

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y**  
**MATEMÁTICAS**  
**SECCIÓN DE FÍSICA**



**TRABAJO DE GRADO:**  
“CONSTRUCCION Y CARACTERIZACION DE UN  
CONCENTRADOR CILINDRICO-PARABÓLICO PARA LA  
PRODUCCION DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PEQUEÑA ESCALA”.

**PRESENTADO POR:**  
HERBERT DAVID CASTILLO

**PARA OPTAR AL GRADO DE:**  
LICENCIADO EN FÍSICA

**DOCENTE DIRECTOR:**  
LIC. RAÚL ANTONIO ALFARO HERNÁNDEZ.

**CIUDAD UNIVERSITARIA ORIENTAL, JULIO 2016.**

**SAN MIGUEL      EL SALVADOR      CENTRO AMERICA**

**AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

LIC. JOSE LUIS ARGUETA ANTILLON

**RECTOR INTERINO**

ING. CARLOS ARMANDO VILLALTA

**VICERRECTOR ACADÉMICO INTERINO**

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

**SECRETARIA GENERAL INTERINA**

LICDA. NORA BEATRIZ MELENDEZ

**FISCAL GENERAL INTERINA**

**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL**

**AUTORIDADES**

ING. JOAQUIN ORLANDO MACHUCA

**DECANO**

LIC. CARLOS ALEXANDER DIAZ

**VICEDECANO**

LIC. JORGE ALBERTO ORTEZ HERNANDEZ

**SECRETARIO**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y**

**MATEMATICAS**

LIC. JOSÉ ALCIDES MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y**

**MATEMÁTICAS**

LICDA. BLANCA MIRIAN RAMOS DE ROSALES

**COORDINADORA DE LA SECCIÓN DE FÍSICA**

MSC. OSCAR ULISES LIZAMA VIGIL

**COORDINADOR DE LOS PROCESOS DE GRADUACION**

## **ASESORES**

LIC. RAUL ANTONIO ALFARO HERNÁNDEZ

**DOCENTE DIRECTOR**

LIC. JUAN ERNESTO GÓMEZ

**DOCENTE METODOLOGICO**

## **JURADO CALIFICADOR**

LIC. RAUL ANTONIO ALFARO HERNÁNDEZ

LICDA. BLANCA MIRIAN RAMOS DE ROSALES

LICDA. GLORIA ELIZABETH LARIOS DE NAVARRO

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece por su contribución para el desarrollo de este trabajo a:

Licenciado Raúl Antonio Alfaro Hernández, docente director por la dedicación y empeño que tuvo para estar dando las revisiones respectivas y las sugerencias para desarrollar de mejor manera la investigación.

Licenciado Juan Ernesto Gómez, docente metodológico por la dedicación y empeño que tuvo en el asesoramiento de la metodología seguida para el desarrollo de esta investigación.

Licenciada Blanca Mirian Ramos de Rosales, jefa de la Sección de Física, quien dio el permiso para que el equipo de medición del laboratorio de Física que se necesitó fuera trasladado hasta el lugar donde se hicieron las mediciones.

Herbert David Castillo

## **DEDICATORIA**

Se dedica el siguiente trabajo a:

Dios, por haberme dado la vida, la paciencia y la fortaleza para salir adelante con todas las dificultades que me ha tocado enfrentar durante mi formación como estudiante en todos los niveles hasta llegar a la culminación de mi carrera profesional y finalmente la culminación de este trabajo de investigación.

Toda mi familia por haber estado siempre a mi lado apoyándome y dándome fortaleza para seguir adelante durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

A mi mamá Ana Edith Castillo, por estar siempre apoyándome y dándome ánimos para que no desmayara a pesar de las dificultades que se presentaron.

A mi tío Marcos Antonio Menjivar Castillo, por haberme apoyado económicamente para desarrollar la investigación.

A mis abuelos (QEPD) quienes siempre me apoyaron y creyeron en mi capacidad para superarme a través del estudio, quienes fueron un ejemplo de vida, lucha y dedicación.

Herbert David Castillo

# INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCION	2
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. Antecedentes del problema.	4
1.2. Factibilidad.	7
1.3. Limitación.	7
1.4. Delimitación.	7
1.5. Enunciado del problema.	7
1.5.1. Situación problemática.	7
1.5.2. Preguntas de investigación.	9
1.5.2.1. Pregunta general.	9
1.5.2.2. Preguntas específicas.	9
1.6. Objetivos de la investigación.	9
1.6.1. Objetivo general.	9
1.6.2. Objetivos específicos.	9
CAPITULO II. MARCO TEORICO	11
2.1. Conceptos sobre energía solar.	11
2.1.1. Constante solar.	12
2.1.2. Componentes de la radiación solar.	14
2.1.3. Variaciones de la radiación solar.	16
2.1.4. Parámetros principales de la posición del Sol.	17
2.2. El Sol y la energía solar térmica.	18
2.2.1. Principio de funcionamiento.	18
2.3. El concentrador cilíndrico-parabólico (CCP).	19
2.3.1. La parábola.	21
2.3.1.1. Aplicaciones prácticas de la parábola.	22
2.3.1.2. Ecuación de la parábola y determinación del foco.	22
2.3.2. Cálculo del ángulo de abertura ( $\alpha$ ) y la distancia ( $\rho$ ).	24
2.3.3. Determinación del diámetro del tubo receptor.	26
2.3.4. Razón de concentración.	27
2.3.5. Pérdidas y rendimiento del concentrador cilíndrico-parabólico.	27
2.4. Determinación de la constante solar en la superficie de la Tierra.	33
2.5. Fluidos de trabajo para un concentrador cilíndrico-parabólico.	35

2.5.1.	Generación de vapor con concentrador cilíndrico-parabólico.	36
2.6.	Turbina de vapor – alternador.	39
2.6.1.	Primeras turbinas de vapor.	39
2.6.2.	Principales elementos de una turbina de vapor.	40
2.7.	Alternador.	40
2.7.1.	Fundamento físico.	43
CAPITULO III: SISTEMA DE HIPOTESIS.		45
3.1.	Justificación	45
3.2.	Hipótesis.	45
CAPITULO IV. DISEÑO METODOLOGICO		47
4.1.	Diseño del Concentrador Cilíndrico-Parabólico.	47
4.1.1.	Selección de los parámetros geométricos de CCP.	47
4.1.2.	Estructura soporte del CCP.	49
4.2.	Diseño de la turbina y del alternador.	51
4.3.	Ubicación del estudio.	54
4.4.	Tipo de Investigación y diseño.	55
4.5.	Variables y medición.	55
4.5.1.	Definición y clasificación de las variables.	55
4.5.2.	Indicadores y medición de las variables.	57
4.6.	Descripción del equipo de medición.	62
4.6.1.	Descripción de las escalas de medida.	63
4.6.2.	Certificados de calibración de los multímetros y recalibración de los mismos.	66
4.7.	Procedimiento y montaje experimental.	67
4.7.1.	Medición de la temperatura en el tubo receptor.	67
4.7.2.	Determinación de la eficiencia óptica y térmica del CCP.	68
4.7.3.	Determinación de la constante solar en la superficie de la tierra.	70
4.7.3.1.	Diseño del experimento para determinar la constante solar.	70
CAPITULO V. PRESENTACION DE RESULTADOS		72
5.1.	Construcción del concentrador cilíndrico – parabólico.	72
5.2.	Construcción de la turbina de vapor – alternador.	76
5.3.	Caracterización de la temperatura del tubo receptor sin fluido.	78
5.3.1.	Caracterización de la temperatura en el tubo receptor simple.	78
5.3.2.	Caracterización de la temperatura en el tubo receptor compuesto.	83
5.4.	Caracterización de la temperatura en el tubo receptor con fluido.	87
5.4.1.	Tubo receptor simple.	87

5.4.2. Tubo receptor compuesto.	89
5.5. Eficiencia óptica del concentrador cilíndrico-parabólico.	90
5.6. Eficiencia térmica del concentrador cilíndrico-parabólico.	96
5.7. Comparación estadística de la temperatura del tubo receptor con fluido estacionario.	104
5.7.1. Comparación estadística de la temperatura del tubo receptor simple.	105
5.7.2. Comparación estadística de la temperatura en el tubo receptor compuesto.	105
5.7.3. Comparación estadística de la temperatura de los tubos receptores simple y compuesto con fluido estacionario.	106
5.8. Generación de energía eléctrica utilizando el concentrador cilíndrico parabólico.	107
5.9. Dificultades.	109
CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
6.1. Conclusiones.	110
6.2. Recomendaciones.	113
CAPITULO VII. BIBLIOGRAFIA	114
CAPITULO VIII. ANEXOS	118
8.1. Anexo I. Certificados de calibración de los equipos de medición.	118
8.2. Anexo II. Montaje experimental medidas de temperatura tubo receptor sin fluido y con fluido en los puntos (a, b y c).	122
8.3. Anexo III. Montaje experimental para la determinación eficiencia óptica y térmica.	123
8.4. Anexo IV. Montaje experimental para los ensayos de producción de energía eléctrica.	124
8.5. Anexo V. Determinación de la constante solar en la superficie terrestre	125
8.6. Anexo VI. Costos económicos de la investigación.	128
8.7. Anexo VII. Base de datos para la comparación estadística de la temperatura en el tubo receptor simple con fluido estacionario.	130

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Reflector curvo construido por Ericsson. _____	5
Figura 1.2. Primera patente del concentrador solar parabólico por Maier y Remshard. _____	5
Figura 1.3. Planta termosolar construida con CCP en el desierto de Mojave, California. _____	6
Figura 1.4. Concentrador cilíndrico parabólico construido en LaGeo de Berlín, Usulután _____	6
Figura 1.5. Matriz energética de El Salvador al año 2014 _____	8
Figura 2.1. Componentes de la radiación solar en la superficie de la Tierra. _____	15
Figura 2.2. Variación de la posición del Sol durante el año con respecto al plano horizontal. ____	17
Figura 2.3. Esquema de un concentrador cilíndrico parabólico. _____	20
Figura 2.4. Elementos principales de una parábola. _____	22
Figura 2.5. Forma de la superficie concentradora curva y lado recto. _____	23
Figura 2.6. Parámetros para determinar el lado recto utilizando la ecuación de la curva. _____	24
Figura 2.7. Ecuación general de una parábola vertical con sus elementos. _____	25
Figura 2.8. Relación y distancias dentro del concentrador cilíndrico-parabólico. _____	25
Figura 2.9. Proyección del disco Solar sobre el área de concentración. _____	26
Figura 2.10. Balance energético en el concentrador cilíndrico parabólico. _____	31
Figura 2.11. Esquema de una turbina de vapor. _____	39
Figura 2.12. Turbina de vapor conectada al alternador. _____	39
Figura 2.13. Esfera giratoria de Herón. _____	41
Figura 2.14. Turbina de vapor patentada por De Laval. _____	41
Figura 2.15. Elementos principales de una turbina de vapor. _____	42
Figura 2.16. Esquema sencillo de un generador eléctrico.) _____	42
Figura 2.17. Diagrama de fuerza mecánica, campo magnético y corriente en un alternador. ____	43
Figura 4.1. Estructura soporte de un concentrador cilíndrico-parabólico. _____	50
Figura 4.2. Superficie reflectante del concentrador cilíndrico- parabólico. _____	51
Figura 4.3. Disco giratorio compuesto por los alabes de la turbina _____	52
Figura 4.4. El rotor que contiene los devanados del generador. _____	53
Figura 4.5. El estator de una turbina de vapor conteniendo el bobinado y los imanes. _____	53
Figura 4.6. Ubicación satelital del lugar donde se realizó el experimento. _____	54
Figura 4.7. Vista frontal y descripción general de los equipos. _____	62
Figura 4.8. Equipo que almacena los datos de los multímetros digitales en tiempo real. _____	63

Figura 4.9. Téster multifuncional en función de medir temperatura. _____	64
Figura 4.10. Téster multifuncional en función del voltímetro. _____	65
Figura 4.11. Ubicación del panel de control para medir corriente. _____	66
Figura 4.12. Puntos de medición de la temperatura en el tubo receptor. _____	68
Figura 4.13. Determinación de la eficiencia óptica y térmica del CCP. _____	69
Figura 4.14. Montaje experimental para determinar la eficiencia óptica y térmica. _____	69
Figura 4.15. Montaje experimental para determinar el valor de la constante solar. _____	71
Figura 5.1. Proceso seguido en el diseño del concentrador cilíndrico parabólico.. _____	73
Figura 5.2. Proceso realizado en la construcción del concentrador cilíndrico parabólico. _____	74
Figura 5.3. Construyendo la superficie reflectante del CCP. _____	75
Figura 5.4. .Partes de la turbina alternador. _____	77
Figura 5.5. Turbina-alternador. _____	77
Figura 5.6. Tubo receptor simple usado en CCP. _____	78
Figura 5.7. Tubo receptor compuesto usado en el CCP. _____	83
Figura 8.1. Montaje para medir la temperatura en el tubo receptor sin fluido y con fluido. ____	122
Figura 8.2. Determinación de la eficiencia óptica y térmica del CCP. _____	123
Figura 8.3. Montaje experimental en los ensayos de producción de energía eléctrica. _____	124

## INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 2.1. Espectro solar que llega a la Tierra. _____	13
Gráfico 4.1. Perfil del canal parabólico. _____	49
Gráfico 5.1. Temperatura tubo receptor simple sin fluido el 11/3/2015. _____	79
Gráfico 5.2. Temperatura tubo receptor simple sin fluido el 01/7/2015. _____	80
Gráfico 5.3. Temperatura tubo receptor simple sin fluido el 03/7/2015. _____	81
Gráfico 5.4. Temperatura tubo receptor simple sin fluido el 06/7/2015. _____	82
Gráfico 5.5. Temperatura tubo receptor compuesto sin fluido el 27/7/2015. _____	84
Gráfico 5.6. Temperatura tubo receptor compuesto sin fluido el 27/7/2015. _____	85
Gráfico 5.7. Temperatura tubo receptor compuesto sin fluido el 29/7/2015. _____	85
Gráfico 5.8. Temperatura tubo receptor compuesto sin fluido el 04/8/2015. _____	86
Gráfico 5.9. Temperatura tubo receptor simple con fluido el 03/7/2015. _____	87
Gráfico 5.10. Temperatura tubo receptor simple con fluido el 04/7/2015. _____	88
Gráfico 5.11. Temperatura tubo receptor compuesto con fluido el 02/8/2015. _____	89
Gráfico 5.12. Temperatura tubo receptor compuesto con fluido el 04/8/2015. _____	90
Gráfico 5.13. Determinación de la eficiencia óptica el 17/7/2015. _____	91
Gráfico 5.14. Determinación de la eficiencia óptica el 19/7/2015. _____	92
Gráfico 5.15. Determinación eficiencia óptica el 24/7/2015. _____	94
Gráfico 5.16. Determinación eficiencia óptica el 30/7/2015. _____	95
Gráfico 5.17. Determinación eficiencia térmica global el 06/7/2015. _____	97
Gráfico 5.18. Determinación eficiencia térmica global el 12/7/2015. _____	99
Gráfico 5.19. Determinación eficiencia térmica global el 15/7/2015. _____	100
Gráfico 5.20. Determinación de la eficiencia térmica global el 25/7/2015. _____	101
Gráfico 5.21. Potencia instantánea obtenida el 01/2/2016. _____	107
Gráfico 5.22. Potencia instantánea obtenida el 07/2/2016. _____	108
Gráfico 8.1. Determinación de la constante solar el 02/09/2015. _____	125
Gráfico 8.2. Determinación de la constante solar el 07/09/2015. _____	127

## INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Parámetros para diseñar el canal parabólico. _____	48
Tabla 4.2. Parámetros que se tomaron para diseñar el perfil. _____	48
Tabla 4.3. Parámetros y dimensiones del CCP. _____	49
Tabla 4. 4. Operacionalización de variables. _____	57
Tabla 4.5. Resolución del téster multifuncional en la función de voltímetro. _____	65
Tabla 4.6. Resolución del téster multifuncional en la función de amperímetro. _____	66
Tabla 5.1. Variables para determinar la eficiencia óptica el 17/7/2015. _____	91
Tabla 5.2. Variables para determinar la eficiencia óptica el 19/7/2015. _____	93
Tabla 5.3. Variables para determinar la eficiencia óptica el 24/7/2015. _____	94
Tabla 5.4. Variables para determinar la eficiencia óptica el 30/7/2015. _____	95
Tabla 5.5. Variables para determinar la eficiencia térmica global el 06/7/2015. _____	97
Tabla 5.6. Variables para determinar la eficiencia térmica global el 12/7/2015. _____	99
Tabla 5.7. Variables para determinar la eficiencia térmica global el 15/7/2015. _____	100
Tabla 5.8. Variables para determinar la eficiencia térmica global el 25/7/2015. _____	102
Tabla 5.9. Prueba estadística para comparar las temperaturas del tubo receptor simple. _____	105
Tabla 5.10. Prueba estadística para comparar las temperaturas del tubo receptor compuesto. _____	105
Tabla 5.11. Prueba estadística para comparar las temperaturas de los tubos receptores. _____	106
Tabla 8.1. Valores para determinar la constante solar el 07/9/2015. _____	126
Tabla 8.2. Valores para determinar el valor de la constante solar el 07/9/2015. _____	127
Tabla 8.3. Materiales y sus costos económicos. _____	128
Tabla 8.4. Valores de temperatura promedio en el tubo receptor simple. _____	130
Tabla 8.5. Valores de temperatura promedio en el tubo receptor compuesto. _____	136
Tabla 8.6. Valores de temperatura promedio en el tubo receptor simple y compuesto. _____	140

## RESUMEN

Este documento presenta los resultados del trabajo de investigación denominado “**diseño, construcción y caracterización de un concentrador cilíndrico-parabólico aplicado a la producción de energía eléctrica a pequeña escala**” La investigación se realizó en el Caserío El Rodeo, Municipio de Chapeltique, Depto. De San Miguel, El Salvador en el periodo de: Julio de 2015 a Febrero de 2016. Fue un trabajo experimental y de campo, en el cual se diseñó y construyó un concentrador cilíndrico parabólico (CCP), que fue necesario caracterizar para hacer algunas pruebas de generación de energía eléctrica a partir del vapor de agua obtenido del CCP.

En la caracterización del concentrador cilíndrico parabólico, se midió la temperatura máxima que alcanzó el tubo receptor, tanto sin fluido como con fluido en su interior. Se determinó la eficiencia óptica y eficiencia global térmica, parámetros que definen claramente cuál es el comportamiento y la capacidad que tiene el dispositivo para captar y transformar la energía radiante del Sol en energía térmica.

La temperatura máxima que alcanzó el tubo receptor sin fluido fue de 217.66 °C y la temperatura máxima promedio fue de 182.00 °C. La temperatura general promedio de todas las mediciones realizadas que alcanzo el tubo receptor sin fluido fue de 151.00 °C

La temperatura máxima que alcanzo el tubo receptor con fluido estacionario en su interior fue de 172.23 °C, y la temperatura máxima promedio fue de 149.60 °C. La temperatura general promedio de todas las mediciones con fluido fue de 133.80 °C.

La eficiencia óptica del concentrador es del 74%, este valor indica que del 100% de energía que llega a la superficie captadora, un 74% es captado por el tubo receptor, y se pierde un 26% de esta energía. Estas pérdidas están relacionadas con las imperfecciones en la superficie concentradora, así como pérdidas térmicas y geométricas.

La eficiencia global térmica dio en un rango que va del 41% hasta el 59% de transformación de energía radiante en energía térmica, este valor cambia durante el día y también depende de las condiciones ambientales que se tengan, sin embargo, dio un elevado porcentaje de transformación de energía.

## INTRODUCCION

El presente trabajo de investigación tuvo por objetivo estudiar una nueva técnica para aprovechar la energía radiante del Sol en la generación de energía eléctrica. Lo que se buscó fue innovar en la propuesta de prototipos que transforman la energía radiante del Sol en energía térmica, la cual puede ser aprovechada en procesos industriales.

Para lograr el objetivo se propuso construir un concentrador cilíndrico parabólico (CCP), el cual es un dispositivo capaz de transformar la energía radiante del Sol en energía térmica mediante una serie de procesos. Una vez diseñado y construido el prototipo se procedió a caracterizarlo. La caracterización consistió en determinar varios parámetros de interés para conocer el funcionamiento del prototipo tales como: la temperatura máxima del concentrador sin fluido y con fluido estacionario en diferentes puntos del tubo receptor, la eficiencia del concentrador, tanto óptica como térmica, así como también la generación de potencia eléctrica instantánea usando una turbina-alternador que transforme la energía solar térmica en energía eléctrica.

La organización de este documento es la siguiente:

En el capítulo I se presentan algunos antecedentes sobre el uso de los concentradores cilíndricos parabólicos en el mundo, a nivel industrial para la generación de energía eléctrica, así como también nuevas técnicas teóricas que han surgido para diseñar estos prototipos con mayor eficiencia y menos costes económicos. Se plantea la situación problemática, las preguntas de investigación y los objetivos.

En el capítulo II se abordan los aspectos teóricos relacionados con la energía solar de forma general, así como también el estudio de algunos parámetros geométricos que hay que tomar en cuenta para construcción de un CCP. Se describe el concentrador cilíndrico parabólico, la geometría de la parábola y su aplicación para el diseño del concentrador, así como también las ecuaciones que rigen el diseño. Se presentan además las ecuaciones que caracterizan el concentrador cilíndrico parabólico y todas las variables que lleva implícitas. Se aborda el uso de la turbina-alternador para la transformación de la energía térmica en energía eléctrica, los

aspectos solo se presentan de manera cualitativa, sin entrar en detalles en consideraciones matemáticas.

En el capítulo III, se presentan las hipótesis propuestas a partir de las preguntas de investigación que se propusieron.

En el capítulo IV, se presentan los aspectos metodológicos seguidos para desarrollar la investigación propuesta. Se describe como se diseñó y construyó el concentrador cilíndrico parabólico, así como también la forma como se hizo para caracterizarlo y obtener la información necesaria que permitió llegar a los objetivos.

En el capítulo V, se presentan los resultados obtenidos de la investigación, así como también la discusión e interpretación de estos resultados.

En el capítulo VI, se presentan las conclusiones y recomendación de este trabajo de investigación.

# CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1. Antecedentes del problema.

En la década de 1870 el sueco-americano John Ericsson, hizo funcionar su máquina de aire caliente con un concentrador parabólico, este invento sumaba tres elementos fundamentales: un espejo concentrador, una caldera y una máquina de vapor. En 1872, Ericsson probó un método totalmente diferente: calentar el aire, en lugar de utilizar agua, contenido en un cilindro situado en el foco de un reflector curvo como se puede ver en la figura 1.1. Ericsson quedó sorprendido, por el rendimiento de su motor. Pero tres años después, se templaron sus ánimos al darse cuenta, que el aparato concentrador es tan grande y tan caro que los motores activados por energía solar, resultaban en la práctica más costosos que sus análogos movidos por carbón (Ericsson, 2014).

En 1907 se patentó por primera vez, en Alemania un diseño sobre colectores parabólicos (Parabolic trough collector, PTC), por el Dr. Wilhelm Maier (en Aalen) y Adolf Remshard (en Stuttgart). En la figura 1.2 se muestra parte de la patente obtenida por Maier y Remshard (LinkedIn Corporation ©, 2014).

Es hasta la década de 1970, que se retoma el verdadero interés en esta tecnología, como una clara respuesta a la crisis petrolera por el incremento disparado de los precios de los hidrocarburos. En dicha época, tanto el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE, por sus siglas en inglés), así como en Alemania el Ministerio Federal de Educación e Investigación (BMBF, por sus siglas en inglés), se encargaron de patrocinar en sus respectivos países, el desarrollo de una serie de procesos y sistemas de bombeo de agua y calor con concentradores parabólicos (Behohanasolar, 2014).

De 1984 a 1991, los avances en sistemas de concentración parabólica, fueron notables con el desarrollo de una serie de plantas comerciales solares de 15 MW a 80 MW, a cargo de Luz Internacional Ltd. Esta compañía desarrolló, por muchos años los componentes y sistemas en una instalación en Jerusalén y fue responsable, de la construcción y operación de dos instalaciones de calor de proceso en Israel. Las nueve plantas diseñadas por esta empresa, con una capacidad total de generación de 354 MW de electricidad son llamadas SEGS (Sistemas de

generación solar-eléctrica por sus siglas en inglés), y están operando continuamente en el desierto de Mojave al sur de California, ver figura 1.3. (Villasante, 2014).

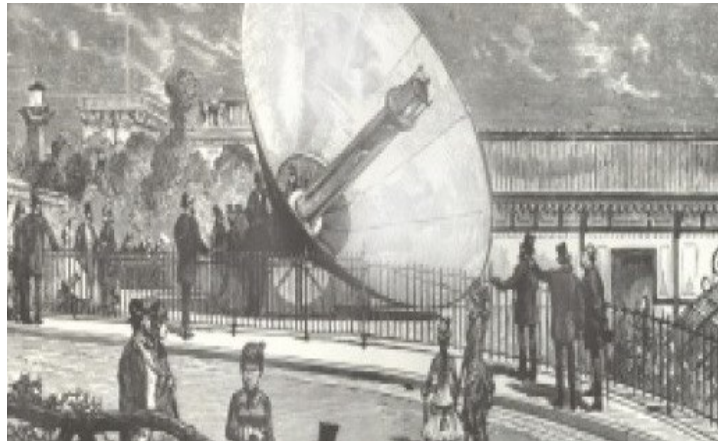


Figura 1.1. Reflector curvo construido por Ericsson. (Slideshare, 2014)

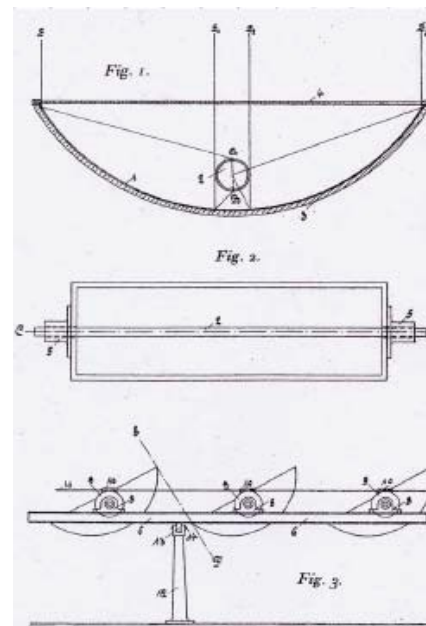


Figura 1.2. Primera patente del concentrador solar parabólico por Maier y Remshard. (Slideshare, 2014)

Un colector de generación directa de vapor (GDV) fue propuesto por Cohen y Kearney (1994), como un desarrollo futuro de los colectores en nuevas SEGS, con la finalidad de eliminar el aceite sintético tan costoso y evitar el transporte de fluido intermediario con las pérdidas que esto ocasiona y suprimir el intercambiador de calor de aceite-vapor (Escobar., 2015).



*Figura 1.3.* Planta termosolar construida con CCP en el desierto de Mojave, California. (*Termosolar, 2014*)

En la actualidad en El Salvador, LaGeo, empresa que se dedica a la generación de energía eléctrica a partir de la energía geotérmica de la Tierra, se encuentra realizando investigaciones con un concentrador cilíndrico parabólico de 50 metros de longitud y una abertura de 5 metros, en el municipio de Berlín, departamento de Usulután, para usar la energía solar en la generación de energía eléctrica<sup>1</sup>. En la figura 1.4 se muestra el concentrador cilíndrico parabólico construido en este lugar.



*Figura 1.4.* Concentrador cilíndrico parabólico construido en LaGeo de Berlín, Usulután, El Salvador.

---

<sup>1</sup> Esta información fue obtenida en la visita realizada a la Geotérmica de Berlín, Usulután, Diciembre del 2014.

## **1.2. Factibilidad.**

Para realizar esta investigación se tuvo a disposición el equipo para hacer las mediciones de las variables.

## **1.3. Limitación.**

Algunas variables se midieron de manera indirecta.

En la generación de vapor de agua, se tuvo que limitar a producir a bajas presiones (150 PSI) ya que las juntas de los tubos no soportaron presiones más elevadas.

La turbina de vapor y el alternador hecho con materiales caseros no soporto las presiones del vapor que se introdujeron y termino dañándose después de unas 5 pruebas.

## **1.4. Delimitación.**

La investigación se realizó en el Caserío El Rodeo, Municipio de Chapeltique, Depto. De San Miguel, El Salvador. En el periodo de: Julio de 2015 a Febrero de 2016.

## **1.5. Enunciado del problema.**

### **1.5.1. Situación problemática.**

Los combustibles fósiles (petróleo y sus derivados, carbón y gas natural) son un recurso no renovable y con disponibilidad limitada en la actualidad, por lo que no siempre se podrá generar energía eléctrica a partir de ellos. Este tipo de combustibles llevan inherente un impacto ambiental adverso por las emisiones y residuos. (Sánchez., 2010).

En el caso de la generación de electricidad a partir de la energía hidráulica depende de los caudales de los ríos, pero también de la vida útil de las presas hidroeléctricas, lo que convertirá a este mecanismo en un recurso de altos costos de producción por el mantenimiento y dragado de los embalses para evitar el deterioro progresivo de las turbinas por los sedimentos transportados por las corrientes de agua que se van acumulando con el tiempo.

La única energía que es más efectiva y eficiente es la energía geotérmica, pero tiene la desventaja que no se encuentra en todas partes, sino solo en zonas de explotación geotérmica específicas y además su aprovechamiento presenta costos onerosos. Parece que a corto y

mediano plazo no podría cubrir por completo la demanda de electricidad a nivel de todo el país. Esta información se obtuvo de la figura 1.5 y la fuente citada.

En el país ya se están dando los primeros pasos para la instalación de parques de paneles fotovoltaicos y sistemas de concentradores cilíndricos-parabólicos, y así aprovechar la energía solar, pero su aporte a nivel nacional aun es incipiente. Ver figura 1.5.

La figura 1.5 muestra la matriz energética del país al año 2014, dónde no están incluidas ni la energía solar ni la energía eólica. También muestra una proyección de la misma al año 2018. En dicha proyección puede observarse que hasta el año 2018 se iniciaría el aprovechamiento de la energía solar y eólica, sumando entre ambas solo un 7% de la producción total, y en ninguno de esos estudios se incluye la energía mareomotriz y nuclear.

La única energía disponible para nosotros y que se tiene de manera gratis es la energía solar, la cual nos daría toda la capacidad que necesitamos día a día si se usara eficientemente. En busca de nuevas alternativas para aprovechar la energía solar en la producción de energía eléctrica, se propone el diseño, construcción y caracterización de un concentrador cilíndrico – parabólico, como una alternativa para ensayar la generación de energía eléctrica utilizando una turbina – alternador casero y si los resultados son favorables usarlo como un dispositivo en los hogares para generar la energía que estos necesitan.

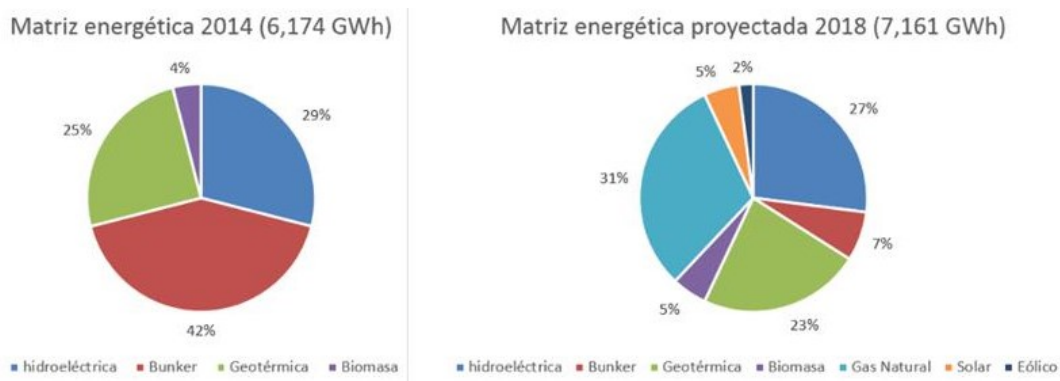


Figura 1.5. Matriz energética de El Salvador al año 2014 (izquierda). Matriz energética proyectada al año 2018 (derecha). (Alianza de energía, 2015)

## **1.5.2. Preguntas de investigación.**

### **1.5.2.1. Pregunta general.**

¿Se puede diseñar, construir y caracterizar un concentrador cilíndrico-parabólico, con el cual se pueda producir energía eléctrica como alternativa viable para sustentar las necesidades energéticas de un hogar?

