica.* [En línea] 2011. [Consulta: 19 octubre 2016]. Disponible en: <http://www.marioloureiro.net/ciencia/EnerSolarTermica/SolarPROCESOSTERMO/Solar3%20.pdf>.
- McCORMAC, Jack y CSERNAK, Stephen.** *Diseño de estructuras de acero.* 5a ed. Mexico. Alfaomega. 2012. pp. 42.
- MECANICAN.** *Sistemas de poleas con correa. Sistemas de engranajes con cadena.* [En línea] 2017. [Consulta: 19 marzo 2017]. Disponible en: <https://mecanican.wikispaces.com/9.+Sistemas+de+poleas+con+correa.+Sistemas+de+engranajes+con+cadenacadena..>
- MEJÍA , Albert & REYES, Carlos.** *Selección y Análisis numérico de un recipiente a presión de 600 FTm<sup>3</sup> de capacidad .* Instituto Politécnico Nacional. Mexico. 2008. pp. 87.
- MOTT, Robert.** *Diseño de elementos de máquinas.* Mexico, Prentice-Hall. 2006. pp. 3 - 4.
- NAHLE SABAG, Nasif.** *Radiación solar en la capa exterior de la Atmósfera Terrestre y sobre la Superficie Terrestre (Suelo y Océano).* Nuevo León, Mexico. 2011.
- NASA SURFACE METEOROLOGY AND SOLAR ENERGY.** *Atmospheric science data center.* [En línea] 2016. [Consulta: 11 julio 2016]. Disponible en: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=1.674347&lon=78.648294&submit=Submit>.
- ORBEA SAMANIEGO, Edison Gustavo & SILVA BRAVO, Jorge Luis.** *Ingeniería inversa y repotenciación para la optimización, toma de datos y control del colector cilíndrico parabólico de 7,2 m<sup>2</sup>.* Escuela Superior Politécnica del Ejército. Facultad de Mecánica. Sangolquí, Ecuador. 2014. pp. 80.
- PAREDES , Carmen.** *Diseño de Captador Solar Cilindrico Parabólico para aplicaciones Rurales en Paraguay.* [En línea] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. 2012. pp. 31-34. Disponible en: [http://oa.upm.es/14011/1/PFC\\_CARMEN\\_PAREDES\\_VELASCO.pdf](http://oa.upm.es/14011/1/PFC_CARMEN_PAREDES_VELASCO.pdf).

**POLO BRAVO, Carlos & SACARI SACARI, Elisban.** *Evaluación experimental de un Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico.* [En línea]. Ciencia y Desarrollo, vol 13 Tacna, Perú. 2011. pp. 48-49. Disponible en: <http://www.perusolar.org/16-spes-ponencias/EVALUACION%20EXPERIMENTAL%20DE%20UN%20CONCENTRADOR%20SOLAR%20CILINDRICO%20PARABOLICO.pdf>.

**SERRANO GARCÍA, Daniel.** *Cálculo, Diseño y Análisis de una central termosolar de Colectores Cilíndricos-Parabólicos operando con Sales Fundidas.* Leganés, España. 2012. pp. 40.

**VARGAS BAUTISTA, Juan Pablo, et al.** *Implementación de un sistema de calefacción solar térmico: Análisis energético y económico.* La Paz, Bolivia. 2016. pp. 12.

**WILLIAMSON, Laura.** *Reporte de la situación actual de las energías renovables.* [En línea]. 2015. [Consulta: 12 septiembvre 2016]. Disponible en: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/2016\\_GSR-press-release\\_SPANISH.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/2016_GSR-press-release_SPANISH.pdf)