### **1.5.2.2. Preguntas específicas.**

**Pregunta 1.** ¿Cómo es la variación de la temperatura en los puntos de medición del tubo receptor al exponerlo a la radiación solar sin fluido y con fluido?

**Pregunta 2.** ¿Cuál es la eficiencia óptica y térmica del concentrador cilíndrico-parabólico?

**Pregunta 3.** ¿Cómo es estadísticamente el cambio de temperatura en los diferentes puntos de medida del tubo receptor con fluido estacionario durante la exposición a la radiación solar?

**Pregunta 4.** ¿Cuál es la variación de la potencia eléctrica instantánea generada con el vapor de agua del concentrador cilíndrico parabólico?

## **1.6. Objetivos de la investigación.**

### **1.6.1. Objetivo general.**

- Diseñar, construir y caracterizar un concentrador cilíndrico-parabólico de radiación solar directa para la obtención de vapor de agua y ensayar con este vapor la generación de energía eléctrica.

### **1.6.2. Objetivos específicos.**

- 1) Diseñar un concentrador cilíndrico-parabólico artesanal, de manera que sea de fácil manipulación y transporte.
- 2) Construir un concentrador cilíndrico-parabólico utilizando materiales de bajo costo.
- 3) Construir una turbina de vapor-alternador artesanal.
- 4) Medir la temperatura del tubo receptor sin fluido y con fluido.
- 5) Determinar la eficiencia óptica y térmica del concentrador cilíndrico parabólico.

- 6) Evaluar estadísticamente el comportamiento de la temperatura en el tubo receptor con fluido estacionario.
- 7) Determinar la potencia eléctrica instantánea para saber si el sistema concentrador-turbina-alternador es una alternativa viable para abastecer las necesidades energéticas de un hogar.

## CAPITULO II. MARCO TEORICO

### 2.1. Conceptos sobre energía Solar.

El Sol es la estrella más próxima a la Tierra. A su alrededor giran los planetas del sistema solar, aunque él concentra el 99% de masa de todo el sistema solar. La temperatura de su superficie ronda los 6000 K, aunque esta temperatura disminuye en las manchas solares (alrededor de los 4800 K). En el núcleo del Sol se pueden alcanzar temperaturas del orden de  $1.5 \times 10^7$  K y la densidad es unas 120 veces mayor que en la superficie. En esta zona se alcanzan presiones de 250000 millones de atmosferas. Los gases del núcleo están comprimidos hasta una densidad de 150 veces la del agua.

La fuente de toda la energía del Sol se encuentra en su núcleo. Debido a las condiciones extremas de presión y temperatura en su interior, tienen lugar reacciones nucleares de fusión. En estas reacciones termonucleares, cuatro átomos de hidrogeno se combinan para convertirse en un átomo de helio. La masa del átomo de helio es 0.7% menor que la masa de los cuatro átomos de hidrogeno. Esa masa que falta es lo que se convierte en energía, la cual en forma de radiación gamma se expande desde el núcleo hacia la superficie en los primeros 500,000 km de espesor de la esfera solar por radiación, en este punto alcanza la zona en la que el transporte de energía se produce por convección y permite a los fotones generados en el núcleo, después de un largo viaje de miles de años alcanzar la superficie del Sol. (Sánchez, 2010).

Se calcula teóricamente que en la parte interna del Sol e fusionan 700 millones de toneladas de hidrogeno cada segundo, y la pérdida de masa, la cual se transforma en energía solar se cifra en 4.3 millones de toneladas por segundo.

El Sol se encuentra a una distancia media de la Tierra de 150 millones de kilómetros, y la luz tarda 8.3 minutos en llegar a la superficie de terrestre, viajando a una velocidad de 300,000 Km/s. La radiación solar llega a la Tierra como ondas electromagnéticas, las cuales no necesitan un medio físico para su propagación por el espacio, desplazando en todas las direcciones.

La cantidad de energía que transporta una onda electromagnética es proporcional a su frecuencia. La frecuencia es el número de veces que se repite una onda completa por unidad de

tiempo. Cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la energía que la onda transporta y por lo tanto mayor el efecto que esta tiene cuando impacta sobre un cuerpo (Sánchez, 2010).

Otro parámetro característico de las radiaciones es la longitud de onda, la cual se define como la distancia, medida en la dirección de propagación de la onda, entre dos puntos de esta cuyo estado de movimiento es idéntico, como por ejemplo crestas o valles adyacentes.

La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, por lo tanto cuanto más pequeña sea la longitud de onda, más grande será la frecuencia, es decir, más veces se repite la onda en el tiempo y por lo tanto se puede transportar mayor energía. La longitud de onda y la frecuencia son importantes para determinar su energía, su visibilidad al ojo humano, su poder de penetración en la materia y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a la velocidad de la luz ( $c$ ).

En función de la frecuencia, las radiaciones electromagnéticas tienen mayor o menor capacidad de penetración en los materiales; mientras más corta sea su longitud de onda, mayor penetración tienen, ya que la energía que transporta es mayor y por lo tanto permite que la radiación ionice la materia, a este fenómeno se le llama efecto fotoeléctrico, que es la capacidad que tienen ciertas radiaciones para arrancar electrones de un material, este principio es el que se aplica para la generación de energía eléctrica mediante paneles Solares fotovoltaicos (Sánchez, 2010).

### **2.1.1. Constante solar.**

El Sol emite constantemente cantidades enormes de energía. Un cálculo teórico basado en la ley de Planck, permite afirmar que el flujo total de energía emitido por el Sol en todo el rango de frecuencias equivale a  $3.8 \times 10^{23}$  kW; De esa cantidad de energía emitida por el Sol, solo una pequeña fracción llega a la Tierra, aunque esa pequeña cantidad sería más que suficiente para cubrir la demanda mundial de todo un año, si se tuvieran los medios para captarla y usarla eficientemente; de la energía que llega, la atmosfera terrestre absorbe una gran cantidad.

La energía que llega a la parte alta de la atmosfera es una mezcla de radiaciones de diferentes longitudes de onda, formada por radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja. Todas constituyen el espectro solar terrestre tal como se puede observar en el grafico 2.1.

## Espectro de radiación

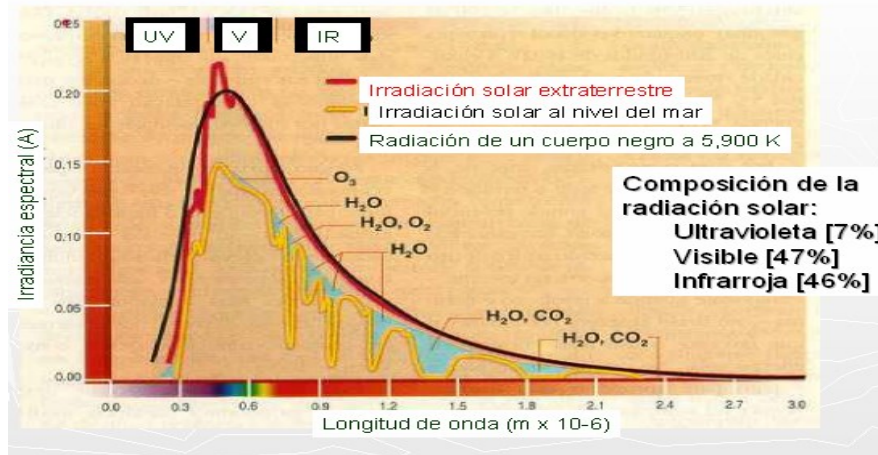


Gráfico 2.1. Espectro solar que llega a la Tierra. (Rivera, 2014)

En el gráfico 2.1 se observa que la mayor parte de energía solar está en el espectro de la luz visible y el espectro del infrarrojo, casi en iguales proporciones sumando en total el 93% del total de la energía solar que llega a la Tierra. Mientras que en el espectro del ultravioleta solo tenemos un 7% lo que deja ver que no es mucha la energía transportada en ese espectro, sin embargo en términos de energía radiante esta tendría mayor capacidad de penetración en la materia ya que su longitud de onda es más pequeña que la de la luz visible; sin embargo esta radiación es absorbida casi en su totalidad por el ozono que hay en la atmósfera.

Para medir la cantidad de energía solar que llega a la frontera exterior que delimita la atmósfera, se establece la constante solar. La cual nos permite establecer el valor correspondiente a la energía que incide perpendicularmente sobre el área de  $1\text{m}^2$  en la parte exterior de la atmósfera.

La constante solar es la radiación (flujo o densidad de potencia de la radiación solar) recogida fuera de la atmósfera sobre una superficie de  $1\text{m}^2$  perpendicular a los rayos solares. Este no es un valor constante ya que la distancia entre el Sol y la Tierra tampoco lo es y esta depende de la distancia. Oscila entre  $1400$  y  $1310\text{ W/m}^2$ , tomándose como valor establecido  $1353\text{ W/m}^2$ , variando en un  $\pm 3\%$  durante el año por ser la órbita terrestre elíptica (Sánchez, 2010).

La radiación solar incide sobre una superficie de la Tierra después de atravesar la atmósfera, en la que se debilita por efecto de reflexión, difusión y absorción de la materia atmosférica. La atmósfera absorbe parte de la radiación solar. En unas condiciones óptimas con

un día perfectamente claro y con los rayos del Sol llegando casi perpendicular, como mucho, las tres cuartas partes de la energía que llega al exterior alcanzan la superficie; el resto es reflejada en la atmósfera y se dirige al espacio exterior. Las nubes son en gran parte responsables de ello.

Casi toda la radiación ultravioleta y gran parte de la infrarroja son absorbidas por el ozono y otros gases en la parte alta de la atmósfera. El vapor de agua y otros componentes atmosféricos absorben en mayor o menor medida la luz visible e infrarroja (Sánchez, 2010).

El valor dado de la constante solar dado anteriormente ya no es válido en la superficie de la Tierra. Aquí en condiciones atmosféricas óptimas: día soleado de verano, cielo totalmente despejado, en una superficie de  $1\text{m}^2$  perpendicular al Sol, la luz solar plena registra un valor de  $1000\text{ Watt/m}^2$ .

Sin embargo pueden darse otras situaciones en las que la radiación solar tenga valores distintos: Varía según el momento del día, también varía considerablemente de un lugar a otro, especialmente en regiones montañosas, y a la diferencia con respecto a la posición relativa del Sol en el cielo ( elevación solar), la cual depende de la latitud de cada lugar.

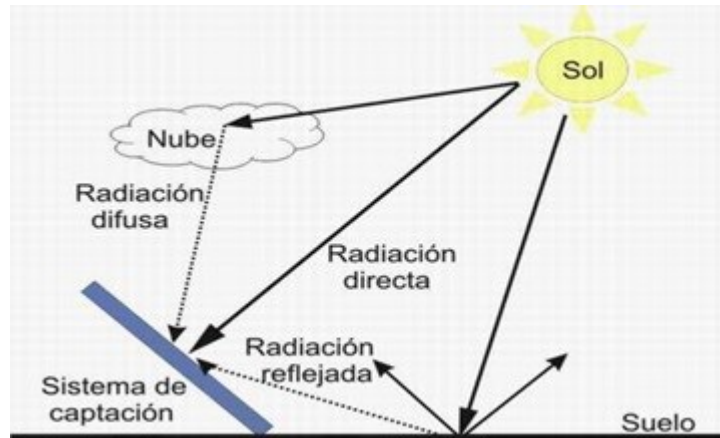
### **2.1.2. Componentes de la radiación solar.**

Según como llegue la luz solar a la superficie de la Tierra, podemos clasificar la radiación en tres tipos de diferentes como se puede observar en la figura 2.1.

La **radiación solar directa**. Es la radiación que incide sobre cualquier superficie con un ángulo único y preciso. La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión. Esto explica como un área con sombra o piezas sin luz solar están iluminadas: les llega luz difusa o radiación difusa.

La **radiación difusa**. Es la radiación dispersada por los gases y partículas que se encuentran en la atmósfera terrestre; Todos estos elementos que se encuentran en la atmósfera dispersan más efectivamente las longitudes de onda más cortas (violeta y azul) que las longitudes de onda más largas (naranja y rojo). Esto explica el color azul del cielo y los colores rojo y naranja del amanecer y atardecer. Cuando amanece o anochece, la radiación solar recorre un mayor espesor de atmósfera y la luz azul y violeta es dispersada hacia el espacio exterior, pasando mayor cantidad de luz roja y naranja hacia la Tierra, lo que da el color del cielo a esas horas.

El **albedo** es la fracción de la radiación reflejada por la superficie de la Tierra o cualquier otra superficie. El albedo es variable de un lugar a otro, por ejemplo para un cuerpo negro su valor es cero, pero para la nieve es de 0.9, para un suelo mojado es 0.18, etc.



*Figura 2.1.* Componentes de la radiación solar en la superficie de la Tierra. (Yanez & Lopez, 2014)

En la figura 2.1, se observa que a un sistema de captación solar llega radiación directa, difusa y reflejada ya sea por el suelo o por alguna otra superficie, la suma de estos tres tipos de radiaciones se conoce como radiación global y sería la energía total que llega a la superficie de la Tierra, así que un sistema de captación solar solo aprovecha una parte del total de energía que llega a la superficie de la Tierra, algunos sistemas solo aprovechan la radiación directa como en el caso del CCP y los captadores planos; los paneles fotovoltaicos algunos traen tecnología para aprovechar la radiación difusa y directa lo que los hace que aprovechen un rango mayor de captación de energía sin embargo la desventaja está en su baja eficiencia de conversión de la energía solar en energía eléctrica.

Las proporciones de radiación solar directa, dispersa y albedo recibidas por una superficie dependen de:

- ✓ **Condiciones atmosféricas.** En un día nublado la radiación es prácticamente dispersa en su totalidad, mientras que en un día despejado con clima seco predomina, en cambio, la componente directa, que puede llegar hasta un 90% de la radiación total extraterrestre que llega a la superficie de la Tierra.
- ✓ **Inclinación de la superficie respecto al plano horizontal.** Una superficie horizontal recibe la máxima radiación dispersa, sino hay alrededor objetos a una altura superior a la

de la superficie y la mínima reflejada. Al aumentar la inclinación de la superficie de captación disminuye la componente dispersa y aumenta la componente reflejada.

- ✓ **Presencia de superficies reflectantes.** Las superficies claras son las más reflectantes, la radiación reflejada aumenta en invierno por efecto de la nieve y disminuye en verano por efecto de la absorción de la hierba o del terreno (Sánchez, 2010).

### 2.1.3. Variaciones de la radiación solar.

La radiación solar es aproximadamente constante antes de llegar a la atmósfera; sin embargo, una vez que entra en ella, se produce una importante disminución.

La posición del Sol varía diariamente desde el amanecer hasta el ocaso. Si se observan las posiciones del Sol al amanecer, mediodía y atardecer en cualquier lugar del hemisferio norte, se verá como el Sol sale por el este, se desplaza en dirección sur se pone por el oeste. También es distinta según la estación del año: no se encuentra a la misma altura sobre el horizonte en invierno que en verano, lo que significa que la inclinación de los captadores no debería ser fija si se quiere que en todo momento estén orientados perpendicularmente al Sol. En invierno, el Sol no alcanzara el mismo ángulo que en verano. Idealmente, en verano los captadores solares deberían ser colocados en posición ligeramente más horizontal para aprovechar al máximo la luz solar. Pero si se mantuviera esa posición en invierno, los mismos paneles no estarían en posición óptima para el Sol de invierno.

Para aprovechar al máximo esa radiación solar, la orientación de los captadores se hace hacia el sur en el hemisferio norte y hacia el norte en el hemisferio sur, es decir siempre en dirección del ecuador.

En la figura 2.2, se observa como la posición del Sol varia durante el año, aquí solo se tienen las cuatro posiciones principales del Sol que corresponden a las cuatro estaciones sin embargo queda claro cómo está oscilando dicha posición y por lo tanto el ángulo de contacto entre la horizontal y el zenit como cambia.

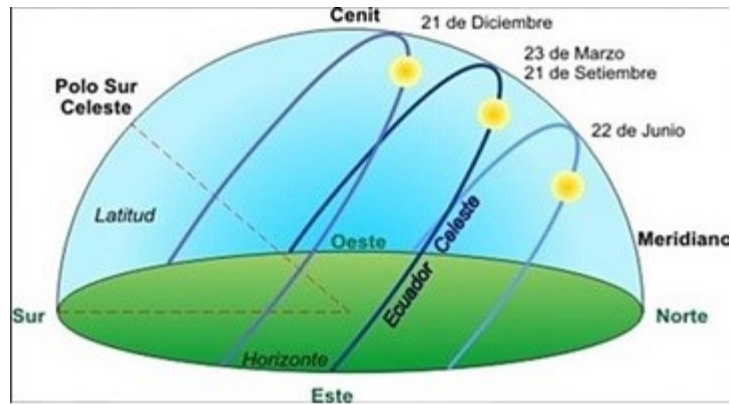


Figura 2.2. Variación de la posición del Sol durante el año con respecto al plano horizontal. (Chile, 2014)

#### 2.1.4. Parámetros principales de la posición del Sol.

Los principales parámetros que definen la posición del Sol son:

- ✓ **Azimut.** Es el ángulo que forma la proyección de los rayos solares sobre un plano tangente a la superficie terrestre y el sur geográfico. Cuando el Sol se encuentra exactamente sobre el sur geográfico (medio día solar), el azimut tiene valor cero.
- ✓ **Altura solar.** Es el ángulo que forman los rayos solares con la horizontal cuando llegan a la superficie de la Tierra.
- ✓ **Declinación.** La posición angular del Sol a mediodía con respecto al plano del Ecuador. El norte es positivo y el sur negativo.  $-23.5^\circ \leq \delta \leq 23.5^\circ$
- ✓ **Zenit.** Es el ángulo subtendido entre la línea zenit y la línea de vista del Sol.
- ✓ **Hora solar.** Es el desplazamiento angular Este u Oeste del Sol con respecto al meridiano local debido a la rotación de la Tierra en su eje a  $15^\circ$  por hora. Se toma como referencia ( $\omega = 0$ ) el mediodía, y se calcula como  $15^\circ \times N^\circ \text{ horas al mediodía}$ . En la mañana este ángulo es negativo y en la tarde, positivo (Escobar, 2014).

Estos valores son calculables pero es más frecuente tomarlos en tablas en las que se recogen los valores correspondientes a un determinado lugar.

## 2.2. El Sol y la energía solar térmica.

La energía solar térmica (EST), es un método de aprovechamiento en el que se transforma la energía radiante del Sol en calor, que sirve para la producción de agua caliente destinada al consumo doméstico, agua caliente sanitaria, calefacción, etc., o para la producción de energía mecánica y a partir de esta energía eléctrica.

El lugar en el que se hace la transformación de la energía radiante del Sol en calor recibe el nombre de captador o concentrador solar (Sánchez, 2010).

### 2.2.1. Principio de funcionamiento.

La EST aprovecha la componente directa y difusa de la radiación total. La conversión de energía radiante en calor, se realiza por los mecanismos de conducción, convección y radiación.

**Conducción:** Se produce cuando la transferencia de calor desde una región que está a mayor temperatura hasta otra que está a una temperatura inferior en el mismo medio o entre diferentes medios que se encuentran en contacto.

**Convección:** Se produce cuando el desplazamiento del calor se produce por la transferencia real de materia entre regiones que se encuentran a diferentes temperaturas.

**Radiación:** Es el flujo de calor entre dos cuerpos que están a distinta temperatura, sin que exista un medio material entre ellos para la transferencia.

La radiación solar que llega a un concentrador, lo hace sobre la cubierta transparente. Una parte será reflejada, volviendo al exterior y la otra se transmitirá y de esta que se transmite una fracción es absorbida por el material reflectante y el resto es reflejado hacia el punto focal.

Donde la energía radiante se concentra en una gran proporción, permitiendo en ese punto aumentar la temperatura, de esta manera si se coloca una superficie en ese punto se calentará, transformando la energía radiante en energía térmica (Sánchez, 2010).

### **2.3. El concentrador cilíndrico-parabólico (CCP).**

El esquema del concentrador cilíndrico-parabólico se puede ver en la figura 2.3; Este sistema aprovecha la propiedad de las parábolas: todo rayo que choque sobre la parábola y que sea paralelo al eje, será reflejado en dirección a un punto común llamado foco.

Con este concepto geométrico podemos diseñar y construir una superficie reflectora en forma de parábola, para reflejar la radiación solar incidente que llegue a la superficie, la cual se reflejara al foco de la parábola, donde se ubicara un tubo receptor en la posición exacta del foco, este tubo recibirá todos los rayos solares de la superficie reflectora, logrando así una alta concentración de rayos sobre una pequeña región. Lo que producirá un aumento considerable de la temperatura en el tubo receptor, este aumento se puede aprovechar para hacer trabajo mecánico, con la ayuda de un fluido calo portador que circule por dicho tubo.

Desde el punto de vista estructural, este tipo de colectores se compone de cuatro elementos principales:

- La cimentación y la estructura soporte.
- El reflector cilindro parabólico.
- El tubo receptor.
- El sistema de seguimiento solar.

El sistema de seguimiento más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro parabólicos del colector alrededor de un eje. Aunque también se han fabricado CCP que pueden girar en dos ejes, se ha demostrado que estos colectores tienen un rendimiento menor que los de seguimiento en un único eje. Eso se debe a que los colectores con seguimiento en un eje tienen pérdidas térmicas menores, salen más rentables ya que son más sencillos mecánicamente, y son también más robustos resistiendo cargas de viento muy superiores. Normalmente, los CCP se instalan de forma que su eje de giro quede orientado en la dirección Este-Oeste o Norte-Sur (Sánchez, 2010).



Figura 2.3. Esquema de un concentrador de radiación solar cilíndrico parabólico. (Olivare, Aldana, & Moreno, 2014)

La rotación del colector se realiza mediante un mecanismo eléctrico o hidráulico, que mueve el concentrador de acuerdo con la posición del Sol.

El tubo receptor del CCP es el elemento que convierte la radiación solar concentrada en energía térmica que transporta el fluido térmico que circula por dicho tubo. Se encuentra en la línea focal del CCP, conectado a la estructura mediante unos soportes metálicos. Es uno de los elementos fundamentales de todo CCP, ya que afecta mucho el rendimiento global del concentrador. Consiste en un tubo absorbedor que a su vez puede estar compuesto por dos tubos concéntricos: uno interior metálico, por el que circula el fluido térmico, y otro exterior de vidrio.

El tubo metálico lleva un recubrimiento selectivo que posee una elevada absorción (~94%) pintura negro mate de alta temperatura y una baja emisividad en el espectro infrarrojo (~15%).

La misión del reflector cilindro parabólico es reflejar y proyectar la radiación solar de forma concentrada sobre el tubo receptor que está ubicado en la línea focal del reflector. Para llevar a cabo la reflexión, se utilizan películas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da suficiente rigidez. Estos medios soportes pueden ser chapa metálica, plástico o cristal.

En el caso de chapa metálica, el mismo material tiene la doble función de soporte y reflectante. Para ello se suelen usar chapas de aluminio con una reflectancia especular de 80% aproximadamente. La principal ventaja de este sistema es su bajo coste económico (Sánchez, 2010).

También se utiliza papel espejo de alta reflectividad, que es un material reflectante muy flexible que se ajusta fácilmente a la superficie curva del concentrador. Este material se adhiere a una lámina metálica que le da el soporte y la rigidez que se necesita. Como el papel no tiene

mucho peso, esto hace que el concentrador sea fácil de moverlo o girarlo. El único inconveniente con este material es su coste económico que todavía es bastante elevado en comparación con otros materiales reflectante que existen en el mercado.

Otro método utilizado es pegar delgadas tiras de espejo cortadas en secciones pequeñas que se ajusten a la forma de la curva del concentrador, con lo cual también se adquieren altos índices de concentración, la desventaja de los espejos es que hacen al concentrador bastante pesado lo que hace que cueste más moverlo o girarlo. Esto implica mayor gasto de potencia mecánica o eléctrica ya que el momento de torsión es elevado. Por lo tanto no es un buen material que se pueda utilizar en concentradores de gran tamaño.

La cimentación y la estructura soporte sirve para dar rigidez al CCP y para que se mantenga fijo. Es una estructura metálica que permite dejar al prototipo en las condiciones climáticas extremas sin preocupación de que sufra algún daño; claro que esta debe tener su cuidado a la hora de elegir los metales ya que hay algunos que se degradan rápidamente, lo que disminuiría considerablemente la vida útil del prototipo. Casi siempre se utiliza acero inoxidable o alguna aleación de aluminio ya que estos materiales no se oxidan al estar expuestos a la lluvia y al clima extremo (Sánchez, 2010).

### **2.3.1. La parábola.**

La parábola es el lugar geométrico donde todos los puntos de un plano equidistantes a una recta dada llamada directriz, y, a un punto exterior a ella que se denomina foco. Como se puede observar en la figura 2.4.

La parábola es simétrica respecto a la línea perpendicular a la directriz y que pasa por el foco le conoce como vértice de la parábola y es el punto cuya distancia a la directriz es mínima. La distancia entre el vértice y el foco se conoce como distancia focal ( $p$ ) o radio focal. Esta es la parte geométrica importante en el diseño y construcción del concentrador. (Wikipedia .. ., 2014).

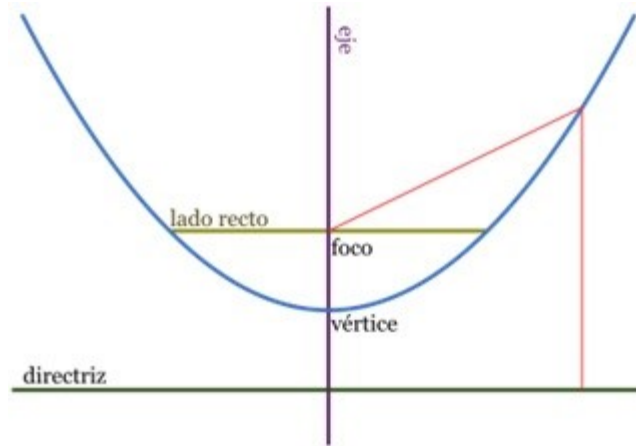


Figura 2.4. Elementos principales de una parábola. (Wikipedia .. , 2014)

### 2.3.1.1. Aplicaciones prácticas de la parábola.

- Una consecuencia de gran importancia es que la tangente refleja los rayos paralelos al eje de la parábola en dirección al foco. Las aplicaciones prácticas son muchas: las antenas satelitales y radiotelescopios aprovechan el principio concentrando señales recibidas desde un emisor lejano en un receptor colocado en la posición del foco.
- La concentración de la radiación solar en un punto, mediante un reflector parabólico tiene su aplicación en pequeñas cocinas Solares y grandes centrales captadoras de energía solar. Análogamente, una fuente emisora situada en el foco, enviara un haz de rayos paralelos al eje: diversas lámparas y faros tienen espejos con superficies parabólicas reflectantes para poder enviar haces de luz paralelos emanados de una fuente en posición focal. Los rayos convergen o divergen si el emisor se desplaza de la posición focal. (Wikipedia., 2014).

### 2.3.1.2. Ecuación de la parábola y determinación del foco.

Para nuestra aplicaciones vamos a suponer que nuestro origen de coordenadas será  $(0, 0, 0)$ , pero solo se opera en un plano de dos coordenadas  $(x, y)$ , donde “x” es la posición horizontal, “y” es la posición vertical de la abertura de la parábola. En la figura 2.7, está la ecuación general de una parábola vertical.

Se tiene que el vértice es  $V(0,0,0)$  y por lo tanto el foco será  $F(0,0,P)$ . La directriz es por tanto, la recta horizontal que pasa por  $(0, -p)$ . A la distancia entre el vértice y el foco se le llama

distancia focal, de modo que en este caso la distancia focal es igual a  $p$  (Parábola,, 2014). Por lo tanto se tiene que:

$$X^2 = 4 p y \quad (2.1)$$

$$Y = \frac{X^2}{4 P} \quad (2.2)$$

$$L_R = 4 P \quad (2.3)$$

$$P = \frac{L_R}{4} \quad (2.4)$$

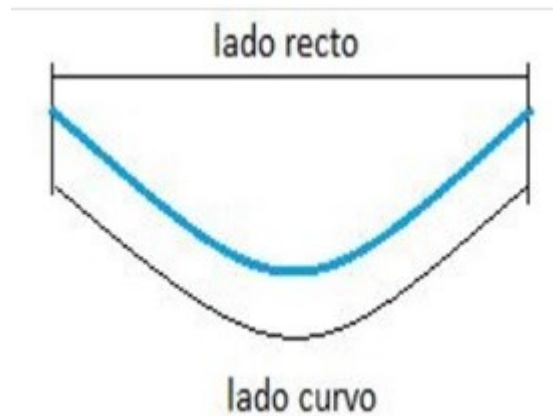


Figura 2.5. Forma de la superficie concentradora curva y lado recto. (Velsaco, 2014)

Para dimensionar el lado recto de la parábola ver figura 2.5, es necesario tener un valor apropiado de la distancia focal, ya que de este depende la abertura de la parábola, por lo tanto hay que utilizar la fórmula del arco de una curva, por medio de la cual se puede conocer la longitud de la abertura del CCP, en la figura 2.6, se tiene la forma de la curvatura del arco, para obtener la distancia focal de la parábola, que es de nuestro interés y con este valor calcular la abertura de la parábola (lado recto). (Velasco, 2014).

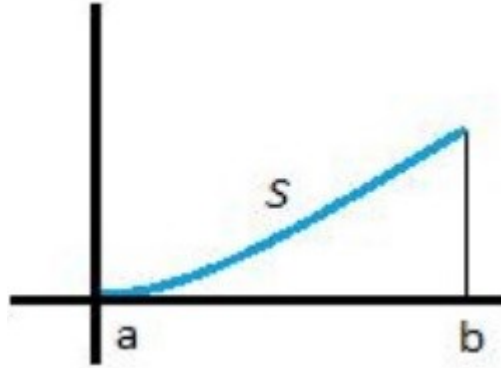


Figura 2.6. Parámetros para determinar el lado recto utilizando la ecuación de la curva. (Velasco, 2014).

Ecuación del arco de una curva:

$$S = \int_a^b \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx \quad (2.5)$$

La longitud de la curva es conocida,  $f'(x)$  es la primera derivada de la ecuación de la parábola (ecuación 2.2). Se toma el límite  $a=0$ , y el límite  $b$  es desconocido. Por lo tanto operando, sustituyendo y despejando  $b$ , se obtiene el valor de la semiabertura o lo que es lo mismo que  $X_{\max}$ . Este valor dependerá de los parámetros geométricos que se escojan del foco, ya que  $f(x) = y = \frac{x^2}{4p}$ . Para obtener  $Y_{\max}$ , se sustituye la  $X_{\max}$  obtenida en la ecuación general de la parábola. Pero también se puede utilizar solamente para conocer la longitud del lado curvo, si de manera aproximada le damos un valor particular a  $X_{\max}$  de manera que se ajuste a nuestras necesidades. (Velasco., 2014)

### 2.3.2. Cálculo del ángulo de abertura ( $\alpha$ ) y la distancia ( $\rho$ ).

En la figura 2.8, se observa el ángulo de abertura ( $\alpha$ ) entre los bordes del concentrador y su punto focal, el cual indica la abertura con la cual los rayos Solares convergen en el punto focal; hay que recordar que los rayos que llegan del Sol a la superficie de la Tierra no son puntuales si no que más bien son conos que sustentan un ángulo de 32' minutos, así que en la línea focal del concentrador se formara una figura geométrica llamada figura de Gauss la cual puede ser circular elíptica, dependiendo de la forma que adquiera la superficie concentradora. Este ángulo se determina de la siguiente manera:

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{X_{max}}{P - Y_{max}} \quad (2.6)$$

La distancia entre el borde del concentrador y el punto focal ( $\rho$ ) se determina así:

$$\rho = \sqrt{W^2 + (P - Y)^2} \quad (2.7)$$

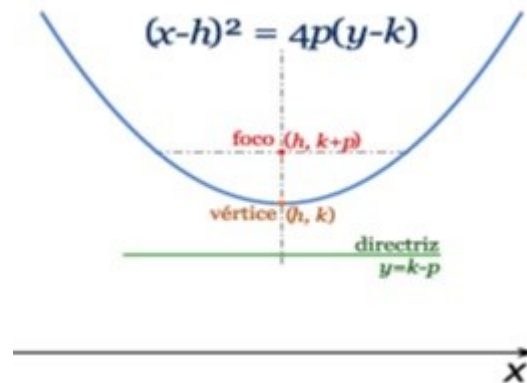


Figura 2.7. Ecuación general de una parábola vertical con sus elementos. (Wikipedia, 2014)

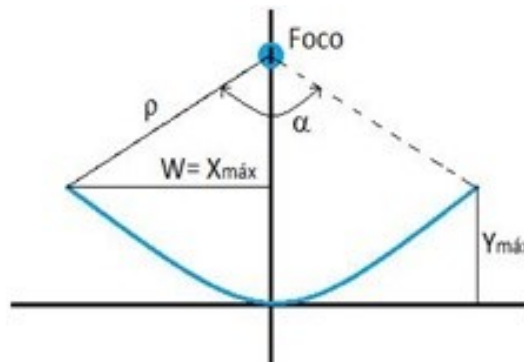


Figura 2.8. Relación y distancias dentro del concentrador cilíndrico-parabólico. (Velasco, 2014).

Como se considera que el concentrador es una línea constante de parábolas en el plano x-y, entonces la línea focal está ubicado en la misma altura. Así que ahora solo hace falta conocer el área del cilindro, ya que esta nos permitirá conocer la cantidad de radiación que llega constantemente al concentrador, para poder obtener la potencia que se está suministrando en el

foco; ya que se conoce la constante solar que del lugar, la cual ya fue determinada experimentalmente.

### 2.3.3. Determinación del diámetro del tubo receptor.

También es posible determinar el diámetro del tubo receptor, esto con el fin de que toda la radiación que se concentra se aproveche al máximo. Como el Sol visto desde la Tierra no es una fuente luminosa puntual, visto desde la Tierra el disco solar forma un ángulo de apertura de 32' minutos de ángulo, por lo tanto la radiación directa sobre la superficie de la Tierra no está formada por rayos perfectamente paralelos entre sí, sino que se distribuye sobre un cono de direcciones de semiángulo de 16', alrededor de la línea que forma el plano de observación con el centro del disco solar. Con esta observación se tiene que no todos los rayos de este cono alcanzaran un receptor de tamaño arbitrario. Como se puede observar en la figura 2.9.

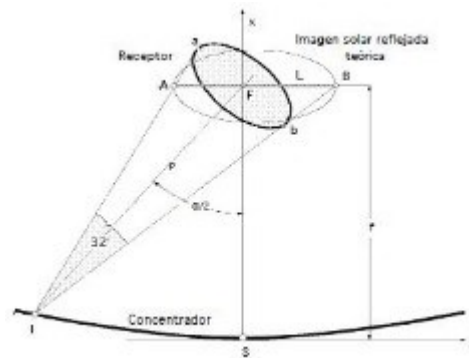


Figura 2.9. Proyección del disco Solar sobre el área de concentración. (Universidad Tecnológica, 2014).

El diámetro mínimo que debe tener el tubo receptor para que capte la mayor parte de la radiación concentrada se determina con la siguiente ecuación, a la cual se le agrega el parámetro del ancho de los espejos cortados:

$$D_{min} = \frac{2 \rho \tan(16')}{\cos(\frac{\alpha}{2})} + \frac{d}{2} \quad (2.8)$$

#### 2.3.4. Razón de concentración.

Una manera de saber que temperatura se puede obtener en este tipo de concentradores es a través de la razón de concentración,  $C$ . Esta se define como la razón entre el área efectiva de abertura  $A_a$ , y el área del tubo receptor  $A_r$ . Este valor se determina así:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.9)$$

Esta razón de concentración tiene un límite máximo, dependiendo si la concentración se hace en un concentrador circular, como en un paraboloide o en uno lineal como en el caso del CCP. Así, mediante un análisis no expuesto aquí basado en la segunda ley de la termodinámica aplicada al intercambio radioactivo entre el Sol y el tubo receptor, se obtiene que la razón de concentración máxima para un concentrador lineal viene dado por:

$$C_{max} = \frac{A_a}{A_r} = \frac{1}{\text{sen}\theta_{sop}} \quad (2.10)$$

Donde  $\theta_s$ , es la mitad del ángulo subtendido por el Sol y es igual a  $0.27^\circ$ ; así para un concentrador lineal (CCP) la razón máxima de concentración es solo de 212.

Entre más alta es la temperatura a la cual la energía necesita ser liberada, más alta debe ser la razón de concentración y también más precisos deben ser los componentes ópticos del concentrador y del tubo receptor, así como también el sistema de seguimiento solar. Debido a esta razón de concentración teórica la temperatura máxima que se puede alcanzar en el CCP es de  $400\text{-}450^\circ\text{C}$ , sin embargo con este nivel de temperatura se pueden realizar muchas actividades en las cuales se puede aprovechar la energía solar para procesos caseros o industriales. (García., 2014)

#### 2.3.5. Pérdidas y rendimiento del concentrador cilíndrico-parabólico.

En el proceso de aprovechamiento térmico de la radiación solar directa por parte del CCP, aparecen una serie de pérdidas. Estas pérdidas se pueden dividir en tres grupos:

- Pérdidas ópticas
- Pérdidas térmicas
- Pérdidas geométricas

Desde que la radiación solar pasa a través del plano de abertura del concentrador, hasta que es absorbida en el tubo receptor, se producen una serie de pérdidas. Estas pérdidas se deben a que el material concentrador no es un reflector perfecto ni tiene una forma geométrica perfecta, ni la cubierta transparente del tubo receptor deja pasar toda la radiación solar que le llega, tampoco la superficie selectiva es un absorbedor perfecto. Estas pérdidas se conocen como pérdidas ópticas y se determinan por cuatro parámetros.

$$\eta_{op} = \alpha \tau \rho \gamma \quad (2.11)$$

Donde:

$\alpha$  reflectividad del material;  $\tau$  transmitancia del material (tubo receptor);  $\rho$  absorción del material (tubo receptor);  $\gamma$  factor de interceptación de la radiación (emisividad).

Las pérdidas que se producen en el proceso de reflexión son tanto más altas cuanto menor es la reflectividad de la superficie concentradora, de ahí que uno de los factores más importantes en el mantenimiento del campo solar sea la limpieza del material reflectante, ya que la suciedad disminuye el nivel de reflexión de la radiación en el concentrador.

Parte de los rayos reflejados por el espejo concentrador no alcanzan el tubo receptor por causas de imperfecciones macroscópicas o microscópicas de las cubiertas, errores en el posicionamiento del concentrador con respecto a la posición relativa del tubo receptor, etc. Todas estas pérdidas se cuantifican a través del factor de interceptación  $\gamma$ , cuyo valor máximo suele ser del 95%, para concentradores de muy buena calidad de fabricación y con un procedimiento de montaje muy cuidadoso (Velasco, 2014).

Aunque la cubierta de cristal que protege al tubo receptor, deja pasar la mayor proporción de radiación solar, una parte pequeña de la radiación se refleja o es absorbida, por lo que el cociente entre la radiación que pasa a través de la cubierta y la radiación que incide sobre ella nos da la transmisividad ( $\tau$ ) de la cubierta. El valor de la transmisividad varía entre 92%-96%.

La absorción de la superficie selectiva,  $\rho$ , cuantifica qué cantidad de la radiación incidente es finalmente absorbida por el tubo. Los valores típicos de absorción varían entre 90%-96%.

El producto de los cuatro parámetros anteriores es el rendimiento óptico del CCP, lo cual depende solamente del ángulo de incidencia de la radiación y del grado de ensuciamiento del concentrador.

Como no se sabe el valor de la reflectividad de los espejos que se utilizan en la superficie reflectora, entonces no se puede calcular la eficiencia óptica de manera directa. Hay que hacer uso de un método que la determina de manera indirecta de forma experimental y es llamado método estacionario.

Con este método se procede de la siguiente manera, se expone el concentrador a la radiación solar y se hace pasar por el tubo receptor un fluido, de manera controlado, de esta manera se determina el flujo másico y se mide el cambio de temperatura que el fluido experimenta, también es necesario saber cuál es el valor de la constante solar para el lugar donde se está haciendo el experimento. Con este método eficiencia óptica se determina así:

$$\eta_{op} = \frac{\dot{m} \times C \times (T_s - T_e)}{E_s \times A_{tr}} \quad (2.12)$$

Donde  $\eta_{op}$  es la eficiencia óptica del concentrador;  $\dot{m}$  es el flujo másico;  $C$  es el calor específico del fluido que circula por el tubo receptor;  $T_s$  es la temperatura de salida;  $T_e$  es la temperatura de entrada;  $E_s$  es la energía solar;  $A_{tr}$  es el área del tubo receptor.

Las pérdidas geométricas provocan una disminución del área efectiva de captación de los concentradores y se dividen en dos grupos:

- Pérdidas inherentes al concentrador.
- Pérdidas debidas a la posición relativa entre filas de concentradores (plantas termosolares).

Las pérdidas geométricas inherentes al CCP están causadas porque este tipo de concentradores tienen seguimiento en un único eje y por tanto, sólo poseen movimiento en elevación, lo que da lugar a la existencia de un ángulo de incidencia entre el vector solar y el vector normal a la abertura del concentrador. Para un ángulo de incidencia no nulo, existe una parte al final del tubo receptor que no está iluminada por los rayos reflejados procedentes del espejo concentrador. Las pérdidas geométricas provocan una disminución en el área efectiva de captación de la energía solar así:

$$A_e = W I_\theta = W F_m \tan(\theta) \quad (2.13)$$

Donde  $A_e$  es el área de concentración que se pierde por este fenómeno;  $W$  es el ancho de la parábola (lado recto);  $f_m$  es la distancia media entre la superficie de la parábola y el tubo receptor, dentro de una misma sección transversal, cuyo valor se calcula, por geometría, de acuerdo con la ecuación:

$$F_m = F + \frac{(F)(W)^2}{48 F^2} \quad (2.14)$$

Donde  $f$  es la distancia focal de la parábola.

Las pérdidas térmicas se producen principalmente en dos lugares: en el tubo receptor y en las tuberías de fluido térmico, siendo bastante más importantes las pérdidas del tubo receptor. Las pérdidas térmicas asociadas al tubo receptor están formadas por:

- Pérdidas de calor por conducción a través de los soportes de los tubos receptores.
- Pérdidas por radiación, convección y conducción desde el tubo receptor hacia la cubierta de cristal (en caso de que se tenga).
- Pérdidas por convección y radiación desde el tubo de cristal al ambiente. En aquellos tubos receptores en los que entre el tubo metálico y el de cristal hay vacío, las pérdidas térmicas por conducción y convección desde el tubo metálico hacia la cubierta de vidrio quedan eliminadas, y solo hay pérdidas por radiación entre el tubo metálico y la cubierta de cristal.

Como consecuencia de todas las pérdidas ópticas, geométricas y térmicas que existen en un CCP, la energía térmica útil que da un CCP es menor que la que daría en condiciones ideales. En la figura 2.10 se observan las pérdidas energéticas del concentrador cilíndrico-parabólico.

En la figura 2.10, se tiene que  $\eta_{opt,0^\circ}$ , es el rendimiento óptico pico del concentrador cuando se tiene un ángulo  $\Phi=0^\circ$  de incidencia de la radiación solar sobre el concentrador.

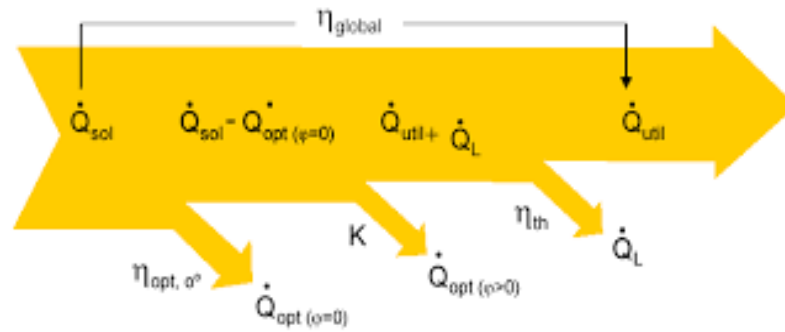


Figura 2.10. Balance energético en el concentrador cilíndrico parabólico. (DOT, 2014)

$\eta_{th}$ , es el rendimiento global del concentrador y considera todos los tipos de pérdidas tanto ópticas como geométricas y térmicas, definiéndose por tanto como el cociente entre la potencia térmica útil y la potencia solar incidente sobre el concentrador así:

$$\eta_{global} = \frac{Q_{util}}{Q_{sol-concentrador}} \quad (2.15)$$

La potencia solar incidente sobre el plano de abertura del concentrador viene dado por la ecuación:

$$Q_{sol-concentrador} = A_a I_{sol} \cos(\theta) \quad (2.16)$$

Donde:

$A_a$  es el área de abertura del concentrador ( $m^2$ );  $I$  es la constante solar del lugar donde se están haciendo las medidas;  $\theta$  es el ángulo de incidencia de la radiación solar (grados), sobre el concentrador; La máxima potencia se obtiene cuando el ángulo de incidencia de la radiación solar es cero, esto significa que el concentrador esta frente al Sol, por tanto la radiación llega perpendicular a la superficie.

Por otra parte, la energía térmica útil suministrada por el concentrador viene dada, en términos del incremento de temperatura que experimenta el fluido de trabajo en el tubo receptor, este es el calor ganado por el fluido que circula por el tubo receptor del concentrador:

$$Q_{\text{util}} = \dot{m} C \Delta T = \dot{m} C (T_s - T_e) \quad (2.17)$$

Siendo  $\dot{m}$  el flujo másico que circula por el tubo receptor;  $C$  el calor específico del fluido;  $\Delta T$  es el cambio de temperatura que experimenta el fluido

Para determinar la eficiencia térmica global del CCP se utiliza el método que usado por los técnicos de La Geo<sup>2</sup>, con lo cual determinan la eficiencia térmica global del concentrador. Se procede de la siguiente manera: Se mantienen las temperaturas de entrada y salida en un valor constante, es decir que no varíen mucho. Lo que se mide es el valor del calor ganado por el CCP, así como también el calor entregado por el Sol al CCP.

Los cálculos se hacen con las siguientes ecuaciones:

$$Q_{g \text{ ccp}} = \dot{m} * C * \Delta T = \dot{m} \times c \times (T_s - T_e) \quad (2.18)$$

$Q_{g \text{ ccp}}$ : Potencia ganada por el concentrador;  $\dot{m}$  es el flujo másico;  $C$  es el calor específico del fluido que circula por el tubo receptor;  $T_s$  es la temperatura de salida;  $T_e$  es la temperatura de entrada.

El calor entregado por el Sol al concentrador viene dado por:

$$Q_s = E_s \times \eta_{op} = I A_a \eta_{op} \quad (2.19)$$

Por lo tanto la eficiencia térmica global del CCP se determina sustituyendo la ecuación 2.17 y 2.18 en la ecuación 2.14, así:

$$\eta = \frac{Q_{g \text{ ccp}}}{Q_s} = \frac{Q_{g \text{ ccp}}}{E_s * \eta_{op}} = \frac{\dot{m} c \Delta T}{I A_a \eta_{op}} \quad (2.20)$$

Donde:

---

<sup>2</sup> Visita realizada a la central geotérmica del Berlín, Usulután, Diciembre de 2014.

$\eta$  es la eficiencia térmica global del concentrador;  $E_s$  es la energía Solar que llega al concentrador;  $\eta_{op}$  es la eficiencia óptica del concentrador.

Haciendo todos estos cálculos ya se tiene caracterizado el concentrador cilíndrico-parabólico, con ello se sabe cuál es la capacidad que tiene para captar y transformar la energía radiante del Sol en energía térmica.

## 2.4. Determinación de la constante solar en la superficie de la Tierra.

Como no se tienen instrumentos para medir este valor que se necesita en la caracterización del CCP, hay que determinarlo de manera indirecta haciendo uso de un experimento que se explica a continuación.

El método que se utiliza para poder determinar la constante solar que llega a la superficie de la Tierra consiste en usar una lata cilíndrica de aluminio y agua dentro de la misma, la cual se pinta de negro para que refleje la mínima cantidad de radiación y de esta manera se transfiera la mayor cantidad posible de calor absorbido al agua y se almacene casi toda la energía que está llegando en la unidad del tiempo a la superficie expuesta a la radiación solar. El área de la lata se determina midiendo el diámetro y la altura de la lata con un pie de rey.

Solamente se pinta la mitad del área de la lata porque solamente a la mitad del área llega radiación esto se comprueba por la sombra rectangular que muestra la lata cuando se expone al Sol.

Para determinar la constante solar utilizando este método se procede con las siguientes ecuaciones de la termodinámica, haciendo un balance energético en el sistema lata-agua-Sol, así:

$$C = m_1c_1 + m_2c_2 + \dots \quad (2.21)$$

C: capacidad calorífica total del sistema lata-agua.

Determinando el área de exposición a la radiación:

$$A = b H = D H \quad (2.22)$$

Y el calor ganado por el sistema lata-agua:

$$Q = mc\Delta T \quad (2.23)$$

$$mc = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.24)$$

En términos del tiempo de exposición se determina la potencia térmica absorbida así:

$$\frac{Q}{\Delta t} = KA \quad (2.25)$$

Donde K es una constante de proporcionalidad, A es el are de la lata cilíndrica, Q es el calor absorbido por el agua,  $\Delta t$  es el tiempo de exposición.

Haciendo uso de la ecuación 2.21, 2.24 y la relación entre el cambio de temperatura en función del tiempo se obtiene que la potencia absorbida por el sistema es:

$$\frac{Q}{\Delta t} = (M_{agua}C_{agua} + M_{al}C_{al}) \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2.26)$$

Se sustituye la ecuación 2.24 en la ecuación 2.25 y se despeja K quedando así:

$$K = \frac{M_{agua}C_{agua} + M_{al}C_{al}}{A} * \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2.27)$$

$$m = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2.28)$$

Donde:

K: Constante solar; A es el área de la superficie expuesta al Sol; Q es la potencia térmica;  $\Delta T$  es el cambio de temperatura;  $\Delta t$  es el tiempo de exposición a la radiación; C es la capacidad calorífica del sistema; C es el calor específico; m la pendiente.

## 2.5. Fluidos de trabajo para un concentrador cilíndrico-parabólico.

El rango de temperatura ideal para trabajar con CCP es de 150°C - 400°C. Para temperaturas superiores las pérdidas térmicas en éste tipo de concentradores son altas y reducen su rendimiento. Para temperaturas inferiores a 150°C existen otros concentradores más económicos. El tipo de fluido de trabajo que se utiliza en los CCP depende de la temperatura que se desea alcanzar, o con la cual se desea generar energía térmica.

Existe una amplia variedad de fluidos térmicos para canales parabólicos, siendo los principales:

- Aceites o siliconas sintéticos
- Aceites minerales
- Sales fundidas
- Agua
- Líquidos iónicos
- Aire u otro gas

Si las temperaturas que se desean son moderadas  $< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  la utilización de agua desmineralizada como fluido de trabajo no conlleva grandes problemas ya que la presión de trabajo no es excesiva, hay que recordar que el agua se evapora a 100 °C, esto implica que a temperaturas mayores, existe en el caso del tubo receptor vapor de agua sobrecalentado, esto lleva a una expansión molecular del vapor de agua dentro de los tubos, hay que recordar que en estas condiciones tenemos agua en estado gaseoso y por lo tanto se comporta como un gas, entonces con el aumento de temperatura hay un cambio de volumen y por lo tanto también de presión; pero dentro del tubo receptor no existe cambio de volumen ya que este es fijo, entonces hay un incremento excesivo en la presión. En caso de que los tubos que se tienen no sean los idóneos para soportar esa presión se corre el riesgo de que la presión excesiva los rompa. Entonces a mayor presión se deben tener tubos más rígidos y por lo tanto esto llevaría a incrementar el coste económico de construcción del sistema.

Para temperaturas más altas  $125\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), se suelen utilizar aceites sintéticos; La explicación de éste hecho consiste en que para temperaturas altas las tuberías estarían sometidas a elevadas presiones, si el fluido de trabajo fuera agua, porque para evitar que se evapore el agua es necesario mantenerla en todo momento a una presión superior a la de

saturación correspondiente a la temperatura máxima que alcance el agua en los concentradores Solares.

A pesar de las elevadas presiones que conlleva el uso de agua directamente en los CCP para temperaturas altas, la utilización de agua para altas temperaturas/presiones se ha contemplado siempre como una opción atractiva que ya permite aumentar la eficiencia global del sistema Solar y disminuir la pérdidas térmicas en el campo de concentradores. Esto ha motivado el desarrollo de diversos proyectos durante las últimas décadas para investigar ésta tecnología conocida como Generación Directa de Vapor (GDV) (Mikroulis, 2014).

### **2.5.1. Generación de vapor con concentrador cilíndrico-parabólico.**

La gran mayoría de las aplicaciones comerciales de los canales parabólicos están destinadas a la producción de vapor. Según los requerimientos impuestos por el proceso a alimentar térmicamente, el vapor puede ser saturado o sobrecalentado. Éste vapor puede producirse en las tres formas siguientes:

- Empleando en los concentradores solares un fluido de trabajo que, una vez calentado en ellos, transmite la energía térmica a un intercambiador de calor donde se produce el vapor que alimenta el proceso industrial. El aceite es un fluido de trabajo muy común para éste tipo de sistemas porque se comporta como un buen medio de transferencia de calor y tiene una presión de vapor moderada, lo que simplifica el diseño de las tuberías del campo solar.
- Circulando agua presurizada en los concentradores y convirtiéndolo parcialmente en vapor en un tanque de expansión súbita (flashing). Éste método se usa para producir vapor a temperaturas no demasiado altas (menos de 200°C), debido a la alta presión necesaria en los tubos receptores de los CCP y en las tuberías si la temperatura del vapor es más alta.
- Evaporando agua directamente en los tubos receptores de los CCP (Generación Directa de Vapor).

Una forma atractiva para generar vapor, es utilizando la tercer técnica donde el agua usada como fluido calo portador, se evapora directamente en el tubo receptor, este vapor generado en los CCP, se precalienta, evapora y se convierte en vapor sobrecalentado, en un proceso sin interrupción desde la entrada hasta la salida.

Desde el punto de vista de la ingeniería y de la inversión inicial este proceso es el de menor costo y mayor simplicidad, ya que no se requieren elementos auxiliares, tales como intercambiadores de calor, extinguidores, materiales específicos en el caso de que exista fuga del aceite, etc.

Pero el proceso de un solo paso presenta ciertos inconvenientes en cuanto a la controlabilidad y la estabilidad del flujo en el interior de los tubos receptores, ya que requiere un sistema de control muy eficiente que permita mantener constantes la presión y temperatura del vapor a la salida del campo Solar aunque haya transitorios importantes en la irradiación solar directa disponible o cambios en la temperatura del agua de alimentación. Además, este problema se penaliza por el elevado tiempo de respuesta del sistema solar en este caso, ya que la gran longitud que deben tener las filas de concentradores impone un tiempo de residencia alto. Puesto que un cambio en las condiciones del vapor puede suponer un grave peligro para la durabilidad de la turbina, la fiabilidad y la precisión del sistema de control del campo solar debe estar garantizada. Esto es en caso de que se tenga un campo solar de grandes proporciones donde se genera una potencia elevada en nuestro caso el concentrador diseñado resulta pequeño y por lo tanto resulta viable aplicar la técnica y verificar de esta manera el funcionamiento del sistema y observar si resulta viable para la generación de energía eléctrica (Mikroulis., 2014).

Hay que recordar que el uso de agua en el campo de CCP implica trabajar a presiones altas. Uno de los puntos más críticos es, la existencia de elementos (juntas rotativas para las uniones entre concentradores, tubos receptores etc.) que garanticen un funcionamiento adecuado bajo esas condiciones de trabajo. Otro punto importante es que tiene que existir un equipo de inyección de hidracina y amoniaco con el fin de ajustar el pH y la conductividad térmica del agua. Eso se debe a que si la conductividad es demasiado alta y el pH demasiado bajo, hay una fuerte corrosión de todos los elementos metálicos. Son propiedades a tomar en cuenta cuando se trabaja con agua como fluido calo portador.

Las ventajas principales de la generación directa de vapor se pueden citar las siguientes:

- Se elimina tanto el riesgo de fugas contaminantes como el de incendio debido al aceite térmico.
- Se puede aumentar la temperatura máxima del ciclo de potencia por encima de los 400°C en las centrales eléctricas termosolares.

- El límite actual de los 400°C está impuesto por los aceites sintéticos disponibles para trabajar como medio de transferencia entre el campo solar y el bloque de potencia, porque se degradan a temperaturas superiores.
- Permite reducir el tamaño del campo solar para una misma capacidad de generación.
- Al eliminar el intercambiador de calor aceite/agua se aumenta el rendimiento global de la planta, lo que permite reducir el tamaño del campo solar y con ello la inversión requerida
- Se simplifica la configuración de la planta, ya que no solo se elimina el intercambiador de calor, sino que también se eliminan todos los sistemas auxiliares del circuito de aceite (sistema antiincendios, piscina de recogida del aceite en caso de fugas, sistema de purga de incondensables de aceite y el sistema de inertización del circuito de aceite). Ésta simplificación y ahorro de componentes tiene un claro impacto beneficioso en la inversión inicial necesaria para la implementación de una planta termosolar.
- Reducción de los costes de operación y mantenimiento, ya que los sistemas basados en aceite térmico implican un coste que puede llegar hasta un 4% anual, debido a la reposición del aceite. Requieren también una protección anticongelante para temperaturas ambientales bajas.

La existencia de un flujo bifásico agua líquida/vapor a alta presión en los tubos receptores de los concentradores conlleva también algunos inconvenientes como:

- Necesidad de tuberías, válvulas y accesorios metálicos del campo solar más fuertes, con paredes más gruesas que sean capaces de soportar unas mayores presiones de trabajo. Este aumento de la presión de trabajo en el campo solar aumenta el coste de estos componentes.
- Debido al flujo bifásico existente en el campo solar y las diferentes propiedades termodinámicas del agua líquida y del vapor, los sistemas de control necesarios en un sistema de este tipo son más complicados y costosos que los usados en los sistemas que emplean otros fluidos de trabajo.

A pesar de los inconvenientes se ha comprobado mediante estudios anteriores que el balance final económico entre el conjunto de las ventajas y los inconvenientes mencionados es bastante positivo. Es decir es una buena técnica para experimentar y obtener más resultados para generar más información que sirva para la implementación de más plantas utilizando este método. (Mikroulis, 2014).

## 2.6. Turbina de vapor – alternador.

La turbina es un instrumento que transforma la energía térmica (calor) en energía mecánica, a través de una serie de herramientas que permiten dicha transformación; El diseño de una turbina de vapor se puede observar en la figura 2.11. En la figura 2.12, se observa el acoplamiento turbina de vapor-alternador conectado para la generación de energía eléctrica.

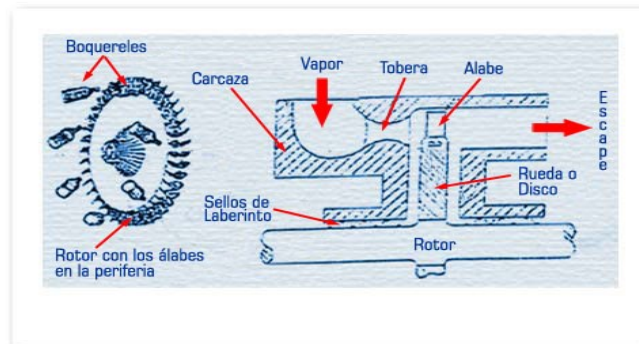


Figura 2.11. Esquema de una turbina de vapor. (Turbina de vapor, 2015)

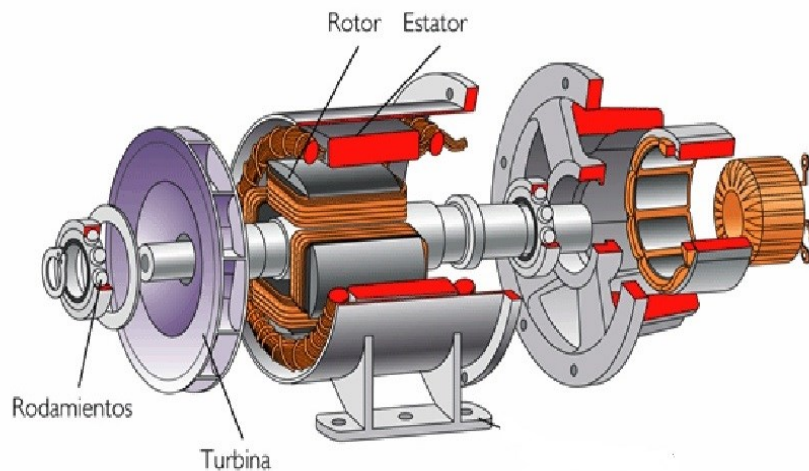


Figura 2.12. Turbina de vapor conectada al alternador. (Tecnología, 2015)

### 2.6.1. Primeras turbinas de vapor.

Según la historia la primera turbina fue construida por Herón de Alejandría en año 175 AC, figura 2.13, la cual consistía en una esfera metálica con dos toberas en los polos y orientadas en

el mismo sentido por donde escapaba el vapor. Esta esfera giraba diametralmente apoyada sobre la caldera por los conductos de entrada del vapor. (Wikipedia .. .., 2015).

En 1629 Giovanni Branca, utilizo un chorro de vapor para impulsar el giro de la rueda de un molino de agua, aunque no logro aplicar la técnica a ningún proceso industrial. (Scribd, 2015).

En 1878 De Laval, logro patentar la primera turbina de vapor con aplicación industrial en Suecia, la cual consistía en una maquina centrifuga desnatadora, con la cual se revolucionó la producción de leche, esta máquina funcionaba con vapor, ver figura 2.14. (Energiza, 2014).

En 1884 Charles Algernon Parson, patento la primera turbina de vapor con aplicaciones industriales y comerciales, con el diseño y construcción de la turbina de vapor de alta velocidad que podía alcanzar hasta 18,000 rpm. A principios del siglo XX la mayoría de barcos modernos ya eran equipados con este tipo de motor. (Biografías, 2015)

### **2.6.2. Principales elementos de una turbina de vapor.**

La turbina se compone de los siguientes elementos principales, ver figura 2.15:

- El cuerpo del rotor, que contiene las coronas giratorias de alabes.
- La carcasa, conteniendo las coronas fijas de toberas.
- Alabes.

Además, tiene una serie de elementos estructurales, mecánicos y auxiliares, como son cojinetes, válvulas de regulación, sistema de lubricación, sistema de refrigeración, virador, sistema de control, sistema de extracción de vahos, de aceite de control y sistema de sellado del vapor.

### **2.7. Alternador.**

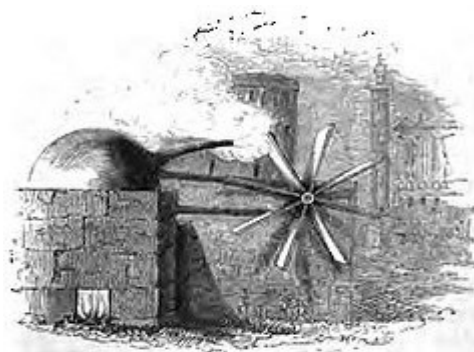
Un alternador es una máquina eléctrica, capaz de transformar energía mecánica, en energía eléctrica, generando una corriente alterna mediante inducción electromagnética.

Los alternadores están fundados en el principio de que, en un conductor sometido a un campo magnético variable, crea una tensión eléctrica inducida, cuya polaridad depende del sentido del campo, y el valor del flujo que lo atraviesa.

Un alternador de corriente alterna funciona, cambiando constantemente la polaridad, para que haya movimiento y genere energía. En el mundo se utilizan alternadores con una frecuencia de 50 Hz (Europa) o 60 Hz (Brasil, Estados Unidos), es decir, que cambia su polaridad 50 o 60 veces por segundo.



*Figura 2.13. Esfera giratoria de Herón. (Garrido & López, 2015)*



*Figura 2.14. Turbina de vapor patentada por De Laval. (García & Martín, 2015)*

En la figura 2.16, se observa como el movimiento de la espira, dentro de un campo magnético producido por el electroimán, este movimiento genera energía eléctrica, transformando la energía mecánica, que se aplica en el rotor inmediatamente en energía eléctrica.

Las espiras al girar libremente, cuando a los alabes de la turbina se le aplica un chorro de vapor a alta presión, transforman la energía térmica, en energía cinética a alta velocidad, y los alabes transforman esa energía cinética en energía mecánica rotacional, lo que provoca la generación de una fuerza electromotriz, entre los bornes de las espiras, debido a que las espiras constantemente están cortando, el campo magnético produciendo una corriente eléctrica alterna, figura 2.17.

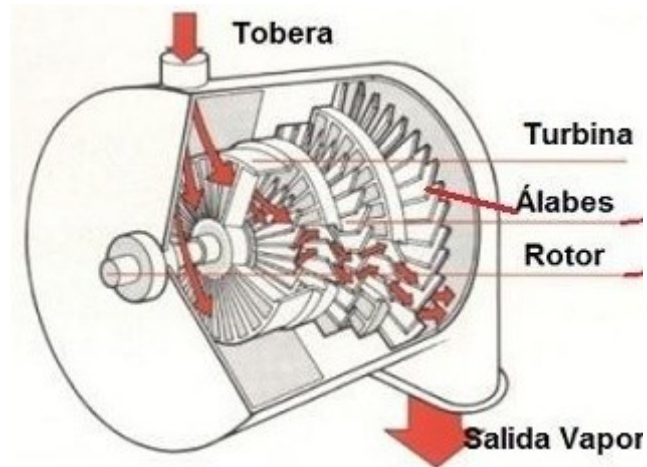


Figura 2.15. Elementos principales de una turbina de vapor. (Valls, 2015)

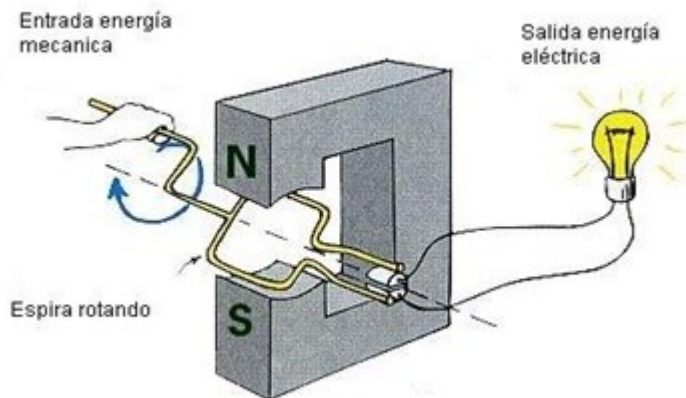


Figura 2.16. Esquema sencillo de un generador eléctrico. (Bulmaro., 2015)

### 2.7.1. Fundamento físico.

El flujo magnético ( $\Phi$ ) a través de cada espira de las bobinas que constituyen el inducido tiene por valor el producto de la intensidad de campo ( $\mathbf{B}$ ), por la superficie de la espira ( $\mathbf{s}$ ) y por el coseno del ángulo formado por el plano que contiene a esta y la dirección del campo magnético ( $\cos \varphi$ ), por lo que el flujo en cada instante será:

$$d\varphi = Bxdsx\cos\varphi \quad (2.29)$$

Como por otra parte tenemos que siempre que se produce una variación del flujo magnético que atraviesa a una espira se produce en ella una fuerza electromotriz ( $\mathbf{E}$ ) inducida cuyo valor es igual a la velocidad de variación del flujo, por tanto tendremos que:

$$E = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (2.30)$$

Si la fuerza electromotriz inducida en una espira es igual a  $E$ , la fuerza electromotriz total ( $E_{TOT}$ ) es igual a:

$$E_{Total} = ExN \quad (2.31)$$

Con  $N$  el número total de espiras del inducido.

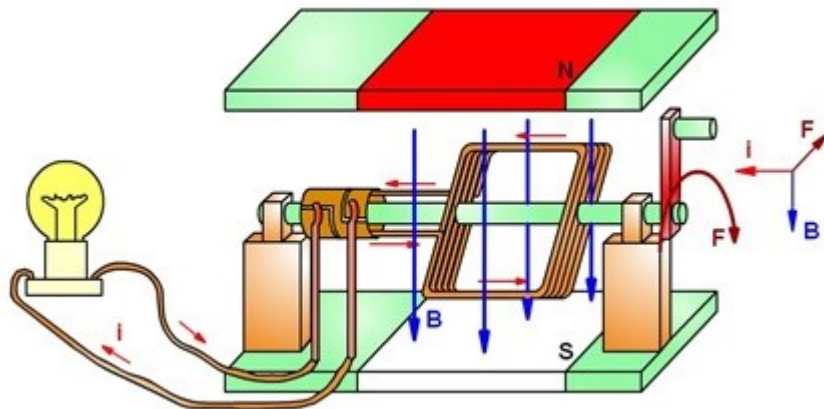


Figura 2.17. Diagrama de fuerza mecánica, campo magnético y corriente en un alternador. (Baustista, 2015)

La frecuencia de la corriente alterna que aparece entre los terminales de la máquina se obtiene multiplicando la velocidad de rotación (número de vueltas por segundo) ( $\omega$ ) del inductor por el número de pares de polos del inducido ( $n$ ). (Wikipedia .. ..., 2015).

$$f = \omega xn \quad (2.32)$$

La potencia eléctrica transformada está dada por la corriente (I) y el voltaje (V) que se mide a la salida de las terminales del alternador así:

$$P = IxV \quad (2.33)$$

## CAPITULO III: SISTEMA DE HIPOTESIS.

### 3.1. Justificación

El desarrollo de este trabajo de investigación se justificó en el uso de nuevas técnicas de aprovechamiento de la energía solar, la cual está disponible por varias horas al día en El Salvador. El sol es la estrella más cercana que tenemos y es el astro que regula la vida en nuestro planeta, sin este tipo de energía la vida tal como se conoce no existiría, esto da pautas para saber con certeza que si se utiliza al máximo esta energía en todas las actividades diarias, los resultados que se obtendrán serán beneficiosos para todos y para el planeta así como también para todas las formas de vida ya que se hace uso de una energía limpia, que no contamina y que además estará disponible por miles de millones de años más.

Estas son las razones que motivan el desarrollo de este trabajo, sobre todo que en El Salvador no se está haciendo uso de esta energía, aunque se tiene disponible todos los días del año, a excepción cuando las condiciones meteorológicas no lo permiten que son pocos los días en comparación con el resto del año.

Investigaciones desarrolladas demuestran que el potencial solar en El Salvador oscila entre **4.20 a 5.40 KWh/m<sup>2</sup> día**, lo que nos deja ver el enorme potencial solar que se tiene disponible para poder utilizar y sobre todo que el uso de esta energía es completamente gratis. (Proyecto SWERA, 2014).

### 3.2. Hipótesis.

- **Hipótesis nula,  $H_{0,1}$ :** Las temperaturas medidas en el tubo receptor en los puntos  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  muestran una variación normal a lo largo del periodo de medición.
- **Hipótesis alternativa,  $H_{a,1}$ :** Las temperaturas en el tubo receptor en los puntos  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  muestran una variación diferente a la normal a lo largo del periodo de medición.

- **Hipótesis nula,  $H_{0,2}$ :** Tanto la eficiencia óptica como la eficiencia térmica del concentrador cilíndrico-parabólico tienen valores mayores al 50% de captación de energía radiante.
- **Hipótesis alternativa,  $H_{a,2}$ :** Tanto la eficiencia óptica como la eficiencia térmica del concentrador cilíndrico-parabólico tienen valores menores al 50% de captación de energía radiante.
- **Hipótesis nula,  $H_{0,3}$ :** La temperatura medida en los diferentes puntos del tubo receptor con fluido estacionario muestra diferencia significativa, lo que indica que el fluido en el interior es afectado por la acumulación de energía térmica.
- **Hipótesis alternativa,  $H_{a,3}$ :** La temperatura medida en los diferentes puntos del tubo receptor con fluido estacionario no muestra diferencia significativa, lo que indica que el fluido en el interior no es afectado por la acumulación de energía térmica.
- **Hipótesis nula,  $H_{0,4}$ :** La potencia eléctrica instantánea generada con el sistema concentrador-turbina-alternador es suficiente para abastecer un hogar, lo que convierte al concentrador cilíndrico-parabólico en una opción viable para ser usado en el hogar.
- **Hipótesis alternativa,  $H_{0,4}$ :** La potencia eléctrica instantánea generada con el sistema concentrador-turbina-alternador no es insuficiente para abastecer un hogar, lo que convierte al concentrador cilíndrico-parabólico en una opción inviable para ser usado en el hogar.

## CAPITULO IV. DISEÑO METODOLOGICO

### 4.1. Diseño del Concentrador Cilíndrico-Parabólico.

#### 4.1.1. Selección de los parámetros geométricos de CCP.

Para establecer la geometría que tuvo el CCP, se utilizó las ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 que describen la curva del concentrador. La ecuación 2.5 se resuelve por procesos matemáticos simples para determinar el valor de la curvatura, siempre que se conoce la función y los límites de integración.

Para este CCP se estableció que la curvatura  $S$  tuviera un valor de 0.60 m, definido por las dimensiones de una lámina de aluminio de 1/32 m de espesor y bastante flexible. La función seleccionada fue la indicada por la ecuación 2.5, o de ella se obtiene la longitud de la curva de la parábola. Los límites de integración fueron,  $a = 0$  y  $b \rightarrow$  desconocido. En esta situación la ecuación se vuelve compleja y solo se puede resolver por métodos numéricos de aproximación. Para superar esta dificultad, la ecuación se resolvió utilizando el programa Maple v14<sup>3</sup>.

Lo que se hizo fue ingresar al sistema Maple v14 diferentes valores de distancias focales, y se determinaron los valores para  $b$ , que es la semiabertura de la parábola. Con este valor se determinó la abertura y el diámetro de la parábola que tiene el punto de concentración de la radiación solar en la línea focal; si este resultaba ser muy grande, no se podía utilizar ya que se necesitarían tubos de diámetros grandes para poder captar toda la radiación concentrada, lo cual dificultaría la construcción. El diámetro obtenido en estas condiciones es un valor que solo se

---

<sup>3</sup> Maple es una potente y completísima aplicación con la que puedes realizar cualquier tipo de operación matemática, por muy complicada que sea, en cuestión de segundos.

Maple es relativamente sencillo de manejar, con una interfaz muy intuitiva: en ella tienes a la vista el panel central donde realizas las operaciones y se muestran los resultados, más una serie de menús flotantes. Éstos te facilitan el acceso a los comandos relativos a las operaciones más complicadas, así como a un buen número de símbolos y signos matemáticos.

Así, puedes calcular desde las operaciones básicas (sumar, restar, multiplicar o dividir) hasta otras más complejas como raíces cuadradas, senos, cosenos, logaritmos, factoriales, números primos, derivadas, integrales, límites, potencias y así hasta tres mil funciones. Incluye también una potente utilidad para la visualización de gráficas matemáticas en 2D y 3D.

tomara como referencia ya que en la práctica, resulta tener un valor diferente debido a las imperfecciones en la construcción, tal como demuestran otros trabajos de investigación revisados, por lo tanto se buscó el diámetro cuyo valor sea el mínimo posible, de esta manera el diámetro experimental no resultó demasiado grande, y por ello fue posible utilizar un tubo de diámetro pequeño (0.043 m). Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.1.

Una vez que los valores de semiapertura que fueron satisfactorios, y que estuvieron dentro de los límites adecuados, ver tabla 4.2. En la tabla 4.3 se presentan todos los parámetros geométricos que se utilizaron para construir el CCP.

**Tabla 4.1.**

Parámetros para diseñar el canal parabólico del CCP.

<b>Distancia focal (P) (m)</b>	<b>X<sub>max</sub> (m)</b>	<b>Y<sub>max</sub> (m)</b>
<b>0.50</b>	0.57	0.162
<b>0.20</b>	0.49	0.30
<b>0.25</b>	0.51	0.26
<b>0.26</b>	0.52	0.26

Para nuestro diseño se había pensado que tanto la distancia focal como la altura del canal parabólico estuvieran en el mismo plano, ver gráfico 4.2, con estas consideraciones se tomó como base para el diseño los siguientes parámetros:

**Tabla 4.2.**

Parámetros que se tomaron para diseñar el perfil del CCP.

<b>Distancia focal (P) (m)</b>	<b>X<sub>max</sub> (m)</b>	<b>Y<sub>max</sub> (m)</b>
<b>0.26</b>	0.52	0.26

Con estos valores se determinaron todos los parámetros necesarios para construir el CCP quedando con las siguientes dimensiones:

**Tabla 4.3.**

Parámetros y dimensiones del CCP.

$Y_{\max}$ (m)	Foco (m)	$X_{\max}$ (m)	Ángulo de apertura ( $\alpha$ )	Distancia ( $\rho$ ) en (m)	$D_{\min}$ (m)	$L_R$ (m)	$L_c$ (m)	$L_L$ (m)
0.26	0.26	0.52	0	0.52	0.0197	1.04	1.2	2

Utilizando la ecuación 2.2, se logró diseñar el perfil del canal parabólico que tendría el concentrador cilíndrico- parabólico quedando como se muestra en el gráfico 4.1.

**Diseño de perfil del canal parabólico**

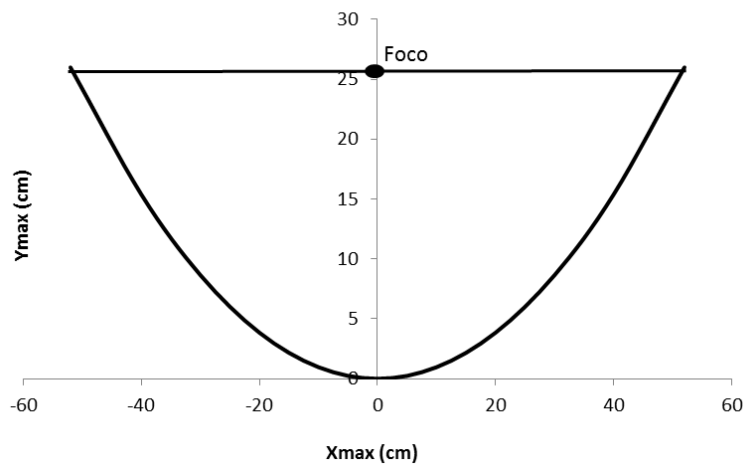


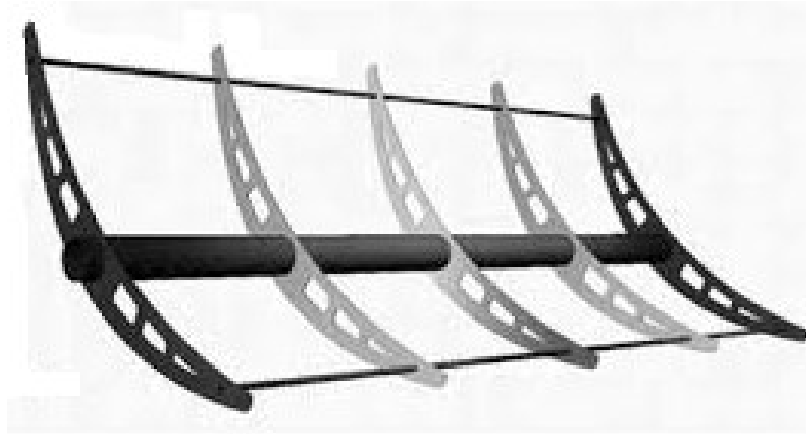
Gráfico 4.1. Perfil del canal parabólico del CCP.

#### 4.1.2. Estructura soporte del CCP.

La estructura soporte que sostiene al CCP es de metal. Se utilizaron tubos galvanizados de 0.0127 m y platina de hierro de 0.0254 m. El CCP tiene una longitud de 2 metros, por lo tanto fue necesario adquirir 5 tubos galvanizados. Para armar la estructura del CCP, se necesitó una pulidora para cortar metales, un equipo de soldadura industrial de alta potencia, una cinta métrica.

Con los tubos galvanizados se armó una estructura metálica que sostiene al concentrador. Los tubos fueron soldados y reforzados con la platina de hierro para mayor rigidez. Por encima de esta estructura se colocó la lámina de aluminio, la cual le dio la forma cilíndrica parabólica al

concentrador; esta lamina se sujetó con remaches para que quedara fija y no se moviera por el viento o cuando se gire el concentrador. Como se puede ver en la figura 4.1.



*Figura 4.1.* Estructura soporte de un concentrador cilíndrico-parabólico.  
(Cruz & García, 2015)

La lámina de aluminio se cubrió con tiras delgadas de espejo cortado para que adquirieran la forma parabólica. Por lo tanto fue necesario comprar un espejo grande de las dimensiones del concentrador y después cortarlo en tiras delgadas (3 cm de grosor), estas tiras se pegaron a la superficie de la lámina de aluminio, hasta quedó completamente cubierta. De esta manera ya se tiene la superficie reflectante construida, ver figura 4.2.

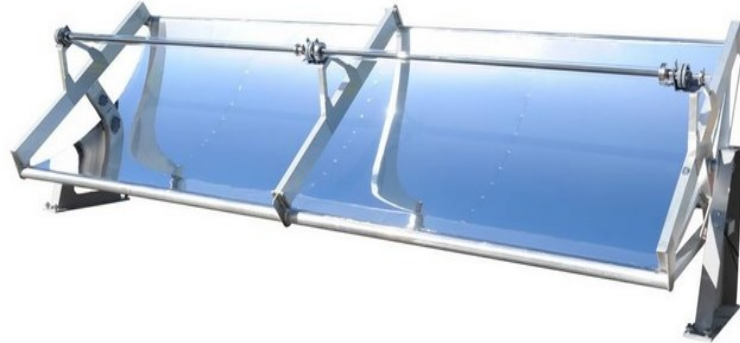
Para el tubo receptor se utilizaron unos tubos galvanizados, el diámetro de estos se determinó después de exponer el CCP a la radiación solar, ya que allí se tuvo el diámetro verdadero del punto de concentración del concentrador construido.

Para caracterizar el CCP se utilizó el método que utilizan los técnicos de La Geo, con lo cual determinan la eficiencia térmica del concentrador. Se procede de la siguiente manera: Se mantienen las temperaturas de entrada y salida en un valor constante, es decir que no varíen mucho. Lo que se mide es el valor del calor ganado por el CCP, así como también el calor entregado por el Sol al CCP.

Como no se sabe el valor de la reflectividad de los espejos utilizados en el concentrador, no se puede calcular la eficiencia óptica; Así que se determinó la eficiencia óptica por un método experimental, llamado método estacionario.

Con este método se procede de la siguiente manera, se expone el concentrador a la radiación solar y se hace pasar por el tubo receptor fluido, de manera controlado, de esta manera

se determina el flujo másico y se mide el cambio de temperatura que el fluido experimenta, también es necesario saber cuál es el valor de la constante solar para el día que se hace el experimento.



*Figura 4.2. Superficie reflectante del concentrador cilíndrico- parabólico.  
(Bussineswire.com, 2015)*

## **4.2. Diseño de la turbina y del alternador.**

La turbina es un dispositivo mecánico, que nos permite transformar la energía potencial en energía cinética, y esta energía a la vez se puede transformar con un generador en energía eléctrica. Es todo un proceso en el cual van involucrados muchos procesos físicos e ingeniería aplicada, pero en este trabajo no se describirá todo, solo los necesarios para entender el fin deseado y obtener los resultados que se buscan.

El elemento principal de la turbina son los alabes, que son lo que transforman la energía cinética en energía mecánica rotacional, el rotor que es el que gira libremente dentro de la carcasa, este elemento es el que permite que la energía mecánica rotacional se transforme en energía eléctrica. La carcasa que es la que sostiene todo los sistemas que componen la turbina y a la vez evita que el vapor se pierda al ambiente ya que está totalmente sellada para evitar estas pérdidas.

Para diseñar la turbina monoetapa se utilizó una pulidora modelo DW 402, TIPO 5 120 V AC, 50/60 Hz, 7.5 A, a 10000/RPM. Esta pulidora se desarmó para hacer un ajuste de manera que el ventilador se convirtiera en los alabes de la turbina. También se le hizo una pequeña carcasa con la cual se evitó que el vapor se dispersara una vez que impulsó los alabes. En el mismo diseño quedó montado el rotor y el estator donde se encuentran los devanados del alternador que giran dentro de las chapas que se encargan de direccionar el flujo magnético producido por los

imanes que se colocaron a los lados del rotor en la carcasa. En la figura 4.3 se muestra el diseño propuesto.



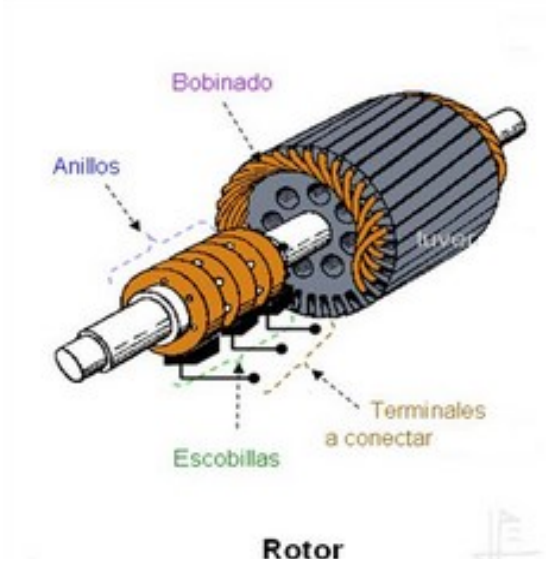
*Figura 4.3.* Disco giratorio compuesto por los alabes de la turbina

A continuación se presenta el esquema que se propuso para el diseño de la turbina que se construyó para el ensayo de generación de energía eléctrica a partir del vapor obtenido del CCP: 1 rotor, una tobera, la carcasa y el diámetro del disco giratorio de la turbina de 0.10 m con 13 alabes.

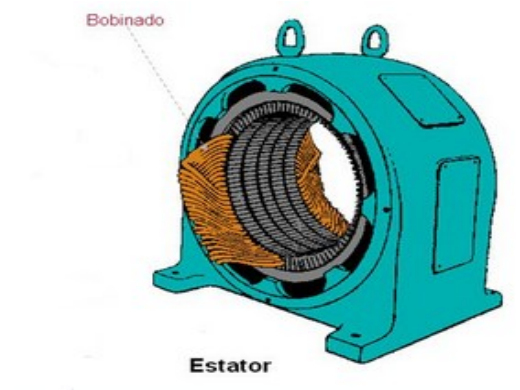
Este tipo de turbinas son solo de una etapa es decir el vapor que entra, solo pasa por una etapa y no por muchas como en otros diseños de turbinas, estas turbinas se pueden usar con fines educativos en la producción de baja potencia. Tiene la ventaja que son muy resistentes a los cambios bruscos que pueda presentar el vapor en el interior debido a los cambios de presión que este experimente.

El rotor es un mecanismo que gira libremente y este está conectado al disco de la turbina, que contiene los alabes y el movimiento de estos se transfiere al rotor el cual gira libremente. Este rotor gira frente a un electroimán transformando de esta manera la energía mecánica en energía eléctrica. En la figura 4.4 se muestra el esquema del rotor.

El estator es la parte estática de la turbina y es también donde están los imanes y bobinas que transforman la energía mecánica rotacional en energía eléctrica por el principio de inducción de Faraday y en la figura 4.5 se muestra el diseño.



*Figura 4.4.* El rotor que contiene los devanados del generador. (Web, 2015)



*Figura 4.5.* El estator de una turbina de vapor conteniendo el bobinado y los imanes. (Web, 2015)

### 4.3. Ubicación del estudio.

El estudio se realizó en el Caserío El Rodeo, Cantón San Gerónimo, Municipio de Chapeltique departamento de San Miguel, El Salvador. Las coordenadas del sitio son: 13°38'34.8''N, 88°17'19.4''O y una altitud de 190 msnm. En la figura 4.6 se tiene la ubicación satelital del lugar del experimento.

En el Municipio de Chapeltique se dan dos estaciones climáticas bien definidas, la estación seca que va aproximadamente del 14 de Noviembre al 19 de Abril aproximadamente, y la estación lluviosa que va del 21 de Mayo al 14 de Octubre aproximadamente.

La densidad vegetativa del lugar es media debido a la deforestación que se ha producido en los últimos años, aunque cerca pasa un río, por lo cual aumenta un poco más la vegetación.



Figura 4.6. Ubicación satelital del lugar donde se realizó el experimento.

#### **4.4. Tipo de Investigación y diseño.**

Para clasificar y caracterizar esta investigación se utilizaron los siguientes criterios:

- 1) *Según su propósito:* Fue una investigación aplicada, ya que los conocimientos que se obtuvieron forman parte del área energías renovables, específicamente del aprovechamiento de la energía solar, pero también del área del medioambiente.
- 2) *Según su diseño:* Fue una investigación de campo-experimental, porque la información se obtuvo midiendo directamente en el lugar donde se hizo el montaje experimental con un multímetro multifuncional.
- 3) *Según la temporalidad:* Fue una investigación transversal, porque se analizará el fenómeno en un periodo de tiempo de unos tres meses.
- 4) *Según el alcance:* Fue una investigación de tipo exploratoria-experimental, porque pretendió únicamente valorar la posibilidad de usar la energía solar térmica, a través del CCP de construcción artesanal usando materiales de bajo costo, como una alternativa para la generación de vapor de agua que puede ser utilizado en la producción de energía eléctrica a baja potencia.
- 5) *Según el enfoque:* La investigación fue cuantitativa, porque se recolectaron datos usando varios instrumentos de medida, como termocuplas, téster y otros, y posteriormente esos datos se analizaron para verificación de hipótesis.

#### **4.5. Variables y medición.**

##### **4.5.1. Definición y clasificación de las variables.**

Las variables de interés para el estudiar el comportamiento de la temperatura del tubo receptor sin fluido y con fluido durante la exposición a la radiación proveniente del concentrador, fueron:

- Temperatura en la entrada del tubo receptor,  $T_B$ .
- Temperatura del punto medio del tubo receptor,  $T_C$ .
- Temperatura en la salida del tubo receptor,  $T_A$ .

Las variables de interés para determinar la eficiencia del concentrador cilíndrico-parabólico fueron:

- Eficiencia óptica,
- Eficiencia térmica
- Flujo másico
- Temperatura del fluido en la entrada del tubo receptor,  $T_E$ .
- Temperatura del fluido en la salida del tubo receptor,  $T_S$ .
- Temperatura ambiente,  $T_{amb}$ .
- La constante solar para el lugar de medición.
- La capacidad calorífica del fluido de trabajo.

Para evaluar la viabilidad del CCP como una alternativa para la generación de energía térmica, las variables de interés fueron:

- Corriente eléctrica
- Voltaje eléctrico
- Potencia eléctrica instantánea.

Se determinó la eficiencia óptica y térmica del prototipo. Después se procedió con la ayuda de una turbina de vapor, a transformar la energía térmica en energía eléctrica.

#### 4.5.2. Indicadores y medición de las variables.

**Tabla 4. 4.**

Operacionalización de variables.

<p><b>Tema de investigación:</b>  <b>Diseño, construcción y caracterización de un concentrador cilíndrico-parabólico artesanal aplicado a la producción de energía eléctrica a pequeña escala</b></p>	
<p><b>Enunciado del problema:</b>  <b>Pregunta 1. ¿Cómo es la variación de la temperatura en los puntos de medición del tubo receptor al exponerlo a la radiación solar sin fluido y con fluido?</b></p>	<p><b>Hipótesis:</b>  <b><math>H_{0,1}</math>:</b> Las temperaturas medidas en el tubo receptor en los puntos <math>T_A</math>, <math>T_B</math>, <math>T_C</math> muestran una variación normal a lo largo del periodo de medición.  <b><math>H_{a,1}</math>:</b> Las temperaturas en el tubo receptor en los puntos <math>T_A</math>, <math>T_B</math>, <math>T_C</math> muestran una variación diferente a la normal a lo largo del periodo de medición.</p>
<p><b>Pregunta 2. ¿Cuál es la eficiencia óptica y térmica del concentrador cilíndrico-parabólico?</b></p>	<p><b><math>H_{0, 2}</math>:</b> Tanto la eficiencia óptica como la eficiencia térmica del concentrador cilíndrico-parabólico tienen valores mayores al 50% de captación de energía radiante.  <b><math>H_{a, 2}</math>:</b> Tanto la eficiencia óptica como la eficiencia térmica del concentrador cilíndrico-parabólico tienen valores menores al 50% de captación de energía radiante.</p>
<p><b>Pregunta 3. ¿Cómo es estadísticamente el cambio de temperatura en los diferentes puntos de medida del tubo receptor con fluido estacionario durante la exposición a la radiación solar?</b></p>	<p><b><math>H_{0,3}</math>:</b> La temperatura medida en los diferentes puntos del tubo receptor con fluido estacionario muestra diferencia significativa, lo que indica que el fluido en el interior es afectado por la acumulación de energía térmica.  <b><math>H_{a,3}</math>:</b> La temperatura medida en los diferentes puntos del tubo receptor con fluido estacionario no muestra diferencia significativa, lo que indica que el fluido en el interior no es afectado por la acumulación de energía térmica.</p>
<p><b>Pregunta 4. ¿Cuál es la variación de la potencia eléctrica instantánea generada con el vapor de agua del concentrador cilíndrico parabólico?</b></p>	<p><b><math>H_{0,4}</math>:</b> La potencia eléctrica instantánea generada con el sistema concentrador-turbina-alternador es suficiente para abastecer un hogar, lo que convierte al concentrador cilíndrico-parabólico en una opción viable para ser usado en el hogar.  <b><math>H_{a,4}</math>:</b> La potencia eléctrica instantánea generada con el sistema concentrador-turbina-alternador no es insuficiente para abastecer un hogar, lo que convierte al concentrador cilíndrico-parabólico en una opción inviable para ser usado en el hogar.</p>

**Objetivo general:**

Diseñar, construir y caracterizar un concentrador cilíndrico-parabólico (CCP) artesanal de radiación solar directa para la obtención de vapor de agua, y ensayar con este vapor de agua la generación de energía eléctrica.

Objetivos específicos.	Unidad de análisis y muestra	Variables	Operacionalización de variables	Indicador de medida	Escala de medida	Técnicas a utilizar	Instrumentos a utilizar
<p>Diseñar un concentrador cilíndrico-parabólico artesanal, de manera que sea de fácil manipulación y transporte.</p> <p>Construir un concentrador cilíndrico-parabólico utilizando materiales de bajo costo.</p> <p>Medir la temperatura del tubo receptor sin fluido y con fluido.</p> <p>Evaluar estadísticamente el comportamiento de la temperatura en el tubo receptor con fluido estacionario.</p>	<p><b>Unidad de análisis:</b> Concentrador cilíndrico-parabólico artesanal.</p> <p><b>Muestra:</b> Mediciones experimentales realizadas en el período del 01 de julio al 05 de agosto del año 2015.</p>	<b>VARIABLES PARA EVALUAR LA TEMPERATURA EN EL TUBO RECEPTOR.</b>					
		<p><b>Temperatura en la entrada del tubo receptor:</b> Es una variable cuantitativa</p>	<p>Se midió directamente en la superficie del tubo receptor, a 3.00 cm del borde de entrada.</p>	$T_B$ en °C	De razón: en el intervalo de 20.0 °C - 250.0 °C	Se midió colocando la unión del termopar en la superficie del tubo receptor, sujetándolo con una abrazadera metálica.	Multímetro multifuncional en función de termómetro con termocupla tipo K
		<p><b>Temperatura en el punto medio del tubo receptor:</b> Es una variable cuantitativa</p>	<p>Se midió directamente en la superficie del tubo receptor, exactamente a la mitad del tubo receptor.</p>	$T_C$ en °C	De razón: en el intervalo de 20.0 °C - 250.0 °C	Se midió colocando la unión del termopar en la superficie del tubo receptor, sujetándolo con una abrazadera metálica.	Multímetro multifuncional en función de termómetro con termocupla tipo K
		<p><b>Temperatura en la salida del tubo receptor:</b> Es una variable cuantitativa.</p>	<p>Se midió directamente en la superficie del tubo receptor, a 3.00 cm del borde de salida.</p>	$T_A$ en °C	De razón: en el intervalo de 20.0 °C -250.0 °C	Se midió colocando la unión del termopar en la superficie del tubo receptor, sujetándolo con una abrazadera metálica.	Multímetro multifuncional en función de termómetro con termocupla tipo K

Objetivos específicos.	Unidad de análisis y muestra	Variables	Operacionalización de variables	Indicador de medida	Escala de medida	Técnicas a utilizar	Instrumentos a utilizar
<p>Construir una turbina de vapor-alternador artesanal</p> <p>Realizar un ensayo de generación de potencia eléctrica instantánea a partir del vapor de agua obtenido del concentrador cilíndrico-parabólico.</p> <p>Determinar la potencia eléctrica instantánea para saber si el sistema concentrador-turbina-alternador es una alternativa viable para abastecer las necesidades energéticas de un hogar.</p>	<p><b>Unidad de análisis:</b> Concentrador cilíndrico parabólico.</p> <p><b>Muestra:</b> Mediciones experimentales realizadas en el período del 01 de julio al 05 de agosto del año 2015.</p>	<b>VARIABLES PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL CCP.</b>					
		<p><b>Eficiencia óptica:</b> Es una variable cuantitativa.</p>	<p>Se determinó de manera indirecta, teniendo que usar otras variables para calcularla.</p>	<p><math>\eta_{op}</math> en %</p>	<p>De razón: en el intervalo de 0% a 100%</p>	<p>Se calculó utilizando las siguientes variables: Temperatura de entrada del fluido. Temperatura del fluido en la salida del tubo receptor. Flujo másico. Constante solar. Capacidad calorífica. Área del tubo receptor</p>	<p>Multímetro multifuncional en función de termómetro con termocupla tipo K</p> <p>Probeta de vidrio pyrex de 1000 ml.</p> <p>Cronómetro digital.</p>
		<p><b>Eficiencia térmica:</b> Es una variable cuantitativa.</p>	<p>Se determinó de manera indirecta, teniendo que usar otras variables para calcularla.</p>	<p><math>\eta</math> en %</p>	<p>De razón: en el intervalo de 0% a 100%</p>	<p>Se calculó utilizando las siguientes variables: Temperatura de entrada del fluido. Temperatura del fluido en la salida del tubo receptor. Flujo másico. Eficiencia óptica. Constante solar. Capacidad calorífica.</p>	<p>Multímetro multifuncional en función de termómetro con termocupla tipo K</p> <p>Probeta de vidrio pyrex de 1000 ml.</p> <p>Cronómetro digital</p>

	Unidad de análisis y muestra	VARIABLES	Operacionalización de variables	Indicador de medida	Escala de medida	Técnicas a utilizar	Instrumentos a utilizar
		Flujo másico: Es una variable cuantitativa.	Se determinó de manera directa midiendo el volumen de fluido que circulaba por el tubo receptor en función del tiempo y con ellos se determinó la masa en función del tiempo.	$\dot{m} = \frac{dm}{dt}$ en kg/s	De razón: en el intervalo de 0 kg/s a 0.5 kg/s	Se colocó la probeta en la salida del tubo receptor y se midió la cantidad de volumen de agua en varios intervalos de tiempo.	Probeta de vidrio pyrex de 1000 ml  Cronómetro digital.
		<b>Temperatura de entrada del fluido en el tubo receptor.</b> Es una variable cuantitativa.	Se midió directamente haciendo un pequeño agujero en la entrada del tubo donde se colocó la termocupla tipo K	T <sub>E</sub> en °C	De razón: en el intervalo de 20 °C a 50 °C.	Se midió colocando la unión del termopar en contacto directo con el fluido.	Multímetro multifuncional en función de termómetro con termocupla tipo K
		<b>Temperatura del fluido en la salida del tubo receptor:</b> Es una variable cuantitativa.	Se midió directamente en la salida del tubo receptor.	T <sub>S</sub> en °C	De razón: en el intervalo de 20 °C a 50 °C.	Se midió colocando la unión del termopar en contacto directo con el fluido en la salida del tubo receptor.	Multímetro multifuncional en función de termómetro con termocupla tipo K
		<b>Constante solar en el lugar de medición:</b> Es una variable cuantitativa.	Se determinó de manera indirecta.	I en W/m <sup>2</sup>	De razón: en el intervalo de 800 W/m <sup>2</sup> a 1100 W/m <sup>2</sup>	Se determinó midiendo la temperatura de una cantidad de agua en el interior de un cilindro de aluminio pintado de negro en función del tiempo.	Multímetro multifuncional en función de termómetro con termocupla tipo K, Vernier. Balanza. Computadora.

Objetivos específicos.	Unidad de análisis y muestra	VARIABLES	Operacionalización de variables	Indicador de medida	Escala de medida	Técnicas a utilizar	Instrumentos a utilizar
		La capacidad calorífica del fluido de trabajo: Es una variable cuantitativa.	Se consultó en tablas ya definida.	C en J/kg C°	De razón: en el intervalo de 4000 J/kg.C° a 5000 J/kg.C°	Se consultó en tablas del libro Física Universitaria Edición 13.	
		Variables para evaluar la generación de potencia eléctrica:					
		<b>Corriente eléctrica:</b> Es una variable cuantitativa.	Se midió directamente en la salida de los bornes del alternador.	I en A	De razón: en el intervalo de 0 A a 1.5 A.	Se midió colocando las terminales de entrada del amperímetro directamente en los bornes de salida del alternador.	Multímetro multifuncional en función de amperímetro AC.
		<b>Voltaje eléctrico:</b> Es una variable cuantitativa.	Se midió directamente en la salida de los bornes del alternador.	V en V	De razón: en el intervalo de 0 V a 60 V	Se midió colocando las terminales de entrada del voltímetro directamente en los bornes de salida del alternador.	Multímetro multifuncional en función de voltímetro AC.
		<b>Potencia eléctrica:</b> Es una variable cuantitativa.	Se determinó de manera indirecta.	P en W/m <sup>2</sup>	De razón: en el intervalo de 0 W/m <sup>2</sup> a 60 W/m <sup>2</sup>	Se determinó utilizando las siguientes variables: Corriente eléctrica. Voltaje eléctrico.	Multímetro multifuncional en función de voltímetro AC. Téster multifuncional en función de amperímetro AC

## 4.6. Descripción del equipo de medición.

En el desarrollo de esta investigación se usaron 3 equipos **Agilent U1272A Multímetro digital portátil**, que incorporan lo último en tecnología. Estos equipos tienen la capacidad de medir temperatura, ya que cuentan con una sonda tipo K que permite medir temperaturas hasta los 1300 °C. La forma de los equipos la podemos ver en la figura 4.7.

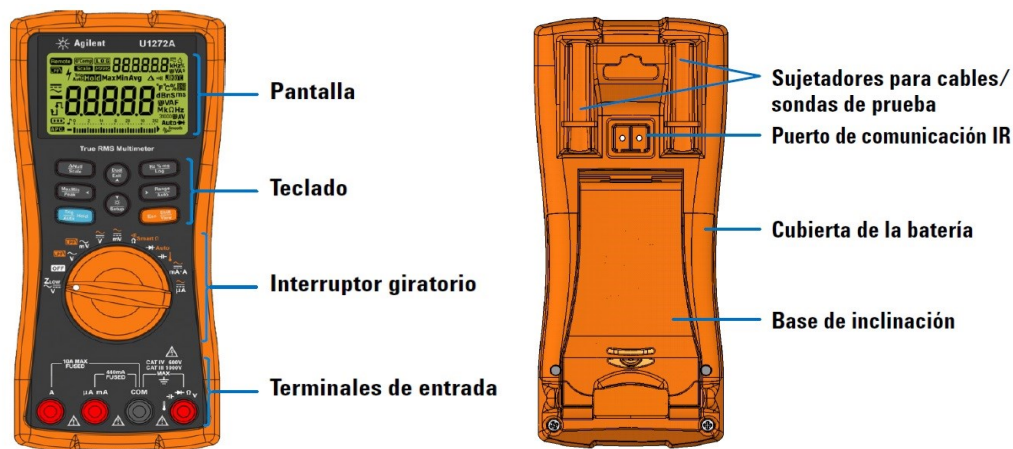


Figura 4.7. Vista frontal y descripción general de los equipos que se utilizarán en esta investigación. (Keysight Technologies, 2015)

Este es un multímetro multifuncional, que permite medir diferentes variables físicas; Estos dispositivos cuentan con tecnología de transmisión de datos en tiempo real, vía bluetooth, también los datos pueden ser recibidos por una computadora, si se tiene un dispositivo bluetooth instalado; O si no con el equipo viene un dispositivo que almacena los datos para luego mediante un cable transferirlos a la computadora para su procesamiento, en la figura 4.8 se tiene la descripción del equipo de almacenamiento de datos modelo U1115A. (Keysight, 2015)

Las variables que nos interesan en este trabajo de investigación son temperatura, voltaje y corriente.

La temperatura nos permite determinar la eficiencia térmica del CCP, ya que midiendo los cambios de temperatura de un fluido que circula por el tubo receptor es como se determina la eficiencia térmica, la cual no indica que de la cantidad de energía radiante que recibe el CCP solo una fracción se está transfiriendo al fluido caloportador.

El voltaje y la corriente nos permiten determinar la potencia de transformación de la energía térmica en energía eléctrica mediante la utilización de un motor que aproveche la energía térmica que se ha generado en el tubo receptor.

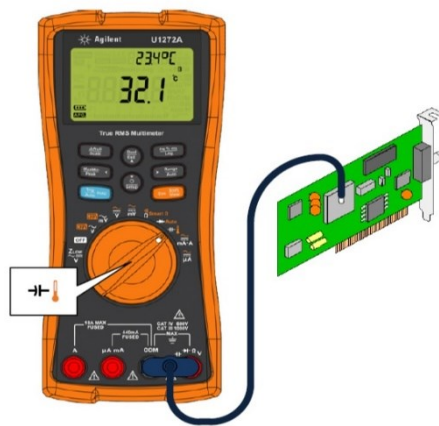


Figura 4.8. Equipo que almacena los datos de los multímetros digitales en tiempo real. (Keysight Technologies., 2015)

#### 4.6.1. Descripción de las escalas de medida.

**Temperatura:** Para que el multímetro pueda medir temperatura, se usa un sonda de temperatura tipo K (con ajuste predeterminado), con esta sonda se mide la temperatura. La sonda no se puede conectar a circuitos que tengan electricidad viva, ya que es posible ocasionar un choque eléctrico que dañaría el equipo.

El multímetro tiene una resolución de medida de la temperatura de 0.1 °C, lo cual nos da una mayor precisión en la toma de datos, ya que nos permite medir variaciones decimales de temperatura ver figura 4.20 y la ventaja es que con la tecnología con que cuenta el dispositivo nos permite almacenar los datos en tiempo real, lo cual nos permite hacer un mejor análisis del comportamiento de las variables térmicas que se están midiendo. El dispositivo de almacenamiento de datos nos permite almacenar datos con intervalos de tiempo que van desde de los segundos, minutos, horas o días. En la figura 4.9 se tiene al equipo en modo de termómetro digital con la termocupla tipo K que mide la temperatura.



*Figura 4.9.* Téster multifuncional en función de medir temperatura.

**Voltaje:** El multímetro permite medir voltajes tanto en CC como en CA. Tiene un amplio rango de medidas de voltaje que van desde los 300 mV hasta los 1000V, tanto en CC como en CA, tal como se muestra en la tabla 4.5.

**Corriente:** El multímetro permite medir corriente tanto en CC como en CA. Tiene un amplio rango de medidas de corriente que van desde los 300  $\mu$ A hasta los 10 A, tanto en CC como en CA, tal como se muestra en la tabla 4.6.

**Tabla 4.5.**

Resolución del téster multifuncional en la función de voltímetro.

Rango	Resolución
3V	0.0001V
30V	0.001V
300V	0.01V
1000V	0.1V
30mV	0.001mV
300mV	0.01mV

La forma como se hace en el panel de control para medir voltaje se muestra en la figura 4.10.



*Figura 4.10. Téster multifuncional en función del voltímetro.  
(Keysight Technologies .. , 2015)*

**Tabla 4.6.**

Resolución del téster multifuncional en la función de amperímetro.

Rango	Resolución
300 $\mu$ A	0.01 $\mu$ A
3000 $\mu$ A	0.1 $\mu$ A
30mA	0.001mA
300mA	0.01mA
3A	0.0001A
10A	0.001A

La forma como se hace en el panel de control para medir corriente se muestra en la figura 4.11.



Figura 4.11. Ubicación del panel de control para medir corriente.  
(Keysight Technologies .. , 2015)

#### 4.6.2. Certificados de calibración de los multímetros y recalibración de los mismos.

Con los certificados se garantiza la validez de los datos que se medirán con estos equipos; también el fabricante garantiza que aunque el certificado haya llegado a su fecha de caducación y el equipo no se haya usado, el equipo no se ve afectado y se sigue garantizando la calidad de los datos medidos, hasta por lo menos un año después de la fecha del primer uso del equipo.

En el anexo B, se agrega una hoja donde el fabricante explica cómo se ajusta el equipo cuando no se use inmediatamente después de la calibración de fábrica, de esta manera se

garantiza que aunque el certificado de calibración haya caducado, si el equipo no se ha usado, el fabricante garantiza que no es necesario hacer un ajuste del equipo, si no que más bien se especifica una fecha a partir de la cual es necesario hacer una recalibración del equipo. Como en nuestro caso los equipos no se han usado a partir de la fecha de calibración de fábrica, pero los usaremos después que se cumpla un año de la calibración del fabricante, entonces para establecer la fecha de la recalibración tomaremos el ejemplo 2, citado en el anexo A IV.

Los certificados de calibración, de los equipos de medición, utilizados en la investigación, se pueden ver en los anexos A I, A II, A III y A IV.

#### **4.7. Procedimiento y montaje experimental.**

Se diseñó un prototipo de CCP que permitió captar la radiación solar que incide en la superficie terrestre, con el fin de transformar la energía radiante del Sol en energía térmica aprovechable para diversas aplicaciones, tal como la generación de energía eléctrica.

Para comenzar el diseño del prototipo de CCP se seleccionaron las dimensiones adecuadas a las condiciones enfrentadas en el desarrollo de la presente investigación. Así, se incluyeron las dimensiones geométricas de los modelos de concentradores revisados en la literatura, tales como: la abertura de la parábola, la distancia focal, el largo el CCP, etc. Todas estas dimensiones geométricas fueron básicas para un buen diseño.

##### **4.7.1. Medición de la temperatura en el tubo receptor.**

Se procedió a caracterizar la temperatura del tubo receptor, para hacer esto el equipo de medición se colocó en la estructura metálica tal como se muestra en la figura 4.12 y en los puntos de medición indicados, temperatura en la entrada ( $T_E$ ), temperatura del punto B ( $T_B$ ), temperatura del punto C ( $T_C$ ) y temperatura del punto A ( $T_A$ ) así como también la temperatura de salida ( $T_S$ ) y se expuso a la radiación solar. Las medidas se iniciaron a las 10:00 am y se realizaron por 15 días.

#### 4.7.2. Determinación de la eficiencia óptica y térmica del CCP.

Después se procedió a determinar la eficiencia óptica del concentrador, por lo tanto se hizo el montaje experimental de la figura 4.13, para lo cual fue necesario hacer uso de un tubo galvanizado de un diámetro adecuado, para que toda la radiación concentrada incidiera sobre el área de este, el cual deberá ir pintado con una pintura negro mate de alta temperatura, la cual es de baja reflectividad y alta absorción; este tubo se colocó en la línea focal del concentrador y sirvió como absorbente de la radiación solar que se estaba reflejando en la superficie concentradora, a través del tubo se hizo circular una masa específica de agua que absorbió el calor recibido en el tubo receptor aumentado su temperatura.

Para hacer esta parte se expuso el CCP a la radiación solar y se hizo circular agua a temperatura ambiente en el interior del tubo receptor. El agua entró a una temperatura ( $T_e$ ), por un extremo del tubo receptor, como se observa en la figura 4.13 y 4.14. También se hizo uso de una llave de paso para regular el flujo de agua que circuló por el tubo receptor. El agua salió en el otro extremo del tubo a temperatura ( $T_s$ ), entonces se midió la temperatura de entrada del fluido y la temperatura de salida, así como el flujo másico, con estos los valores de estas variables podemos determinar la eficiencia del concentrador tanto óptica como térmica. Las mediciones se iniciaron a las 11:00 am y se realizaron por 20 días.



Figura 4.12. Puntos de medición de la temperatura en el tubo receptor.

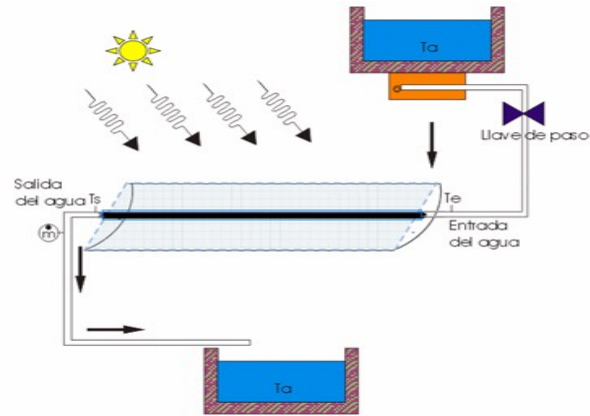


Figura 4.13. Determinación de la eficiencia óptica y térmica del CCP. (ELISBANSAC, 2014)



Figura 4.14. Montaje experimental para determinar la eficiencia óptica y térmica del CCP.

### **4.7.3. Determinación de la constante solar en la superficie de la tierra.**

Es necesario conocer el valor de la constante solar, en el lugar donde se harán las pruebas experimentales del concentrador. Para determinar este valor haremos uso de un método en el cual se puede medir la ganancia de energía en función del tiempo.

El método consiste en medir la variación de temperatura de una determinada cantidad de agua en el interior de un recipiente cilíndrico pintado de color negro mate, en función del tiempo, estos valores se grafican en Excel y utilizando las ecuaciones del balance de la energía se determina el valor de la constante solar. Que es la cantidad de energía que incide por unidad de área en la superficie, este valor varía en las diversas estaciones del año. Es por eso que es necesario hacer estas mediciones en el lugar donde se hará el experimento, así tendremos un valor más certero.

Para determinar este valor se necesitó una lata cilíndrica de jugo, pintura negro mate, lija, un termopar y un multímetro que nos permita registrar la temperatura así como también un cronometro para medir el tiempo de exposición.

El multímetro que se usó tiene incorporado un dispositivo bluetooth que nos permite registrar los datos a distancia así como también conectarse con otro dispositivo que guarda los datos almacenados en tiempo real de esta manera tenemos mucha precisión a la hora de tomar los datos, los cuales se guardaron en la computadora donde finalmente se procesaron en Excel .

#### **4.7.3.1. Diseño del experimento para determinar la constante solar.**

El método aplicado para poder determinar la energía solar que llega a la superficie de la tierra, consistió en una lata cilíndrica de aluminio y agua dentro del recipiente además se pintó de negro la mitad de la lata para que reflejara la mínima cantidad de radiación y de esta manera la energía captada se transfiriera al agua y almacenándola en forma de calor, lo que llevara a un aumento en la temperatura del agua en el interior de la lata. El área de la lata se determinara midiendo el diámetro y la altura de la lata con un pie de rey.

Solamente se pinta la mitad del área de la lata porque solamente a la mitad del área llega radiación esto se comprueba a través de la sombra rectangular que muestra la lata cuando se expone al sol, esto demuestra que el área es perpendicular a la radiación solar.

Es necesario ponerle sombra al sistema, esto para que todo el sistema alcance el equilibrio térmico y de esta manera se tenga la misma temperatura, así todo el sistema encuentra en equilibrio térmico. Las medidas de temperatura se hicieron con un multímetro de la serie U1272A, y los datos se almacenaron en el sistema de almacenamiento remoto, para posteriormente descargarlos a la PC para su procesamiento.

Cuando se alcance el equilibrio térmico, es decir ya no hubo fluctuaciones en la temperatura entonces el recipiente se expone al sol. Se toma como temperatura de referencia la temperatura que tenía el sistema cuando se expone al sol, después se proseguirá a almacenar los datos de temperatura con intervalos de 1 minuto, agitando constantemente el agua dentro del recipiente esto para uniformizar la temperatura de todo el sistema. En la figura 4.15 se muestra todo el procedimiento realizado para determinar la constante solar en la superficie de la tierra.



Figura 4.15. Montaje experimental para determinar el valor de la constante solar en la superficie terrestre.

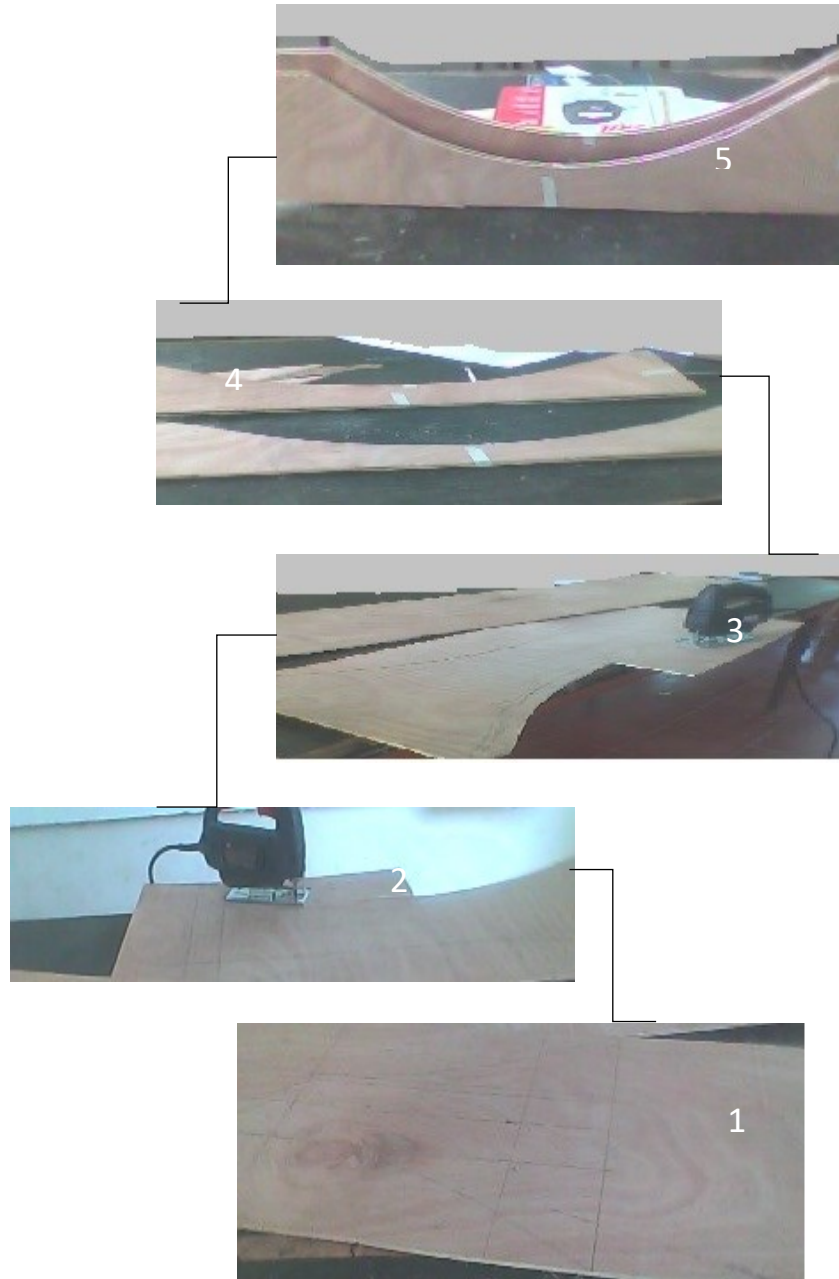
## CAPITULO V. PRESENTACION DE RESULTADOS

### 5.1. Construcción del concentrador cilíndrico – parabólico.

Se diseñó el canal parabólico y se procedió a construir el molde del CCP en playwood de tal manera que este se ajustó a las dimensiones obtenidas en el diseño realizado. Lo primero que se hizo fue ubicar el vértice (origen de coordenadas), luego con el molde hecho en cartulina se procedió a marcar la línea que tomaría la parábola en el playwood para hacer el corte; una vez hechos los trazos en el molde elegido se procedió con una sierra eléctrica de cortar madera, a hacer el corte por la línea marcada, para que de esta manera quedara simulada la parábola completa. En la figura 5.1, se muestra como se hicieron los cortes y también se muestra como quedo cortada la parábola real que utilizó para cortar los marcos metálicos con los que se construyó la estructura del CCP.

Para poder montar el concentrador fue necesario armar una estructura soporte que le diera la forma rígida. Se hizo una estructura metálica hecha con tubos galvanizados de 0.0127 m de diámetro, para darle solidez y rigidez al concentrador, con el molde hecho en playwood, se procedió a hacer la curvatura de las platinas para que se ajustaran a las dimensiones de la parábola diseñada, ay con esto se garantizó una mayor precisión en la construcción. En la figura 5.2, se muestra como fue armándose la estructura del concentrador.

Para simular el canal parabólico se compró una lámina lisa de aluminio, la cual tenía una longitud de acuerdo a las dimensiones del lado curvo así que no fue necesario hacerle corte. Después se procedió a montarla sobre la estructura metálica que se había construido. La lámina se fijó con remaches a la estructura para que quedara fija y no se moviera, en la figura 5.2, se muestra como se construyó el perfil del concentrador cilíndrico – parabólico.



*Figura 5.1.* Proceso seguido en el diseño de la superficie curva del concentrador cilíndrico parabólico. 1. Simulando la parábola en el playwood para cortar después a la medida del diseño realizado. 2 -3. Cortando el molde que simule la parábola. 4. Molde ya cortado. 5. Molde listo para utilizarlo en la construcción del concentrador cilíndrico – parabólico.



Figura 5.2. Proceso realizado en la construcción del concentrador cilíndrico parabólico. 1. Tubos galvanizados y platina cortados. 2. Equipo industrial para soldar las piezas metálicas. 3. Armando el molde del concentrador. 4. Soldando las piezas metálicas base del concentrador. 5. Armando la estructura del concentrador. 6. Estructura base del concentrador completamente armada. 7. Concentrador cilíndrico parabólico completamente construido.

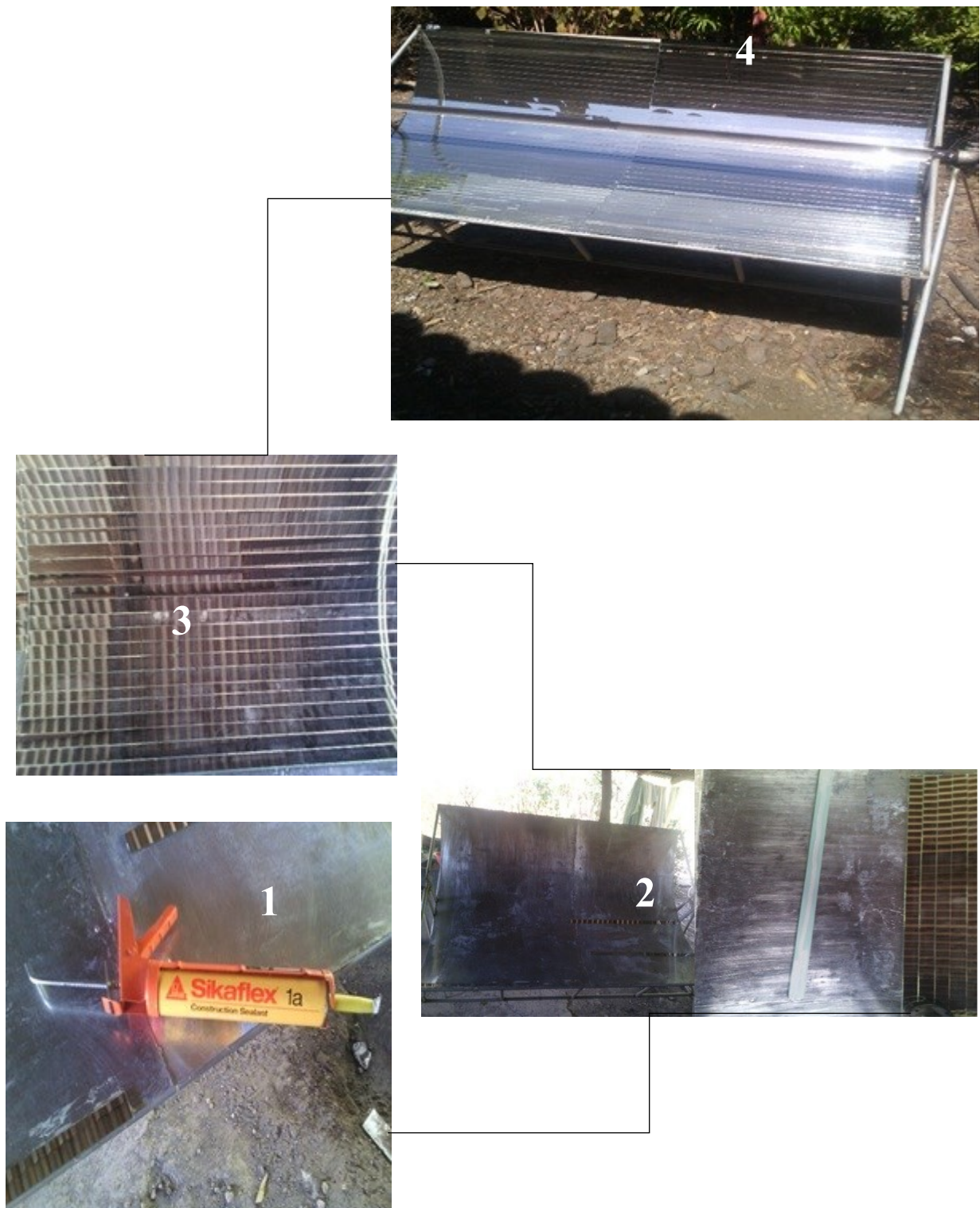


Figura 5.3. Construyendo la superficie reflectante del CCP. 1. Pegamento utilizado para pegar las tiras de espejo en la lámina. 2. Pegando los espejos en la lámina. 3. Como van quedando pegado los espejos en la lámina. 4. Reflector construido con toda la estructura que forma al concentrador cilíndrico parabólico.

Después de tener terminada toda la estructura del CCP, se procedió a construir la superficie reflectante, esta superficie estaría formada por delgadas tiras de espejo que se ajustarían a la curva de la parábola.

Para terminar la parte reflectante del concentrador se compró un espejo de las dimensiones del concentrador y se cortó en tiras delgadas para que se ajustaran a la curva de la parábola cada tira tuvo las siguientes medidas; 0.03 m de anchura y 0.98 m de longitud, por lo tanto para completar la superficie reflectante se pegaron estas tiras con un adhesivo resistente a la intemperie. En la figura 5.3, se muestra todo el procedimiento como se construyó la superficie reflectante del concentrador cilíndrico parabólico y el montaje del tubo receptor en la línea focal.

## **5.2. Construcción de la turbina de vapor–alternador.**

Para hacer la turbina fue necesario buscar un dispositivo que nos permitiera utilizar una parte de este como rueda giratoria (turbina) y la otra parte como masa giratoria (rotor) que contuviera el conjunto de espiras que girarían frente a los imanes (alternador), que generarían el campo magnético, necesario para hacer la autoinducción magnética con el cual se obtuvo la energía eléctrica.

Para hacer el conjunto turbina alternador en una sola pieza unida se desmontó una pulidora pequeña y se llevó a un taller industrial donde se le hizo un reajuste a ciertas piezas para que una parte quedara móvil y el resto quedara estático, de esta manera se podría hacer girar el rotor enfrente del campo magnético, los imanes estarían sostenidos por el estator que es la parte fija del conjunto turbina-alternador. En la figura 5.4, se observa como quedaron estructuradas las diferentes partes de la turbina-alternador; y en la figura 5.5, se observa todo el sistema turbina alternador completamente armado, con el acoplamiento del sistema de entrada del vapor a los alabes de la turbina.



Figura 5.4. .Partes de la turbina alternador.



Figura 5.5. Turbina alternador completamente armado y listo para ensayar la generación de electricidad.

### 5.3. Caracterización de la temperatura del tubo receptor sin fluido.

#### 5.3.1. Caracterización de la temperatura en el tubo receptor simple.

En la figura 5.6 se muestra el tubo receptor simple usado para captar la radiación solar proveniente del reflector. Este tubo tiene un diámetro de 0.0318 m.



*Figura 5.6.* Tubo receptor simple usado en CCP.

Se hicieron diversas mediciones para días totalmente soleados, días con poca nubosidad y días con mayor cantidad de nubes. Esto con el fin de ver el comportamiento de la temperatura en el tubo receptor.

Se midió la temperatura en tres puntos diferentes en la entrada  $T_B$ , en el punto medio  $T_C$  y en la salida  $T_A$ , con el objetivo de conocer como es la captación de radiación en el tubo receptor en dichos puntos.

El día 11 de Marzo de 2015 se realizó la primera medición de temperatura en un solo punto del tubo receptor obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.1.

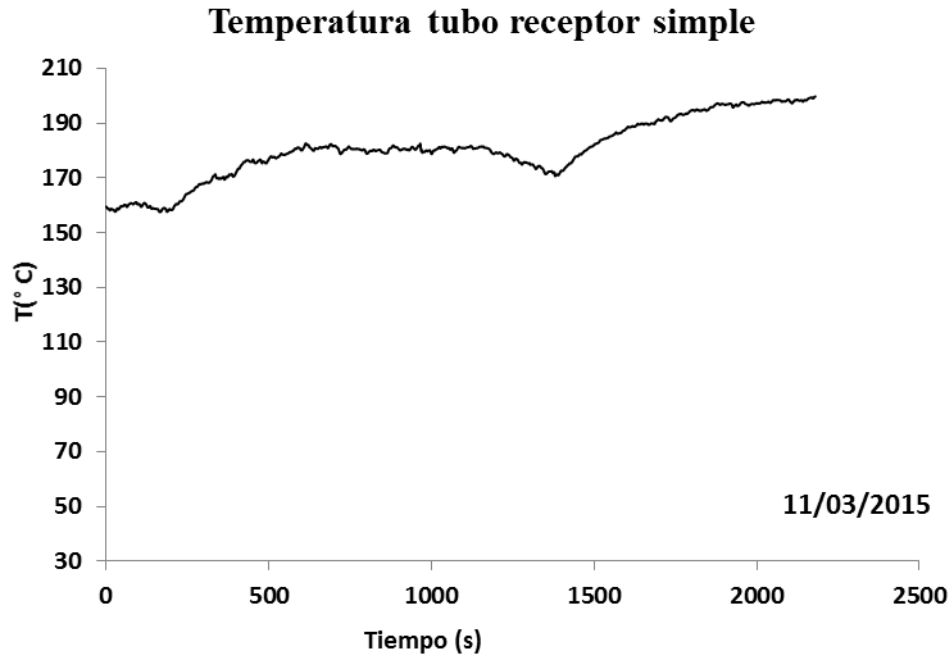


Gráfico 5.1. Medida de temperatura tubo receptor sin fluido para el día 11/3/2015.

En la primera prueba realizada el día 11 de Marzo de 2015, para la caracterización de la temperatura máxima, que alcanza el tubo receptor del CCP, se obtuvieron muy buenos resultados. Se midió una temperatura máxima de 199.70 °C y la temperatura promedio fue de 180.20 °C. Estos valores de temperatura son muy buenos, ya que en el interior del tubo si se tuviera agua, esta estaría totalmente en estado de vapor, y a una presión elevada. Por lo tanto tendríamos vapor para hacer procesos industriales, como la producción de energía eléctrica.

El día 01 de Julio de 2015 se realizó otra medición de temperatura en tres puntos diferentes del tubo receptor obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.2.

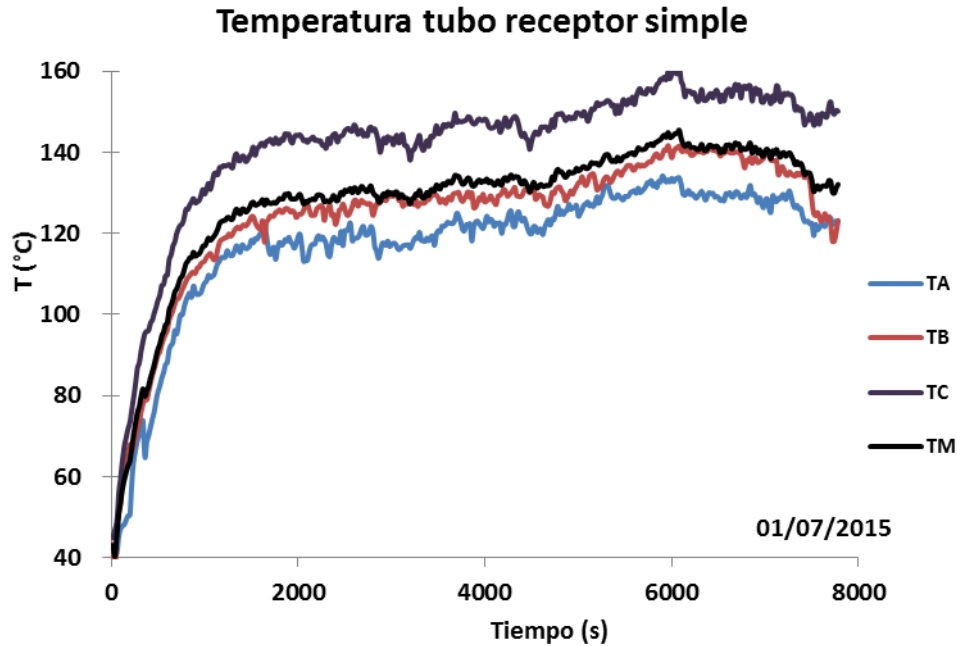


Gráfico 5.2. Temperatura tubo receptor simple sin fluido para el día 01/07/2015.

En el gráfico 5.2, se observa el incremento de la temperatura en el tubo receptor en función del tiempo, se puede ver que hay puntos donde la temperatura es mayor que en otros, las medidas del punto  $T_C$ , son las que muestran mayores valores de temperatura alcanzando ese día los  $161.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que la temperatura media (línea oscura) se mantuvo en los  $141.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Los puntos  $T_A$  y  $T_B$  muestran temperaturas por debajo de la alcanzada por el punto  $T_C$ , como se puede observar en el gráfico 5.2. Las diferencias en estos valores se deben a las imperfecciones en la superficie reflectante, ya que está constituida por delgadas tiras de espejos que se ajustaron a la superficie curva y debido a esto hay partes donde se concentra más radiación solar que en otros puntos del tubo receptor, esto explicaría porque la temperatura del tubo receptor no es uniforme. Durante la realización de este experimento el cielo estaba totalmente despejado, lo que nos indica que estaba llegando la máxima radiación posible y también el concentrador estaba ubicado frente al Sol, lo que permite captar la máxima cantidad de radiación posible. Lo único fue que en este experimento los brazaletes donde estaban ubicados los puntos de medición no estaban pintados de negro y posiblemente esto influyó en los valores de temperatura que se muestran en el gráfico 5.2., pero los valores obtenidos son suficientes para evaporar agua.

El día 03 de Julio de 2015 se realizó otra medición de temperatura en tres puntos diferentes del tubo receptor obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.3.

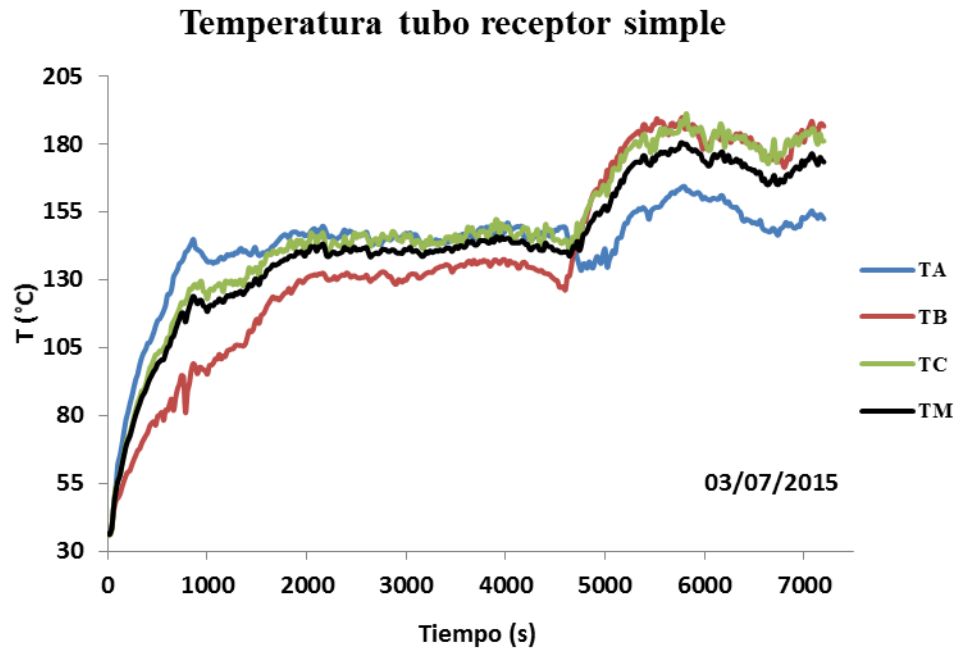


Gráfico 5.3. Temperatura en el tubo receptor simple sin fluido para el día 03/7/2015.

En el gráfico 5.3 se observan las mismas fluctuaciones de la temperatura, aunque se observa un poco más uniforme, después de una hora de medición se observa un incremento brusco de temperatura, esto se debió a que se hizo un pequeño reajuste en la ubicación del tubo receptor para que captase más radiación concentrada, producto de ello se puede ver en el gráfico 5.3 que se alcanzó una temperatura máxima de 191.00 °C, y después se tiene la estabilización nuevamente. La temperatura máxima promedio para ese día fue de 181.60 °C, y la temperatura promedio fue de 142.10°C. También en el gráfico se puede observar que se alcanzan los 100.00 °C de temperatura en unos 8 minutos de exposición del concentrador a la radiación solar.

El día 06 de Julio de 2015 se realizó otra medición de temperatura en tres puntos diferentes del tubo receptor obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.4.

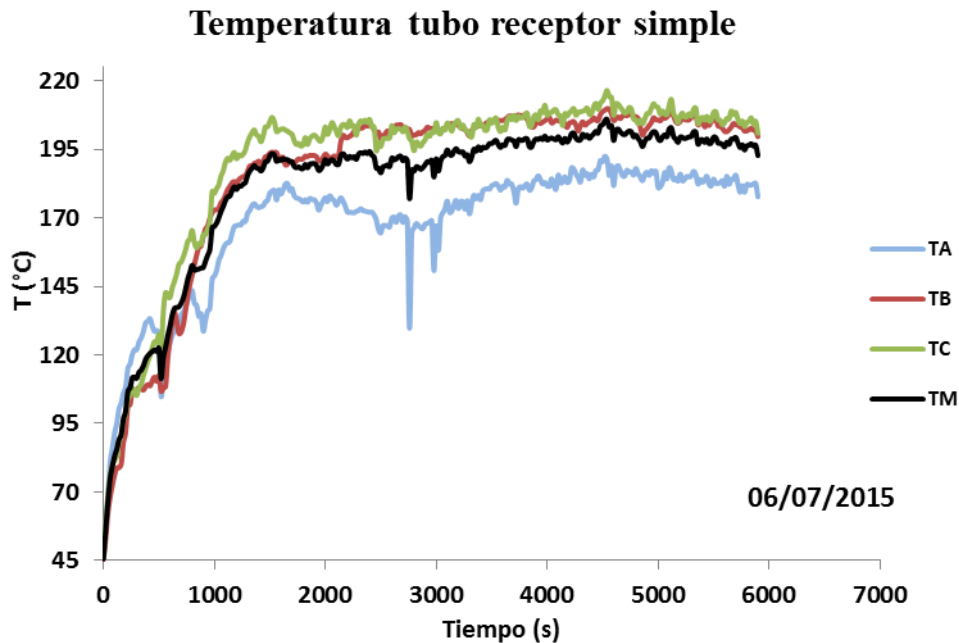


Gráfico 5.4. Temperatura tubo receptor simple sin fluido para el día 06/7/2015.

En el gráfico 5.4, se observa que la temperatura máxima del tubo receptor en el punto  $T_C$  llegó a los 216.50 °C, este cambio probablemente se dio porque antes de hacer esta prueba se volvió a pintar el tubo receptor y se le agregó una capa más de pintura y seguramente eso influyó a que el tubo absorbiera más radiación teniéndose como resultado un incremento en la temperatura. Se observa unas fluctuaciones de temperatura en el punto  $T_A$ , esto se fue porque el termopar se movió cuando se orientaba el concentrador en dirección del Sol, observándose unos pequeños decaimientos en la temperatura tal como se ve en el gráfico 5.4. La temperatura del punto  $T_B$  estuvo bastante cercana a la de  $T_C$  y solo  $T_A$  se mantuvo en valores menores, esto indica que la distribución de radiación en el tubo receptor no se dio de manera uniforme. La temperatura máxima promedio para este día fue de 206.30 °C. Teniéndose una temperatura promedio para todo el tubo de 194.10 °C. Como se observa para este día los valores de temperatura fueron los mejores que se pudieron obtener, esta es la máxima temperatura que se logró alcanzar con el concentrador cilíndrico - parabólico utilizando un solo tubo receptor.

### 5.3.2. Caracterización de la temperatura en el tubo receptor compuesto.

Se hicieron pruebas con un nuevo tubo receptor, el cual estaba compuesto por dos tubos más delgados que se colocaron en la línea focal del concentrador. En la figura 5.7, se muestra el tubo receptor compuesto usado para captar la radiación solar proveniente del reflector. Se utilizaron dos tubos galvanizados de 0.0254 m de diámetro.



*Figura 5.7.* Tubo receptor compuesto usado en el CCP.

El día 27 de Julio de 2015 se realizó la primera prueba de calentamiento del tubo receptor compuesto obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.5.

En el gráfico 5.5, se tienen los resultados para los diferentes puntos medidos, obteniéndose una temperatura máxima promedio de 167.20 °C, y la temperatura general promedio para todo el tubo receptor fue de 129.50 °C. Ese día el cielo se puso un poco nublado es por esta razón que se observa en el gráfico 5.5, que la temperatura comienza a descender después de estar como una hora expuesto a la radiación solar.

### Temperatura tubo receptor compuesto

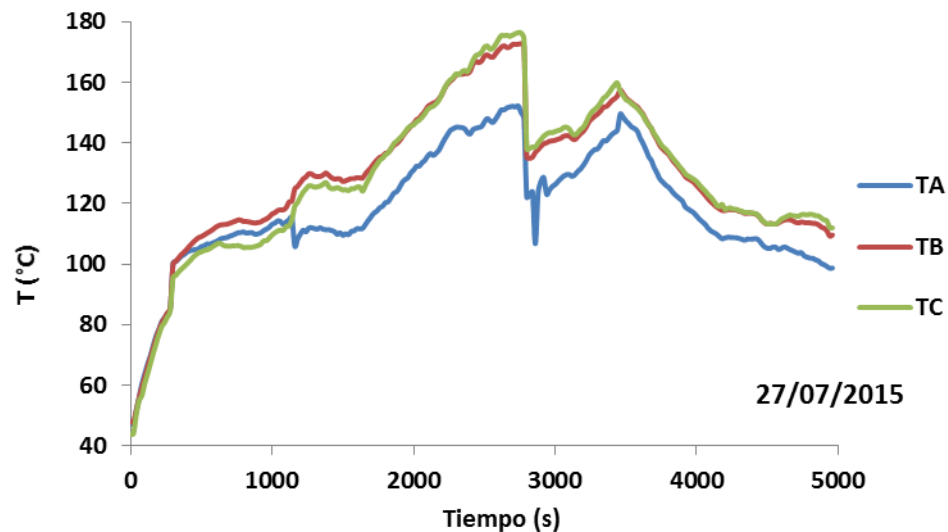


Gráfico 5.5. Temperatura tubo receptor compuesto sin fluido para el día 27/7/2015.

El día 28 de Julio de 2015 se realizó otra prueba de calentamiento del tubo receptor compuesto obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.6.

En el gráfico 5.6, también se tuvieron resultados similares que el gráfico 5.5, ya que este día el cielo también se nublo por eso se observa el descenso en la temperatura rápidamente después de cierto tiempo de exposición del concentrador a la radiación solar. La temperatura máxima promedio para este día fue de 157.20 °C y la temperatura promedio para todo el tubo receptor de 151.50 °C.

El día 29 de Julio de 2015 se realizó otra prueba de calentamiento del tubo receptor compuesto obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.7.

En el gráfico 5.7, se tiene una temperatura máxima de 209.30 °C, temperatura máxima promedio de 204.20 °C y una temperatura general promedio de 160.60 °C.

### Temperatura tubo receptor compuesto

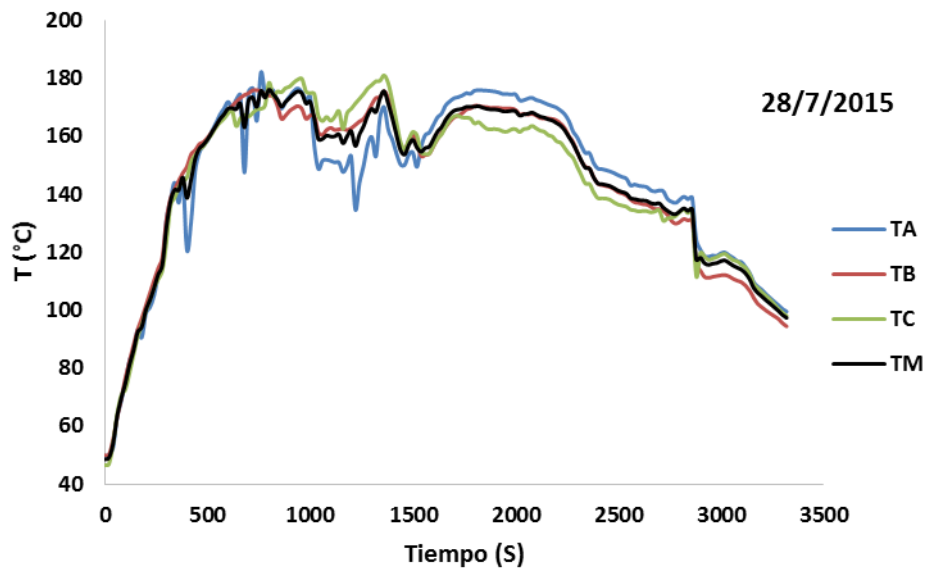


Gráfico 5.6. Medida de temperatura tubo receptor compuesto sin fluido para el día 27/7/2015.

### Temperatura tubo receptor compuesto

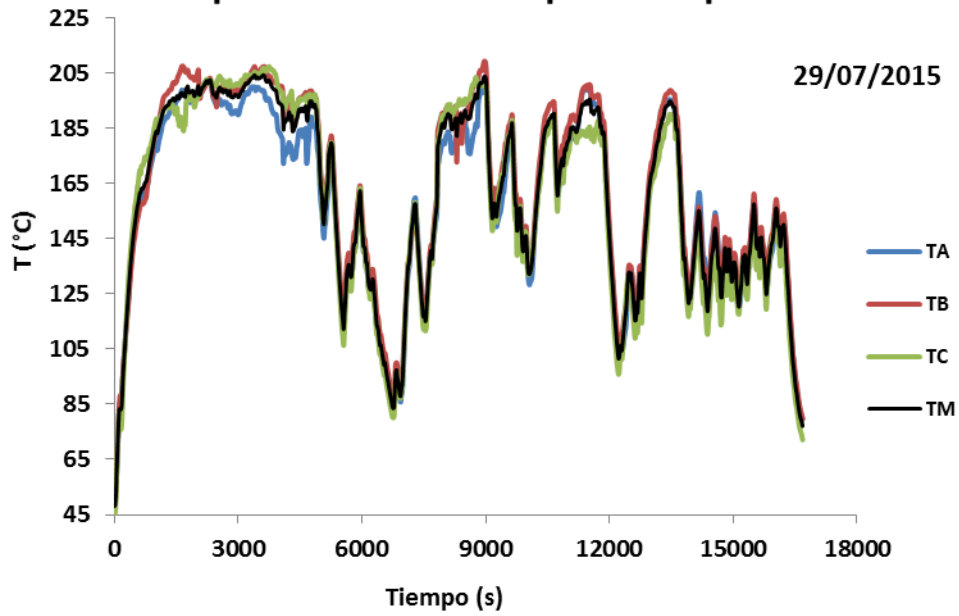


Gráfico 5.7. Temperatura tubo receptor compuesto sin fluido para el día 29/7/2015.

El día 04 de Agosto de 2015 se realizó otra prueba de calentamiento del tubo receptor compuesto obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.8.

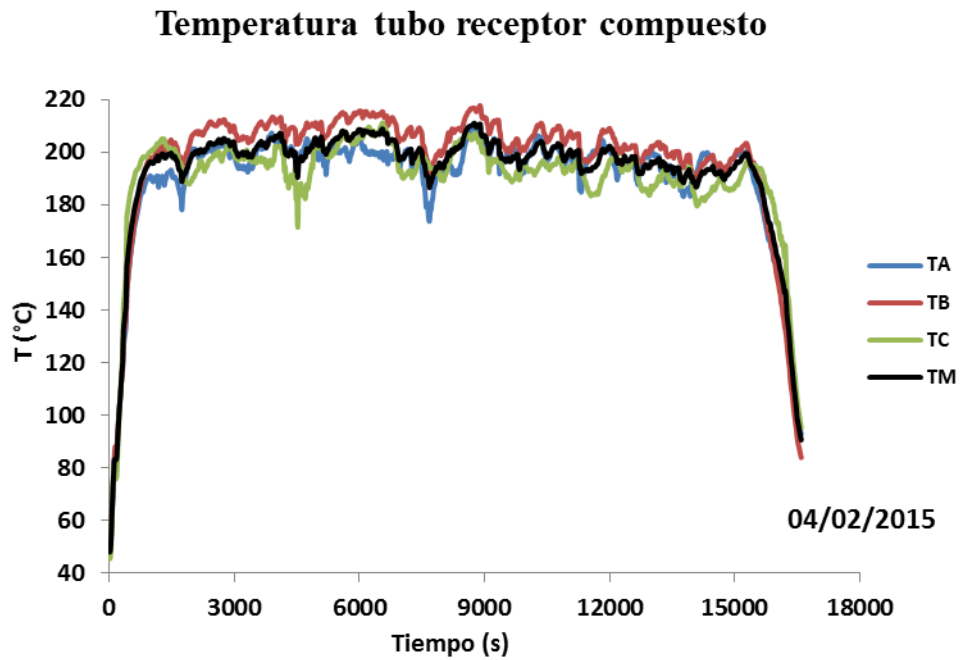


Gráfico 5.8. Medida de temperatura tubo receptor compuesto sin fluido para el día 04/8/2015.

En el gráfico 5.8, se tienen una temperatura máxima de 217.60 °C, esta es la máxima temperatura que se midió para el concentrador con los dos tubos receptores que se utilizaron. La temperatura máxima promedio fue de: 212.90 °C y la temperatura general promedio fue de: 195.70 °C.

## 5.4. Caracterización de la temperatura en el tubo receptor con fluido.

### 5.4.1. Tubo receptor simple.

Después de hacer las mediciones sin fluido, ahora el tubo se llenó con agua y se cerraron las válvulas para ver cuál era el comportamiento que tendría la temperatura, así como también cual sería la temperatura máxima que alcanzaría el tubo, así como también el tiempo que se tarda en alcanzar la temperatura de ebullición, esto es importante ya que ahora el calor absorbido por el tubo está siendo transferido al agua.

La primera prueba se realizó el 03 de Julio de 2015, obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.9.

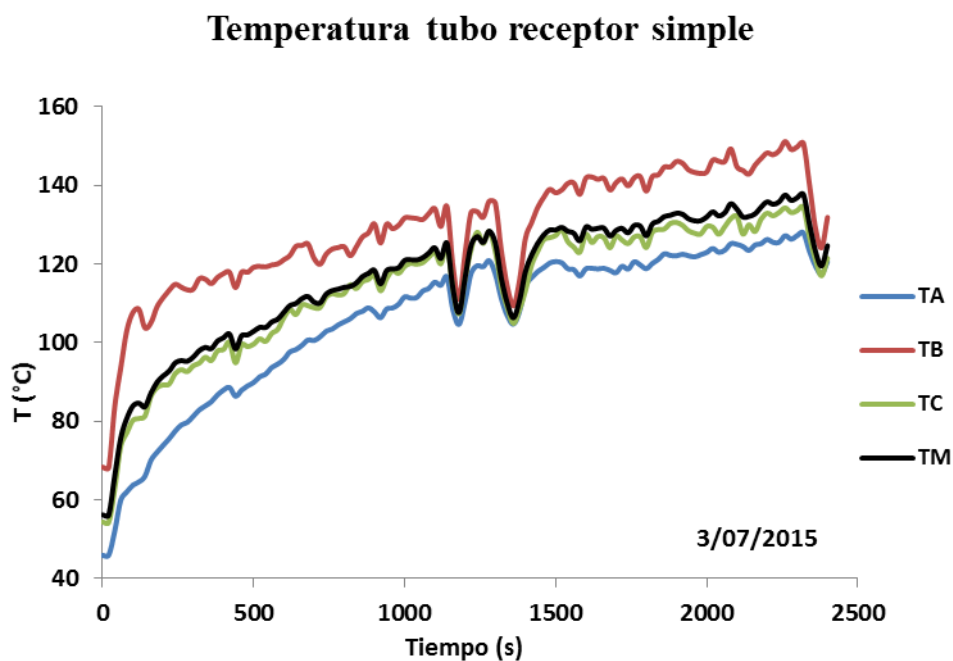


Gráfico 5.9. Temperatura tubo receptor simple con fluido estacionario para el día 03/7/2015.

El gráfico 5.9, presenta el comportamiento de la temperatura en función del tiempo en el tubo receptor con fluido estacionario, la línea oscura representa la temperatura promedio del tubo, como se puede observar en dicho gráfico que en 8 minutos el agua en el interior está en el punto de ebullición. Alcanzando finalmente una temperatura máxima de 137.00 °C en promedio, aunque el punto  $T_B$  alcanzo los 150.00 °C.

El día 4 de Julio de 2015 se realizó otra prueba obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.10.

### Temperatura tubo receptor simple

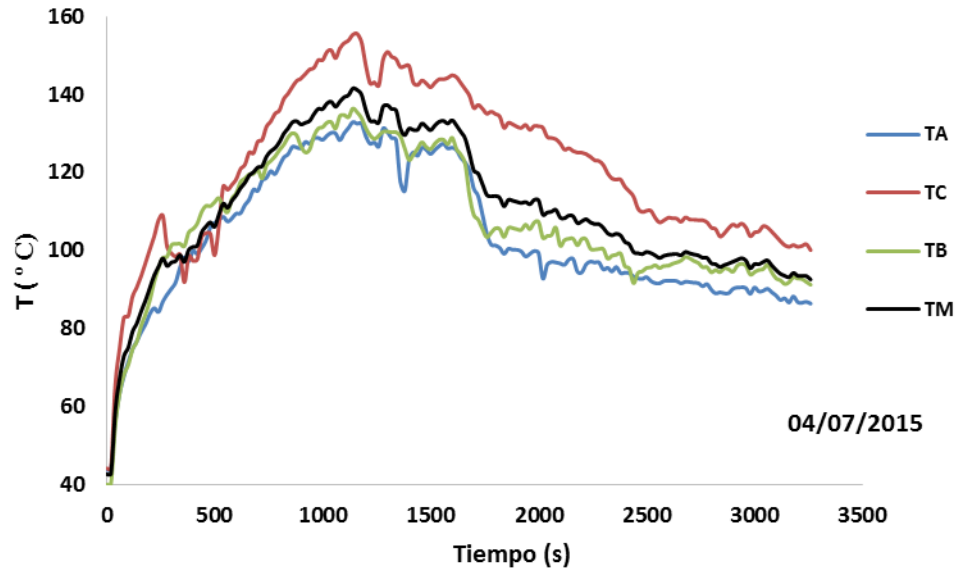


Gráfico 5.10. Temperatura tubo receptor simple con fluido estacionario para el día 04/7/2015.

En el gráfico 5.10; se observa el mismo comportamiento de la temperatura que en el gráfico 5.9, con la única diferencia que la tendencia de temperatura en los tres puntos es más cercana. También el punto de ebullición del agua se alcanzó en 6 minutos aproximadamente. Alcanzando una temperatura máxima promedio de 141.60 °C, y la temperatura promedio total fue de 126.80 °C. Después se observa que la temperatura del agua comienza a descender esto fue por la presencia de nubes, observándose que la temperatura descendió hasta los 100.00 °C.

### 5.4.2. Tubo receptor compuesto.

El día 2 de Agosto de 2015, se realizó una prueba de calentamiento de agua en el tubo receptor compuesto obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.11.

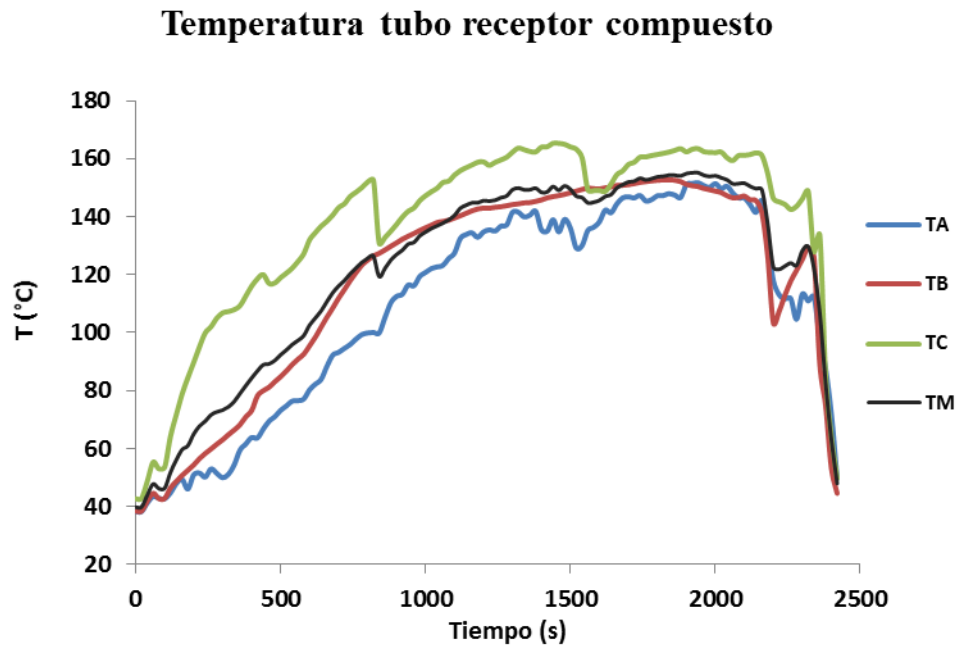


Gráfico 5.11. Temperatura tubo receptor compuesto con fluido estacionario para el día 02/8/2015.

El día 5 de Agosto de 2015, se realizó otra prueba de calentamiento de agua en el tubo receptor obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.12.

En los gráficos 5.11 y 5.12, se muestran los resultados de temperatura del fluido estacionario en el tubo receptor compuesto, los valores de temperatura obtenidos son similares. En el gráfico 5.11 se tiene que la temperatura máxima promedio fue de 156.60 °C, y una temperatura promedio de 145.70 °C. En el gráfico 5.12 se tiene que la temperatura máxima fue de 170.00 °C, y una temperatura promedio de 146.40 °C.

## Temperatura tubo receptor compuesto

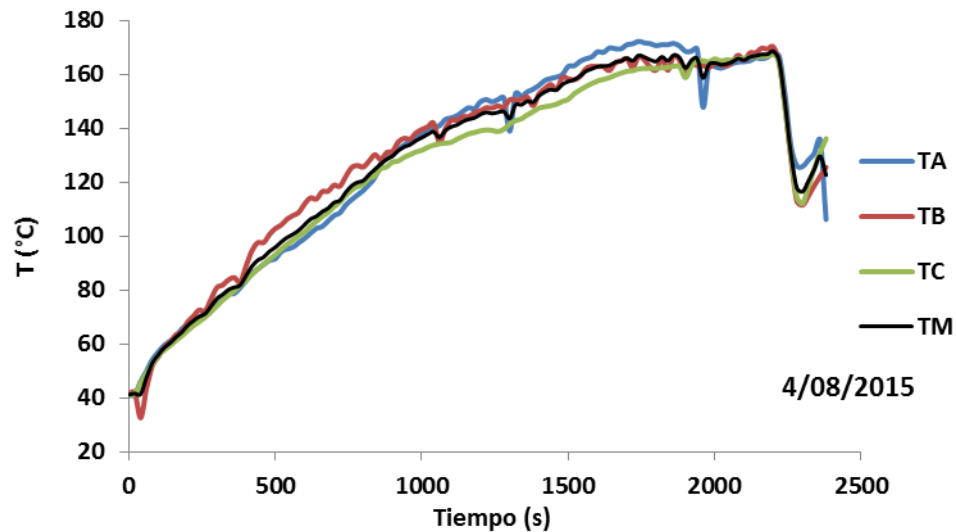


Gráfico 5.12. Temperatura tubo receptor compuesto con fluido estacionario para el día 04/08/2015.

### 5.5. Eficiencia óptica del concentrador cilíndrico-parabólico.

Para determinar la eficiencia óptica se expuso el concentrador frente a la radiación solar y se hizo circular agua por el tubo receptor, el agua absorbió el calor recibido en el tubo receptor esto hizo que la temperatura del agua cambiará, esta variación dependió de los componentes que el concentrador tiene, así como también que tan eficientes son en la reflectancia y captación de la radiación. Por lo tanto, la eficiencia óptica da un valor que indica, el porcentaje de radiación que en realidad es absorbido por el tubo receptor y que se transforma en energía térmica. El fluido entró al tubo receptor a una temperatura inferior a la temperatura ambiente y salió por el otro extremo con una temperatura más elevada. Se midió el flujo másico que estaba circulando por el tubo para saber cuál es la cantidad de masa que circuló por unidad de tiempo, esto para poder obtener el valor de la potencia absorbida. Solo se hicieron pruebas de eficiencia óptica utilizando el tubo receptor simple.

El 17 de Julio de 2015, se hizo la prueba de eficiencia óptica del CCP obteniendo los resultados mostrados en el gráfico 5.13.

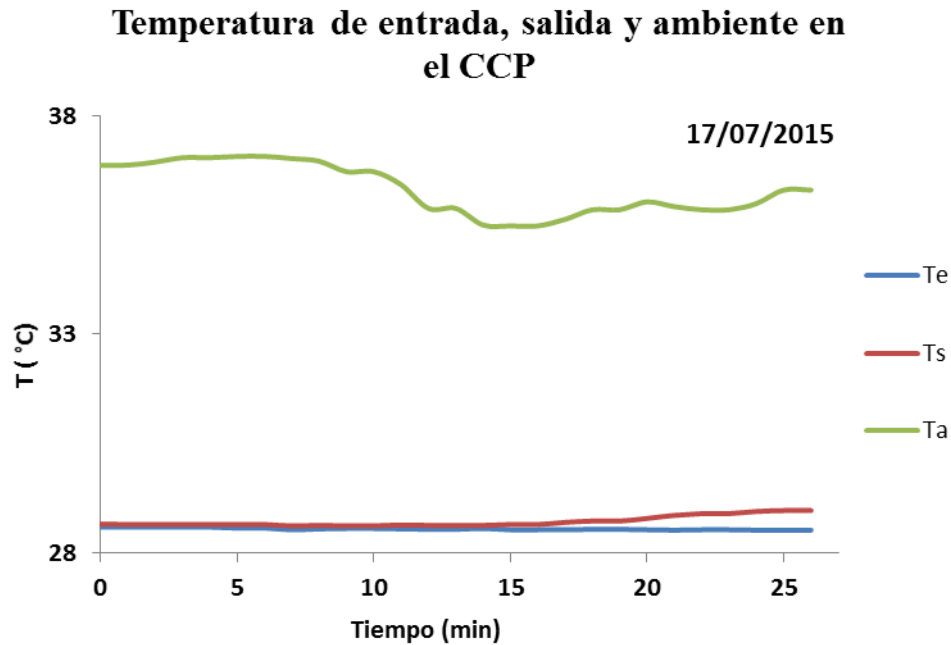


Gráfico 5.13. Determinación de la eficiencia óptica del CCP para el día 17/7/2015.

**Tabla 5.1.**

Variables para determinar la eficiencia óptica del CCP el 17/7/2015.

Variables	Valores medidos
Temperatura de entrada (°C)	28.55
Temperatura de salida (°C)	28.72
Temperatura ambiente (°C)	36.32
Flujo másico (kg/seg)	0.27
Calor específico del fluido (J/kg*°C)	4190
Área del tubo absorbente (m <sup>2</sup> )	0.26
Área de abertura del CCP (m <sup>2</sup> )	2.35
Constante solar (I), (Watt/m <sup>2</sup> )	1000

Con los datos de la tabla 5.1, y utilizando la ecuación 2.12, es posible determinar la eficiencia óptica que tiene el concentrador así:

$$\eta_{op} = \frac{\dot{m} \times C \times (T_s - T_e)}{E_s \times A_{tr}} = \frac{0.27 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{C}} \times (28.72 \text{ }^\circ\text{C} - 28.55 \text{ }^\circ\text{C})}{1000 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \times 0.26 \text{m}^2}$$

Haciendo los cálculos respectivos nos queda una eficiencia óptica del concentrador de:

$$\eta_{op} = 0.74$$

El día 19 de Julio de 2015 se realizó otra prueba para determinar la eficiencia óptica, obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.14.

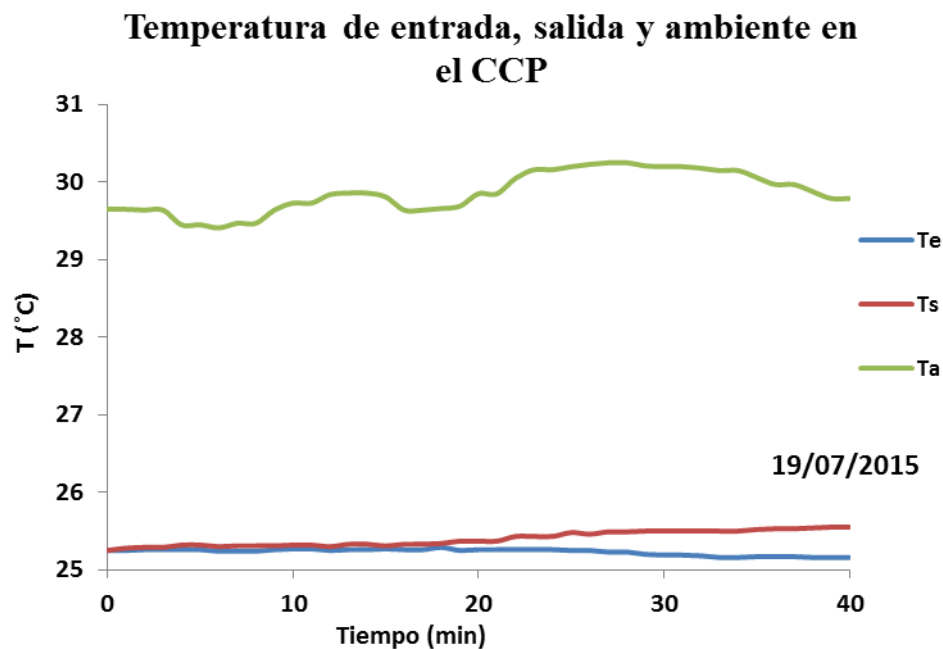


Gráfico 5.14. Determinación de la eficiencia óptica del CCP para el día 19 de Julio de 2015.

Con los datos de la tabla 5.2, y utilizando la ecuación 2.12, es posible determinar la eficiencia óptica que tiene el concentrador así:

$$\eta_{op} = \frac{\dot{m} \times C \times (T_s - T_e)}{E_s \times A_{tr}} = \frac{0.27 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{C}} \times (25.40 \text{ }^\circ\text{C} - 25.23 \text{ }^\circ\text{C})}{1000 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \times 0.26 \text{m}^2}$$

Haciendo los cálculos respectivos nos queda una eficiencia óptica del concentrador de:

$$\eta_{op} = 0.74$$

**Tabla 5.2.**

Variables para determinar la eficiencia óptica del CCP el 19/7/2015.

Variables	Valores medidos
Temperatura de entrada (°C)	25.23
Temperatura de salida (°C)	25.40
Temperatura ambiente (°C)	29.87
Flujo másico (kg/seg)	0.27
Calor específico del fluido (J/kg*C°)	4190
Área del tubo absorbente (m <sup>2</sup> )	0.26
Área de abertura del CCP (m <sup>2</sup> )	2.35
Constante solar (I), (Watt/m <sup>2</sup> )	1000

El día 24 de Julio de 2015 se realizó otra prueba de eficiencia óptica del concentrador, obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.15.

Con los datos de la tabla 5.3 y utilizando la ecuación 2.12, es posible determinar la eficiencia óptica que tiene el concentrador así:

$$\eta_{op} = \frac{\dot{m} \times C \times (T_s - T_e)}{E_s \times A_{tr}} = \frac{0.27 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{C}^\circ} \times (29.90 \text{ }^\circ\text{C} - 29.73 \text{ }^\circ\text{C})}{1000 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \times 0.26 \text{m}^2}$$

Haciendo los cálculos respectivos nos queda una eficiencia óptica del concentrador de:

$$\eta_{op} = 0.74$$

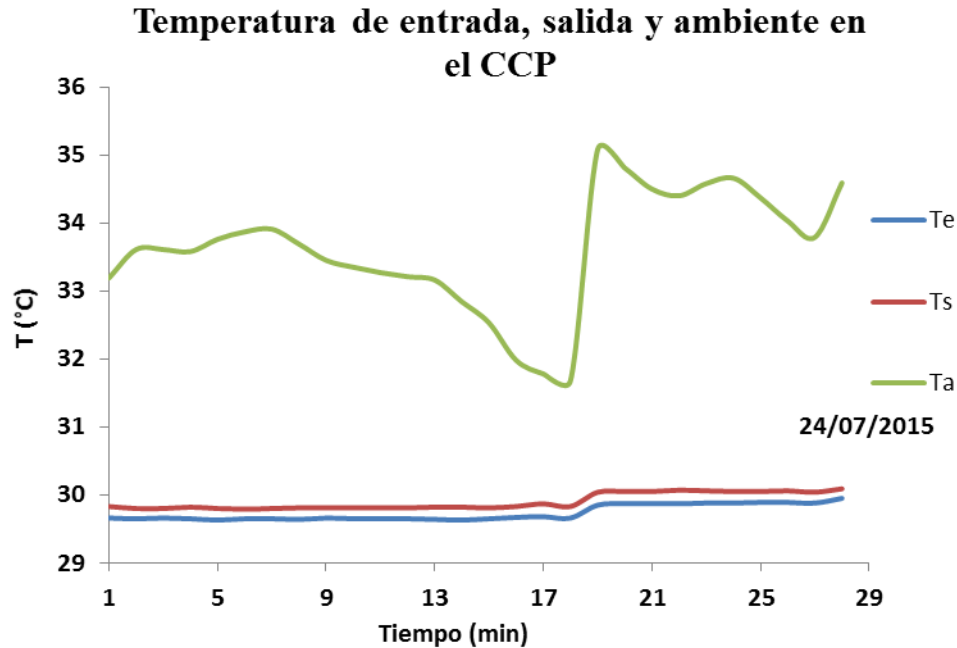


Gráfico 5.15. Determinación eficiencia óptica CCP para el día 24/7/2015.

**Tabla 5.3.**

Variables para determinar la eficiencia óptica del CCP el 24/7/2015.

Variables	Valores medidos
Temperatura de entrada (°C)	29.73
Temperatura de salida (°C)	29.90
Temperatura ambiente (°C)	33.62
Flujo másico (kg/seg)	0.27
Calor específico del fluido (J/kg*C°)	4190
Área del tubo absorbente (m <sup>2</sup> )	0.26
Área de abertura del CCP (m <sup>2</sup> )	2.35
Constante solar (I), (W/m <sup>2</sup> )	1000

La última prueba se realizó el día 30 de Julio de 2015 obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.16.

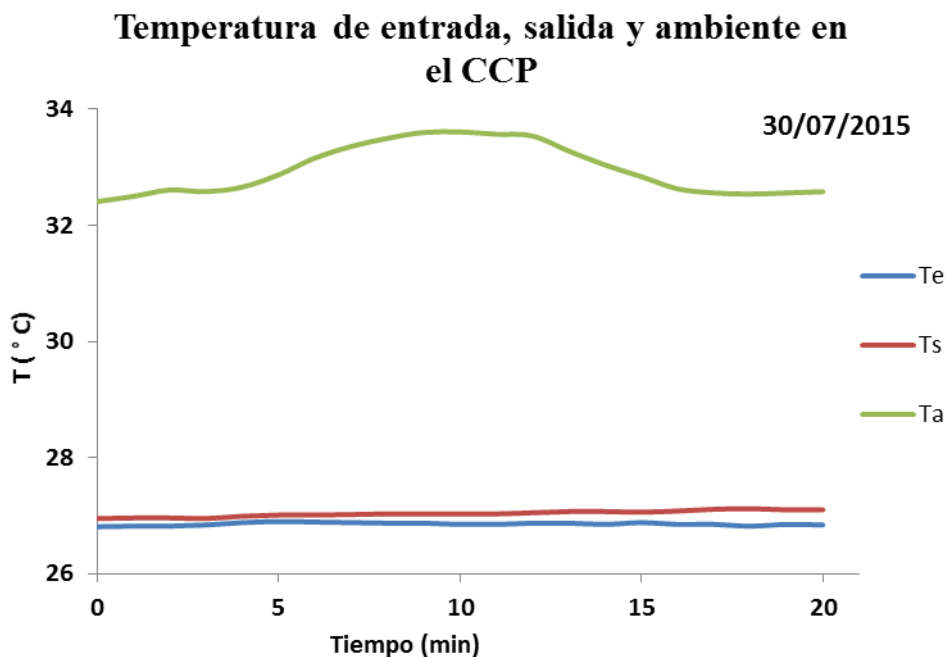


Gráfico 5.16. Determinación eficiencia óptica CCP para el día 30/7/2015.

**Tabla 5.4.**

Variables para determinar la eficiencia óptica del CCP el 30/7/2015.

Variabes	Valores medidos
Temperatura de entrada (°C)	26.86
Temperatura de salida (°C)	27.03
Temperatura ambiente (°C)	33.07
Flujo másico (kg/seg)	0.27
Calor específico del fluido (J/kg*°C)	4190
Área del tubo absorbente (m <sup>2</sup> )	0.26
Área de abertura del CCP (m <sup>2</sup> )	2.35
Constante solar (I), (Watt/m <sup>2</sup> )	1000

Con los datos de la tabla 5.4 y utilizando la ecuación 2.12, es posible determinar la eficiencia óptica que tiene el concentrador, así:

$$\eta_{op} = \frac{\dot{m} \times C \times (T_s - T_e)}{E_s \times A_{tr}} = \frac{0.27 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \times (27.03 \text{ °C} - 26.86 \text{ °C})}{1000 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \times 0.26 \text{ m}^2}$$

Haciendo los cálculos respectivos nos queda una eficiencia óptica del concentrador de:

$$\eta_{op} = 0.74$$

En los gráficos 5.13, 5.14, 5.15, y 5.16, se presentan los resultados obtenidos para la eficiencia óptica y las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4, tienen el resumen de toda las variables y la información necesaria para determinar la eficiencia óptica. En todas las pruebas realizadas, la captación de energía radiante en el tubo receptor tuvo una eficiencia óptica de 0.74; es decir un porcentaje de 74%.

El concentrador diseñado y construido tiene una muy buena eficiencia óptica, es decir que del 100% de energía radiante que está llegando a la superficie del concentrador, todo los componentes que tiene el CCP (superficie reflectante y tubo receptor), son capaces de recibir un 74% de esta energía, solo un 26% se pierde, en resumen estas pérdidas se deben a las imperfecciones en la superficie reflectante, perdidas geométricas y térmicas, ya que los componentes no pueden reflejar ni absorber la totalidad de la radiación incidente, sino solo una fracción de esta energía.

## **5.6. Eficiencia térmica del concentrador cilíndrico-parabólico.**

Para determinar la eficiencia térmica, se expuso el concentrador a la radiación solar y se hizo circular agua por el tubo receptor, el agua absorbió el calor recibido en el tubo receptor, elevando considerablemente su temperatura, por lo tanto, a la salida el fluido tuvo una temperatura muy superior que la que tenía en la entrada. Estos cambios de temperatura sirven para determinar la eficiencia térmica global del concentrador, el cual da un valor que indica el porcentaje de radiación solar que se está convirtiendo en energía térmica. Esta energía transformada es la que se puede utilizar en procesos industriales para obtener energía eléctrica. Solo se hicieron pruebas de eficiencia térmica global utilizando el tubo receptor simple

El 06 de Julio de 2015, se hizo la primera prueba de eficiencia térmica, obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.17.

### Temperatura de entrada, salida y ambiente en el CCP

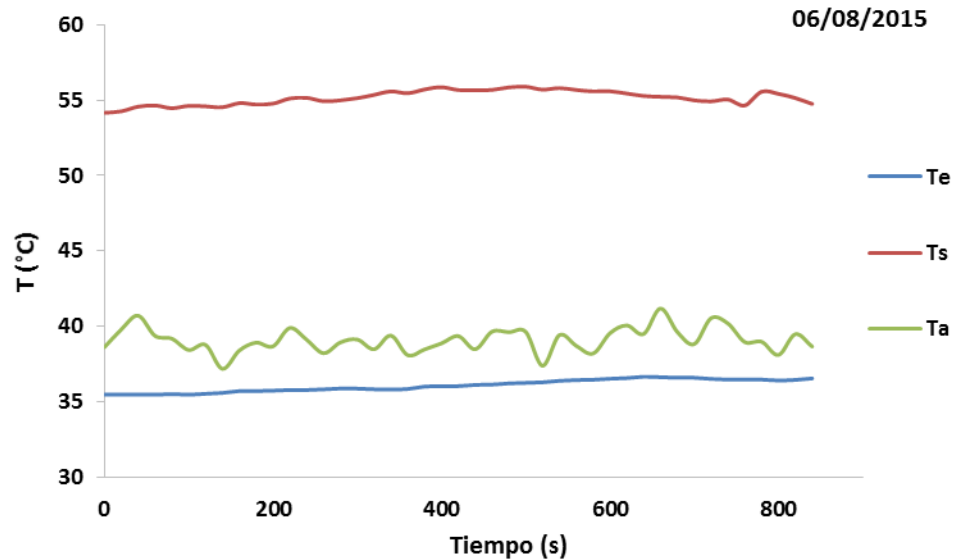


Gráfico 5.17. Determinación eficiencia térmica global del concentrador para el día 06/7/2015.

**Tabla 5.5.**

Variables para determinar la eficiencia térmica global del CCP el 06/7/2015.

Variables	Valores medidos
Temperatura de entrada (°C)	36.09
Temperatura de salida (°C)	55.16
Temperatura ambiente (°C)	39.11
Flujo másico (kg/seg)	0.009
Calor específico del fluido (J/kg*°C)	4190
Eficiencia óptica	0.74
Área de abertura (m <sup>2</sup> )	2.35
Constante solar (I), (Watt/m <sup>2</sup> )	1000

Con los datos de la tabla 5.5 y utilizando la ecuación 2.20, es posible determinar la eficiencia térmica global que tiene el concentrador, así:

$$\eta_t = \frac{0.009 \frac{kg}{s} \times 4190 \frac{J}{kg \times C^\circ} (55.16^\circ C - 36.09^\circ C)}{1000 \frac{Watt}{m^2} \times 2.35 m^2 \times 0.74}$$

Haciendo los cálculos respectivos nos queda una eficiencia térmica global del concentrador de:

$$\eta_t = 0.41 = 41\%$$

En el gráfico 5.17, se presentan los resultados de la prueba realizada para determinar la eficiencia térmica y la tabla 5.5 está el resumen de las variables necesarias para determinar este valor. Con toda la información recopilada ese día se obtuvo una eficiencia térmica global del concentrador de un 41 %.

El día que se tomaron los datos se tuvo la presencia de viento constante y esta variable climática probablemente afectó la eficiencia del concentrador porque el cielo estaba totalmente despejado. Al final del experimento de ese día se tuvo la presencia de viento fuerte, lo cual pudo influir en el resultado final de las pruebas realizadas.

El 12 de Julio de 2015, se hizo otra prueba de eficiencia térmica, obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.18.

Con los datos de la tabla 5.6 y utilizando la ecuación 2.20, es posible determinar la eficiencia térmica global que tiene el concentrador, así:

$$\eta_t = \frac{0.011 \frac{kg}{s} \times 4190 \frac{J}{kg \times C^\circ} (51.74^\circ C - 32.32^\circ C)}{1000 \frac{Watt}{m^2} \times 2.35 m^2 \times 0.74}$$

Haciendo los cálculos respectivos nos queda una eficiencia térmica del concentrador de:

$$\eta_t = 0.51 = 51\%$$

En el gráfico 5.18 y la tabla 5.6 se presentan los resultados obtenidos en la prueba. Con la información recopilada se obtuvo una eficiencia térmica global del concentrador de un 51 %.

Ese día se tuvo la presencia de vientos leves y esto influyó a que se tuviera una eficiencia térmica global mayor que anteriormente, ya que las pérdidas térmicas por convección fueron menores.

### Temperatura de entrada, salida y ambiente en el CCP

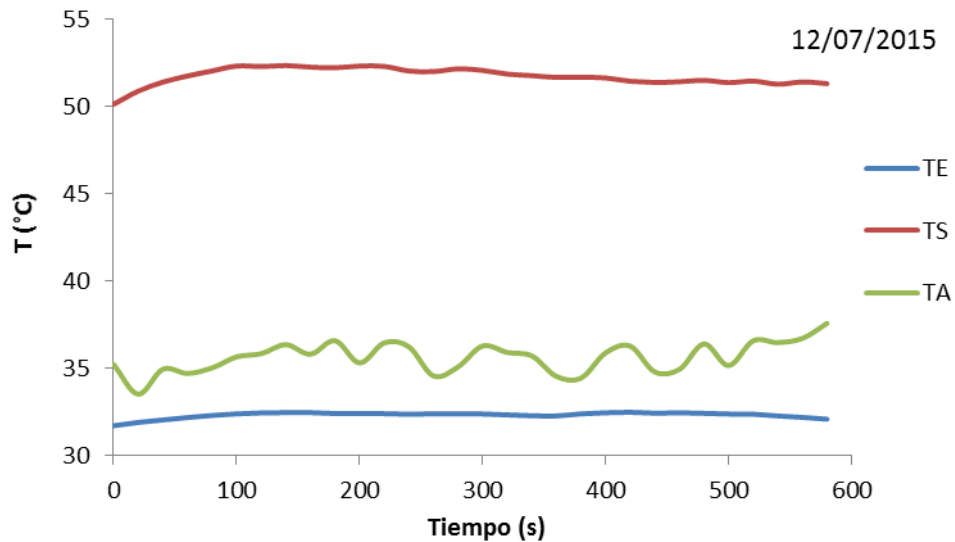


Gráfico 5.18. Determinación eficiencia térmica global del concentrador para el día 12/7/2015.

**Tabla 5.6.**

Variables para determinar la eficiencia térmica global del CCP el 12/7/2015.

Variables	Valores medidos
Temperatura de entrada (°C)	32.32
Temperatura de salida (°C)	51.74
Temperatura ambiente (°C)	35.64
Flujo másico (kg/seg)	0.011
Calor específico del fluido (J/kg*C°)	4190
Eficiencia óptica	0.74
Área de abertura (m <sup>2</sup> )	2.35
Constante solar (I), (Watt/m <sup>2</sup> )	1000

El 15 de Julio de 2015, se hizo otra prueba de eficiencia térmica, obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.19.

### Temperatura de entrada y salida en el CCP

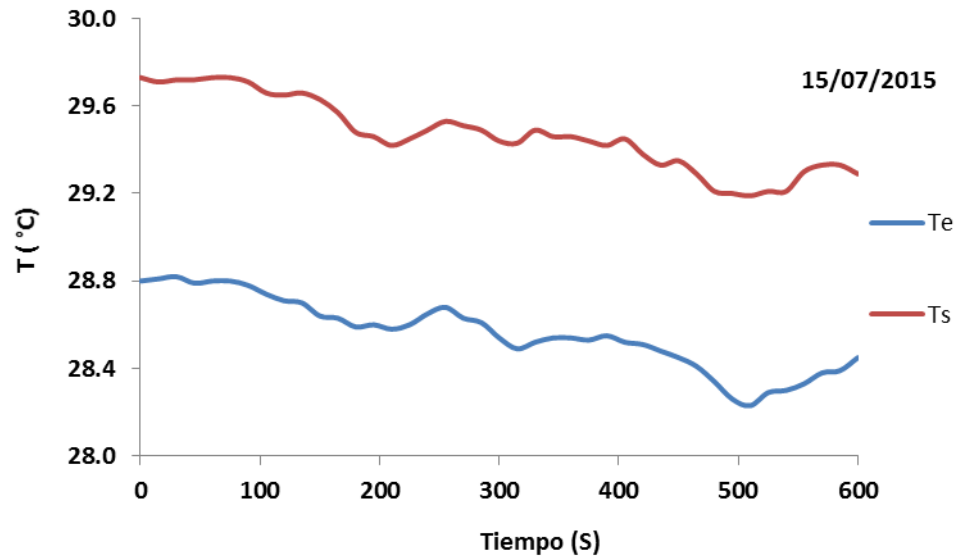


Gráfico 5.19. Determinación eficiencia térmica global del concentrador para el día 15/7/2015.

**Tabla 5.7.**

Variables para determinar la eficiencia térmica global del CCP el 15/7/2015.

Variables	Valores medidos
Temperatura de entrada (°C)	28.56
Temperatura de salida (°C)	29.47
Flujo másico (kg/seg)	0.27
Calor específico del fluido (J/kg*°C)	4190
Eficiencia óptica	0.74
Área de abertura (m <sup>2</sup> )	2.35
Constante solar (I), (Watt/m <sup>2</sup> )	1000

Con los datos de la tabla 5.7 y utilizando la ecuación 2.7, es posible determinar la eficiencia térmica global que tiene el concentrador, así:

$$\eta_t = \frac{0.27 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \times \text{C}^\circ} (29.47^\circ\text{C} - 28.56^\circ\text{C})}{1000 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \times 2.35 \text{m}^2 \times 0.74}$$

Haciendo los cálculos respectivos nos queda una eficiencia térmica global del concentrador de:

$$\eta_t = 0.59 = 59\%$$

En el gráfico 5.19 y la tabla 5.19, se presentan los resultados obtenidos en la prueba. Con toda la información recopilada se obtuvo una eficiencia térmica global del concentrador de 0.59, o 59%.

Este día se tuvieron condiciones climáticas óptimas, cielo totalmente despejado sin presencia de viento y por se obtuvo una muy buena eficiencia global térmica del concentrador.

El 25 de julio de 2015 se realizó la última prueba de eficiencia térmica obteniendo los resultados mostrados en el gráfico 5.20.

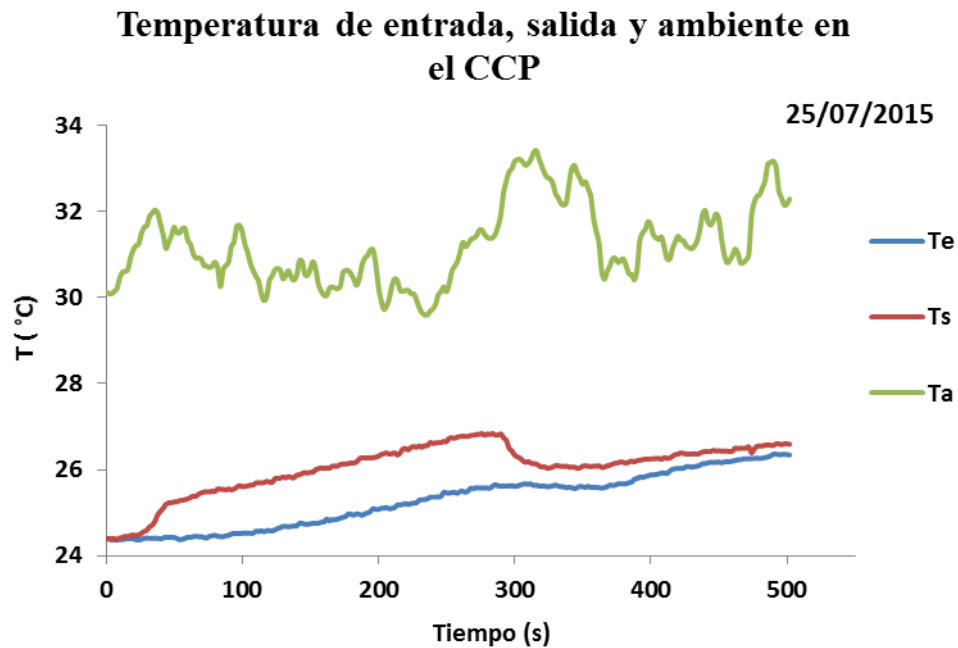


Gráfico 5.20. Determinación de la eficiencia térmica global del concentrador para el día 25/7/2015.

**Tabla 5.8.**

Variables para determinar la eficiencia térmica global del CCP el 25/7/2015.

<b>Variables</b>	<b>Valores medidos</b>
Temperatura de entrada (°C)	25.36
Temperatura de salida (°C)	26.17
Flujo másico (kg/seg)	0.27
Calor específico del fluido (J/kg*°C)	4190
Eficiencia óptica	0.74
Área de abertura (m <sup>2</sup> )	2.35
Constante solar (I), (Watt/m <sup>2</sup> )	1000

Con los datos de la tabla 5.8 y utilizando la ecuación 2.20, es posible determinar la eficiencia térmica global que tiene el concentrador, así:

$$\eta_t = \frac{0.27 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \times \text{C}^\circ} (26.17^\circ\text{C} - 25.36^\circ\text{C})}{1000 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \times 2.35 \text{m}^2 \times 0.74}$$

Haciendo los cálculos respectivos nos queda una eficiencia térmica del concentrador de:

$$\eta_t = 0.53 = 53\%$$

En el gráfico 5.20 y tabla 5.8, se presentan los resultados obtenidos en la prueba. Con toda la información recopilada se obtuvo una eficiencia térmica global del concentrador de un 53%.

En todas las pruebas realizadas no se obtuvieron valores iguales y esto es debido a que las condiciones climáticas cambian día a día, pero se observa que todos los valores están en un rango bastante cercano entre 50% y 60% solo un valor nos dio en el rango del 40% a 50%, y esto se debió a la presencia del viento que afectó bastante la transformación de energía radiante en energía térmica, ya que provoca pérdidas térmicas por convección. La eficiencia térmica global del CCP presenta valores que está en un rango normal, obteniéndose muy buena transformación de energía solar en energía térmica.

Este concentrador a pesar de haber sido construido de manera artesanal, presento muy buena eficiencia térmica global, a pesar que las condiciones climáticas afectan la transformación

de energía térmica, así como también las pérdidas térmicas que se producen en el tubo receptor, conducción, convección y radiación. También la falta de instrumentos para medir el comportamiento de otras variables en tiempo real necesarias para determinar este valor, tal como la constante solar y el flujo másico.

## 5.7. Comparación estadística de la temperatura del tubo receptor con fluido estacionario.

El experimento realizado con la medida de la temperatura en el tubo receptor con fluido estacionario en este trabajo de investigación cumple con las características de un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA), por lo que la prueba estadística elegida fue el análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo.

Luego, para aplicar la prueba estadística elegida se asumió que las variables de temperaturas medidas en los puntos A, B y C de los tubos receptores poseen varianzas homogéneas y siguen una distribución normal, con un nivel de confianza  $\alpha = 0.05$ . Los criterios para la interpretación de los resultados obtenidos de la prueba estadística fueron:

Criterio 1: Usando la probabilidad

- Existe diferencia significativa cuando la probabilidad es menor que el nivel de confianza  $\alpha = 0.05$ .
- No existe diferencia significativa cuando la probabilidad es mayor que el nivel de confianza  $\alpha = 0.05$ .

Criterio 2: Usando el valor de F

- Existe diferencia significativa cuando el parámetro F es mayor que el valor crítico.
- No existe diferencia significativa cuando el parámetro F es menor que el valor crítico.

### 5.7.1. Comparación estadística de la temperatura del tubo receptor simple.

**Tabla 5.9.**

Resultados obtenidos de la prueba estadística aplicada para comparar las temperaturas del tubo receptor simple.

<b>Análisis de varianza</b>						
<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
Filas	134119.6158	163	822.8197286	98.66142203	5.5967E-213	1.244645968
Columnas	32724.65069	2	16362.32534	1961.94893	<b>1.6935E-182</b>	3.023430571
Error	2718.785377	326	8.339832446			
Total	169563.0518	491				

### 5.7.2. Comparación estadística de la temperatura en el tubo receptor compuesto.

**Tabla 5.10.**

Resultados obtenidos de la prueba estadística aplicada para comparar las temperaturas del tubo receptor compuesto.

<b>Análisis de varianza</b>						
<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
Filas	460332.1537	121	3804.397965	142.2092101	2.0976E-177	1.288289343
Columnas	9211.99237	2	4605.996185	172.1731231	<b>3.12613E-47</b>	3.03312457
Error	6474.01323	242	26.75212079			
Total	476018.1593	365				

Al comparar los valores de las temperaturas en los puntos de medición  $T_A$ ,  $T_B$  y  $T_C$  en el tubo receptor simple, se observa que estadísticamente existe diferencia significativa entre estos valores. Esto indica que el flujo estacionario a través del tubo receptor simple posee movimiento térmico para la longitud usada.

Al comparar los valores de las temperaturas en los puntos de medición  $T_A$ ,  $T_B$  y  $T_C$  en el tubo receptor compuesto, se observa que estadísticamente existe diferencia significativa entre estos valores. Esto indica que el flujo estacionario en el interior del tubo receptor compuesto posee movimiento térmico para la longitud usada.

### 5.7.3. Comparación estadística de la temperatura de los tubos receptores simple y compuesto con fluido estacionario.

**Tabla 5.11.**

Resultados obtenidos de la prueba estadística aplicada para comparar las temperaturas de los tubos receptores.

<b>Análisis de varianza</b>						
<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
<b>Filas</b>	140853.3412	121	1164.0772	5.250805828	2.58294E-18	1.350186445
<b>Columnas</b>	19921.81378	1	19921.81378	89.86137335	<b>2.79849E-16</b>	3.919464555
<b>Error</b>	26825.09044	121	221.6949623			
<b>Total</b>	187600.2455	243				

Al comparar las temperaturas de los dos tubos receptores, a partir de la comparación de las temperaturas promedios de cada uno, se observa que estadísticamente existe diferencia significativa entre ambos tubos. Con este resultado no se puede concluir cuál es el más eficiente, sin embargo, se debe mencionar que el tubo compuesto generó mucha más presión de vapor, así como también la temperatura más alta que se logró medir.

## 5.8. Generación de energía eléctrica utilizando el concentrador cilíndrico parabólico.

Después de haber caracterizado la temperatura y la eficiencia del CCP, se procedió a hacer algunos ensayos de producción de energía eléctrica, que sería una de las principales aplicaciones que se les puede dar a estos concentradores. Se diseñó y construyó una pequeña turbina de vapor junto a un alternador para hacer posible la transformación de la energía térmica transformada en el tubo receptor en energía eléctrica en la turbina-alternador.

El primer ensayo se hizo el 01 de Febrero de 2016 obteniendo los resultados mostrados en el gráfico 5.21.

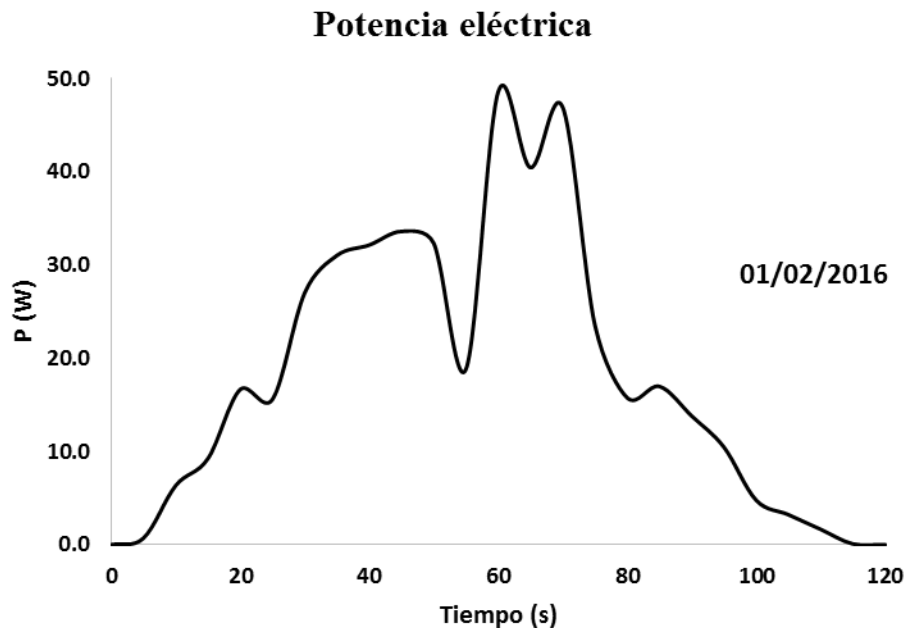
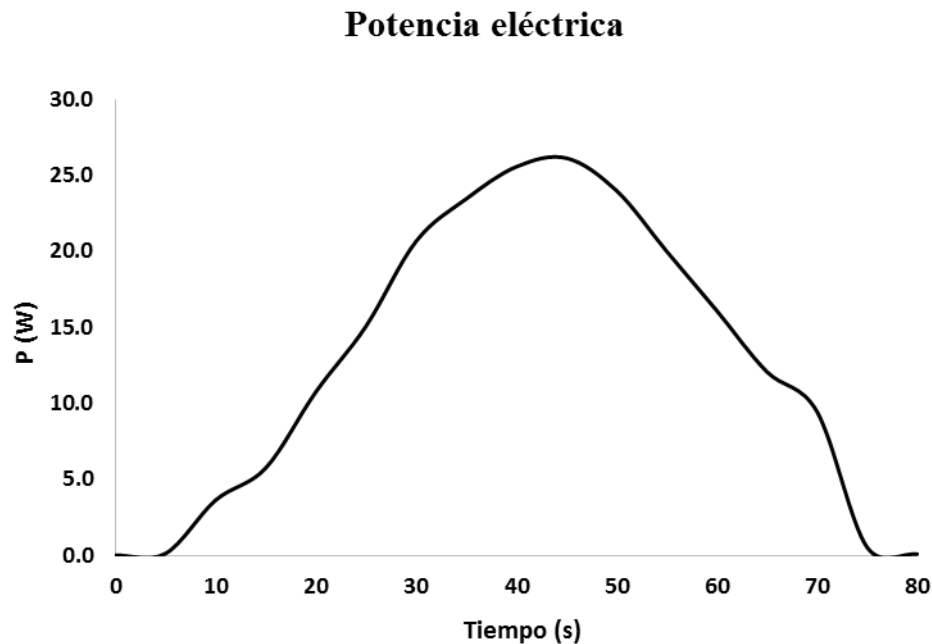


Gráfico 5.21. Potencia instantánea obtenida en el ensayo de producción de energía eléctrica para el día 01/2/2016.

Otros ensayo se hizo el día 7 de Febrero de 2016 obteniéndose los resultados mostrados en el gráfico 5.22.



*Gráfico 5.22.* Potencia instantánea obtenida en el ensayo de producción de energía eléctrica para el día 07/2/2016.

En el gráfico 5.21, se muestran los resultados para uno de los ensayos de producción de energía eléctrica realizado. La potencia máxima instantánea fue de 48.60 watt y la potencia promedio instantánea fue de 19.50 watt, esta es la potencia que se logró convertir en energía eléctrica, con esto se demuestra que con el CCP, es posible obtener energía eléctrica aunque aquí dio una eficiencia es baja, esto es debido a que la turbina que se diseñó y construyó es artesanal por lo tanto tiene muchas imperfecciones y defectos en todo el funcionamiento debido a esto la capacidad que tiene para transformar es poca, sin embargo se demuestra que es posible hacerlo, si se hace con una turbina más industrial. También en el alternador se tuvieron ciertos inconvenientes debido a que no se encontraron los electroimanes adecuados para generar un campo magnético elevado y de esta manera hacer que se generara más potencia eléctrica. Todos estos factores influyeron a que la eficiencia de transformación fuera baja alrededor de un 6% es la eficiencia de la máquina que se utilizó para hacer estos ensayos.

Se hizo otro ensayo de generación de energía eléctrica, los resultados están en el gráfico 5.22. La potencia máxima instantánea fue de 26.10 watt, y la potencia promedio instantánea fue de 13.30 watt, esta es la potencia que se logró convertir en este ensayo en energía eléctrica. En este caso el resultado de la potencia eléctrica instantánea disminuyó considerablemente, esto se puede deber a que ya las piezas del sistema de transformación se estaban deteriorando debido a las pruebas realizadas anteriormente. Sin embargo a pesar que es una potencia bien poca se demuestra nuevamente que el concentrador es capaz de generar vapor para hacer girar la rueda de una pequeña turbina, la cual utilizando un alternador aprovecha este movimiento para generar energía eléctrica. Con estos ensayos realizados se demuestra que es posible producir energía eléctrica, y si las dimensiones del concentrador son más grandes mucho mejor porque se lograría captar mayor potencia solar, y utilizando una turbina industrial entonces se puede generar una mayor potencia eléctrica, la cual se puede utilizar para sustentar las necesidades de un hogar, o vender la potencia generada.

## **5.9. Dificultades.**

Durante la realización de esta investigación se presentaron los siguientes inconvenientes:

- El material utilizado para hacer la superficie reflectante del concentrador no era el adecuado ya que hace demasiado pesado el prototipo, pero no se encontró otro tipo de material en el mercado.
- Solo se hicieron mediciones de eficiencia tanto en óptica como en térmica con el tubo receptor simple, ya que con el tubo compuesto la bomba utilizada no dio el caudal necesario para hacer las pruebas.
- Las juntas del tubo receptor compuesto no soportaron las presiones del vapor generado y se rompieron permitiendo el escape del vapor de agua.
- La constante solar se determinó de manera experimental e indirecta, ya que no se tenía el equipo necesario para medirla en tiempo real.

## CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones.

➤ Se diseñó y construyó un concentrador cilíndrico-parabólico de 2.00 metros de longitud, con una abertura de 1.04 metros y con una longitud en el lado curvo de 1.20 metros y con su superficie reflectante recubierta con tiras de espejo de 3 mm de espesor, con un ancho de 3.00 cm y 98.00 cm de longitud.

➤ Se concentró la radiación solar incidente de la superficie reflectora en la línea focal del concentrador, en la cual se ubicó un tubo que absorbió esta energía y la transformo en energía térmica elevando la temperatura de un fluido que circulo en el interior de dicho tubo.

➤ Se caracterizó la temperatura del tubo receptor simple sin fluido obteniéndose los siguientes resultados: Temperatura máxima 216.50 °C, temperatura máxima promedio 177.85 °C y la temperatura general promedio de 157.50 °C.

➤ Se caracterizó la temperatura del tubo receptor simple con fluido obteniéndose los siguientes resultados: temperatura máxima de 172.00 °C, temperatura máxima promedio de 170.00 °C y la temperatura general promedio de 133.80 °C.

➤ Se caracterizó la temperatura del tubo receptor compuesto sin fluido obteniéndose los siguientes resultados: temperatura máxima de 217.66 °C, temperatura máxima promedio de 213.00 °C y la temperatura general promedio de.

➤ Se caracterizó la temperatura del tubo receptor compuesto con fluido obteniéndose los siguientes resultados: temperatura máxima de 172.23 °C, temperatura máxima promedio de 163.28 °C, temperatura general promedio 146.06 °C.

➤ En la medición de temperatura de los dos tubos receptores se observa que la temperatura muestra una variación normal en el periodo de medición en los puntos de medición marcados  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ , por lo tanto se acepta la hipótesis nula  $H_{0,1}$ .

➤ La eficiencia óptica es un valor que caracteriza el concentrador cilíndrico parabólico obteniéndose un valor de 74%, esto significa que hay un alto porcentaje de captación de radiación solar en los componentes ópticos de la superficie reflectante y el tubo receptor que es donde se refleja y absorbe la energía radiante. Este valor supera las expectativas de la hipótesis nula  $H_{0,2}$  y la cual se toma como aceptable ya que se tiene un valor mayor al 50% de captación de radiación solar.

➤ Otro de los resultados obtenidos de la caracterización del concentrador cilíndrico parabólico es su eficiencia térmica global la cual dio un valor promedio de 51%, debido a que fue afectado por algunas variables climáticas (viento y nubosidad) las cuales influyen en el resultado final del comportamiento del concentrador. Este valor lleva ya implícita todas las pérdidas térmicas, geométricas y ópticas que el dispositivo tiene. El valor encontrado está dentro de las expectativas de la hipótesis nula  $H_{0,2}$ , la cual se acepta ya que se tiene un valor mayor al 50% de transformación de energía radiante en energía térmica.

➤ Al comparar los valores de las temperaturas en los puntos de medición  $T_A$ ,  $T_B$  y  $T_C$  en el tubo receptor simple, se observa que estadísticamente existe diferencia significativa entre estos valores. Esto indica que el flujo estacionario a través del tubo receptor simple posee movimiento térmico en el interior del tubo receptor.

➤ Al comparar los valores de las temperaturas en los puntos de medición  $T_A$ ,  $T_B$  y  $T_C$  en el tubo receptor compuesto, se observa que estadísticamente existe diferencia significativa entre estos valores. Esto indica que el flujo estacionario a través del tubo receptor compuesto posee movimiento térmico en el interior del tubo receptor.

➤ Al comparar los valores de temperatura de los tubos receptores con fluido estacionario, a partir de la comparación de las temperaturas promedios de cada uno, se observa que estadísticamente existe diferencia significativa entre ambos tubos. Con este resultado no se puede concluir cuál de los dos posee más factibilidad en el comportamiento de la temperatura del fluido en el interior del tubo receptor, sin embargo, se debe mencionar que el tubo receptor compuesto generó mucha más presión de vapor y la temperatura más elevada que se midió en las pruebas realizadas.

➤ En los ensayos de transformación de energía térmica en energía eléctrica se generaron las potencias máximas instantáneas de 48.60 watt y 26.10 watt; y potencias

promedio instantáneas de 19.50 watt y 13.30 watt. Con esto se demuestra que es factible la transformación de energía solar térmica en energía eléctrica. Aunque la eficiencia de transformación de energía térmica en energía eléctrica en este caso es baja debido a que todo fue construido de manera artesanal, obteniéndose un porcentaje de transformación alrededor del 7% en la potencia máxima instantánea y un 2% en la potencia promedio instantánea.

➤ Los valores de potencia eléctrica instantánea generada no son suficientes para abastecer las necesidades energéticas básicas de un hogar, por lo tanto no se acepta la hipótesis nula  $H_{0,4}$ .

➤ La eficiencia de transformación en energía eléctrica, no está en el concentrador si no en la turbina-alternador, esto porque los elementos con los cuales se construyeron no eran los adecuados y debido a esto se obtuvo una baja producción de energía eléctrica.

## 6.2. Recomendaciones.

Para futuras investigaciones con el concentrador cilíndrico-parabólico, se recomienda:

- Hacer un estudio del concentrador tomando en cuenta el comportamiento de algunas variables climáticas, tales como: el viento y la nubosidad.
- Diseñar la superficie reflectora con materiales más livianos tal como el papel espejo.
- Hacer que el concentrador tenga un seguimiento automático en la dirección del sol, para que capte una mayor cantidad de energía durante el día sin necesidad de estarlo orientando de forma manual.
- En el tubo receptor usar materiales que tengan mayor conductividad térmica, tales como el aluminio o el cobre.
- Proteger el tubo receptor con algún tubo de cristal, para evitar pérdidas térmicas por radiación y convección.
- Diseñar y construir una turbina de vapor que tenga una mayor resistencia, para que soporte la fuerza centrífuga a la que es sometida debido a la presión del vapor.
- En el alternador usar electroimanes de mayor campo magnético, esto con el fin que el campo sea lo suficientemente intenso, para que se tenga una mayor eficiencia en la transformación de energía.

## CAPITULO VII. BIBLIOGRAFIA

Alianza de energía, y. c. (14 de Octubre de 2015). ECPA. Obtenido de <http://sp.ecpamericas.org/news/Default.aspx?id=1262>

Baustista, C. (6 de Noviembre de 2015). ¿Como podemos obtener electricidad? Obtenido de <http://dedondeprovienenloscombustibles.blogspot.com/2015/04/como-podemos-obtener-electricidad.html>

Behohanasolar. (10 de Julio de 2014). Obtenido de [http://www.beohanasolar.com/solar\\_power/history\\_of\\_solar.html](http://www.beohanasolar.com/solar_power/history_of_solar.html)

Biografías, y. v. (30 de Septiembre de 2015). Obtenido de Charles Alergnon Parson: <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/p/parsons.htm>

Bulmaro. (4 de Noviembre de 2015). Obtenido de Como funcionan los generadores electricos.: <http://comohacer.eu/como-funciona-un-generator-electrico/>

Bussineswire.com. (15 de Noviembre de 2015). Hitachi Plant Technologies desarrolla un sistema de aire acondicionado activado con energía solar. Obtenido de <http://www.businesswire.com/news/home/20110104007240/es/>

Chile, E. (6 de Diciembre de 2014). Circulo electricidad Chile. Obtenido de <http://circuloelectricidad.blogspot.com/2014/12/energia-solar-fotovoltaica.html>

Cruz, S., & García, G. (10 de Noviembre de 2015). Ensayo de colector solar. Obtenido de [http://www.utm.mx/edi\\_anteriores/TEMAS49/T49\\_Ensayo2\\_ColectorSolar.pdf](http://www.utm.mx/edi_anteriores/TEMAS49/T49_Ensayo2_ColectorSolar.pdf)

DOT. (1 de Julio de 2014). Concentrador cilindrico parabolico. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70237/fichero/4.+CAPITULO+2.+INTRODUCCI%C3%93N.pdf>

ELISBANSAC. (20 de Junio de 2014). Evaluación experimental de un concentrador solar cilíndrico parabólico. Obtenido de <http://perusolar.org/16-spes-ponencias/EVALUACION%20EXPERIMENTAL%20DE%20UN%20CONCENTRADOR%20SOLAR%20CILINDRICO%20PARABOLICO.pdf>

Energiza. (29 de Septiembre de 2014). Especial tubrinas de vapor. Obtenido de <http://www.energiza.org/anteriores/energizadiciembre2011.pdf>

Ericsson, W. (05 de Julio de 2014). John Ericsson. Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/John\\_Ericsson](https://es.wikipedia.org/wiki/John_Ericsson)

Escobar, .. L. (20 de Julio de 2014). [www.cie.unam.mx](http://www.cie.unam.mx). Obtenido de <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Tesis/1.pdf>

Escobar., L. G. (20 de Julio de 2015). Obtenido de Universidad Autonoma de México: <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Tesis/1.pdf>

García, S., & Martín, D. (20 de Octubre de 2015). Obtenido de Primeras tubrinas de vapor: <http://www.renovetec.com/tiposturbinasvapor.html>

Garcia., P. M. (10 de Octubre de 2014). Colectores de concentracion. Obtenido de <https://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/FAA/Solar%20termica3.pdf>

Garrido, S., & López, D. (20 de Octubre de 2015). Primeras turbinas de vapor. Obtenido de <http://www.renovetec.com/tiposturbinasvapor.html>

Keysight Technologies. (1 de Abril de 2015). U1271-90032. Obtenido de <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/U1271-90032.pdf?id=1967505>

Keysight Technologies, .. (1 de Abril de 2015). U1271-90032. Obtenido de <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/U1271-90032.pdf?id=1967505>

Keysight Technologies. (15 de Abril de 2015). U1115-90105. Obtenido de <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/U1115-90105.pdf?id=2476391>.

Keysight, T. (15 de Abril de 2015). U1115-90105. Obtenido de <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/U1115-90105.pdf?id=2476391>.

LinkedIn Corporation ©, 2. (10 de Julio de 2014). Historia de la energía solar térmica. Obtenido de <http://es.slideshare.net/geopaloma/historia-de-la-energa-solar-termica-i>

Mikroulis, C. (11 de Junio de 2014). Proyectos fin de estudio. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70237/fichero/4.+CAPITULO+2.+INTRODUCCI%D3N.pdf>

Mikroulis., C. (11 de Junio de 2014). Trabajos y proyectos de fin de estudio. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70237/fichero/4.+CAPITULO+2.+INTRODUCCI%D3N.pdf>

Olivare, R., Aldana, D. M., & Moreno, J. B. (20 de Agosto de 2014). Seccion de energia. Obtenido de <http://es.slideshare.net/robvaler/simulacin-de-una-planta-termosolar-de-colectores-cilindro-parabolicos>

Parábola,. (21 de Septiembre de 2014). Parábola. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Parábola\\_%28matemática%29](https://es.wikipedia.org/wiki/Parábola_%28matemática%29)

Proyecto SWERA, U. (1 de Octubre de 2014). UCA. Obtenido de [http://cef.uca.edu.sv/descargables/proyectos/UCASolarAssessment\\_es\\_206.pdf](http://cef.uca.edu.sv/descargables/proyectos/UCASolarAssessment_es_206.pdf)

Rivera, .. F. (15 de Agosto de 2014). Monografias. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos100/energias-renovables/energias-renovables.shtml>

Sánchez, .. (2010). Energía solar térmica. México: Limusa.

Scribd. (20 de Octubre de 2015). Historia de una turbina. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/79400281/Pequena-resena-de-la-historia-de-una-turbina>

Slideshare. (20 de Julio de 2014). Obtenido de <http://es.slideshare.net/geopaloma/historia-de-la-energa-solar-termica-i>

Tecnologia. (15 de Octubre de 2015). Funcionamiento de un sistema turbina-alternador. Obtenido de <http://tecnologiasdonpelayotercero.blogspot.com/2013/05/funcionamiento-de-un-sistema-turbina.html>

Termosolar. (1 de Agosto de 2014). Obtenido de [http://www.anes.org/anes/formularios/RedTermosolarSCP/CanalyFresnel\\_archivos/image007.jpg](http://www.anes.org/anes/formularios/RedTermosolarSCP/CanalyFresnel_archivos/image007.jpg)

UCA. (1 de Octubre de 2014). UCAsolar. Obtenido de [http://cef.uca.edu.sv/descargables/proyectos/UCASolarAssessment\\_es\\_206.pdf](http://cef.uca.edu.sv/descargables/proyectos/UCASolarAssessment_es_206.pdf)

Universidad Tecnologica, d. l. (28 de Septiembre de 2014). Ajuste de un concentrador solar. Obtenido de [http://www.utm.mx/edi\\_anteriores/temas59/T59\\_1E5.pdf](http://www.utm.mx/edi_anteriores/temas59/T59_1E5.pdf)

Valls, M. (23 de Octubre de 2015). Obtenido de Turbina de vapor:  
<https://sites.google.com/site/maximoyvalls/home/turbina-de-vapor>

Velasco, .. .. (1 de Junio de 2014). Obtenido de Escuela Técnica Superior de Minas.:  
[http://oa.upm.es/14011/1/PFC\\_CARMEN\\_PAREDES\\_VELASCO.pdf](http://oa.upm.es/14011/1/PFC_CARMEN_PAREDES_VELASCO.pdf)

Villasante, C. (20 de Julio de 2014). Energías Renovables ©EUITI de Eibar. Obtenido de  
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/termoelectrica/revision/revision.html>

Web. (15 de Octubre de 2015). Partes fundamentales del motor. Obtenido de  
<http://motoreselectricos7.webnode.es/partes-fundamentales/>

wikipedia. (29 de Octubre de 2015). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Alternador>

Wikipedia, .. .. (21 de Septiembre de 2014). Parábola. Obtenido de  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Parábola\\_%28matemática%29](https://es.wikipedia.org/wiki/Parábola_%28matemática%29)

Wikipedia, .. .. (25 de Septiembre de 2015). Obtenido de Herón de Alejandría:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Her%C3%B3n\\_de\\_Alejandr%C3%ADa](https://es.wikipedia.org/wiki/Her%C3%B3n_de_Alejandr%C3%ADa)

Wikipedia, .. .. (29 de Octubre de 2015). Alternador. Obtenido de  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Alternador>

Wikipedia, .. (21 de Septiembre de 2014). Parábola;. Obtenido de  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Parábola\\_%28matemática%29](https://es.wikipedia.org/wiki/Parábola_%28matemática%29)

Yanez, J. C., & Lopez, I. E. (25 de Agosto de 2014). Instituto Politecnico Nacional.  
Obtenido de

<http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/5641/1/ESTUDIOELECTRIFICAC.pdf>

# CAPITULO VIII. ANEXOS

## 8.1. Anexo I. Certificados de calibración de los equipos de medición.

AI.

	Keysight Technologies Malaysia Sdn Bhd (463532-M) (Formerly known as Agilent Technologies Microwave Products (M) Sdn Bhd) Bayan Lepas Free Industrial Zone 11900 Penang, Malaysia Keysight Approved Calibration Provider #71456
---	--



5962-0476

### Certificate Of Calibration

**Certificate No:** U1272AMY54350035

**Manufacturer:** Keysight Technologies      **Description:** U1272A Handheld Digital Multimeter

**Model No:** U1272A      **Serial No:** MY54350035

**Options Installed With Specifications:** N/A

**Date of Calibration:** 03-Sep-2014

**Temperature:** (23±5) °C      **Humidity:** (50 to 80)% RH

**Procedure:** AE-P-W13027

This certifies that the above product was calibrated by an approved Keysight calibration provider in accordance with procedures approved by Keysight Technologies.

**As Received:** Factory tested - No incoming data available

**As Shipped Conditions:** At the completion of the calibration, measured values were IN SPECIFICATION at the points tested

These calibration procedures and test points are those recommended in a procedure developed by Keysight.

**Remarks or special requirements:** For inquiries regarding this calibration please contact Keysight Technologies at the above address.

**Traceability Information:** Traceability is to the International System of Units (SI), consensus standards or ratio type measurements through national standards realized and maintained by the NIST U.S., NRC Canada, NMIJ Japan, KRISS Korea, Euramet members (NPL, PTB, etc.), NML-SIRIM in Malaysia or other National Measurement Institutes signatories to the CIPM MRA. Supporting documentation relative to traceability is available for review by appointment. This report shall not be reproduced, except in full, without prior written approval of the calibration facility.

Calibration Equipment Used:	<i>Date Used: Date equipment used in this Calibration.</i>			
Model Number	Model Description	Trace Number	Date Used	Cal Due Date
Fluke 5520A	Multifunction Calibrator	P0457	03-Sep-2014	24-Oct-2014

**Print Date:** 03-Sep-2014





Ng Kok Seong  
 Quality Manager  
 Keysight Calibration Provider #71456

Keysight Provider #71456				
DD	MM	YY	BY	
CAL	03	09	14	MK
DUE				

cert form rev h Page 1 of 1

AII.

	Keysight Technologies Malaysia Sdn Bhd (463532-M) (Formerly known as Agilent Technologies Microwave Products (M) Sdn Bhd) Bayan Lepas Free Industrial Zone 11900 Penang, Malaysia	 5962-0476
	Keysight Approved Calibration Provider #71456	

### Certificate Of Calibration

**Certificate No:** U1272AMY54350096  
**Manufacturer:** Keysight Technologies      **Description:** U1272A Handheld Digital Multimeter  
**Model No:** U1272A      **Serial No:** MY54350096  
**Options Installed With Specifications:** N/A  
**Date of Calibration:** 05-Sep-2014  
**Temperature:** (23±5) °C      **Humidity:** (50 to 80)% RH  
**Procedure:** AE-P-W13027

This certifies that the above product was calibrated by an approved Keysight calibration provider in accordance with procedures approved by Keysight Technologies.

**As Received:** Factory tested - No incoming data available

**As Shipped Conditions:** At the completion of the calibration, measured values were IN SPECIFICATION at the points tested

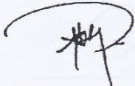
These calibration procedures and test points are those recommended in a procedure developed by Keysight.

**Remarks or special requirements:** For inquiries regarding this calibration please contact Keysight Technologies at the above address.

**Traceability Information:** Traceability is to the International System of Units (SI), consensus standards or ratio type measurements through national standards realized and maintained by the NIST U.S., NRC Canada, NMIJ Japan, KRISS Korea, Euramet members (NPL, PTB, etc.), NML-SIRIM in Malaysia or other National Measurement Institutes signatories to the CIPM MRA. Supporting documentation relative to traceability is available for review by appointment. This report shall not be reproduced, except in full, without prior written approval of the calibration facility.


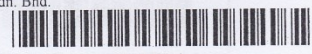
Calibration Equipment Used:		Date Used: Date equipment used in this Calibration.		
Model Number	Model Description	Trace Number	Date Used	Cal Due Date
Fluke 5520A	Multifunction Calibrator	P0744	05-Sep-2014	19-Jan-2015

**Print Date:** 13-Oct-2014

  
 Ng Kok Seong  
 Quality Manager  
 Keysight Calibration Provider #71456

Keysight Provider #71456			
DD	MM	YY	BY
CAL	05	09	14
DUE			

AIII.

 <b>Agilent Technologies</b>	Agilent Technologies Microwave Products (M) Sdn. Bhd. Bayan Lepas Free Industrial Zone 11900 Penang Malaysia	 5962-0476
	Agilent Approved Calibration Provider #71456	

### Certificate Of Calibration

**Certificate No:** U1272AMY54220112  
**Manufacturer:** Agilent Technologies      **Description:** U1272A Handheld Digital Multimeter  
**Model No:** U1272A      **Serial No:** MY54220112  
**Options Installed With Specifications:** N/A  
**Date of Calibration:** 10-Jul-2014  
**Temperature:** (23±5) °C      **Humidity:** (50 to 80)% RH  
**Procedure:** AE-P-W13027

This certifies that the above product was calibrated by an approved Agilent calibration provider in accordance with procedures approved by Agilent Technologies.

**As Received:** Factory tested - No incoming data available

**As Shipped Conditions:** At the completion of the calibration, measured values were IN SPECIFICATION at the points tested

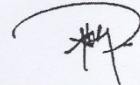
These calibration procedures and test points are those recommended in a procedure developed by Agilent.

**Remarks or special requirements:** For inquiries regarding this calibration please contact Agilent Technologies at the above address.



**Traceability Information:** Traceability is to the International System of Units (SI), consensus standards or ratio type measurements through national standards realized and maintained by the NIST U.S., NRC Canada, NMJJ Japan, KRISS Korea, Euramet members (NPL, PTB, etc.), NML-SIRIM in Malaysia or other National Measurement Institutes signatories to the CIPM MRA. Supporting documentation relative to traceability is available for review by appointment. This report shall not be reproduced, except in full, without prior written approval of the calibration facility.

Calibration Equipment Used:		Date Used: Date equipment used in this Calibration.		
Model Number	Model Description	Trace Number	Date Used	Cal Due Date
Fluke 5522A	Multifunction Calibrator	P0903	10-Jul-2014	13-Feb-2015

**Print Date:** 10-Jul-2014

  
 \_\_\_\_\_  
 Ng Kok Seong  
 Quality Manager  
 Agilent Calibration Provider #71456

Agilent Provider #71456			
DD	MM	YY	BY
CAL	10	07	14
DUE			

 <b>Agilent Technologies</b>	Agilent Technologies Microwave Products (M) Sdn. Bhd. Bayan Lepas Free Industrial Zone 11900 Penang Malaysia	 5971-0077
---	---	---

**Recommended Due Date for Adjustment/Calibration  
(One-Year Storage Limit)**

**Model No:** U1271A/U1272A

*We have determined that the factory calibration of this instrument is not significantly affected by storage of up to one year before the first-time use. This instrument is warranted to meet the published specifications at the first adjustment/calibration due date, assuming that the date is determined using the following instructions.*

1. Determine the DATE TESTED from the Certificate of Calibration which is shipped with the instrument. This is the date when the instrument was calibrated before it was shipped from the factory.
2. Select the desired adjustment/calibration interval. Refer to the instrument's manuals for calibration interval recommendations or to the requirements of your organization's quality system.  
*Please note that the Cal Interval may be other than 1 year, e.g.:2 year*
3. Determine the date when the next adjustment/calibration is due (refer to the examples shown below).

**Example 1:** *First-time use of the instrument is less than one year after DATE TESTED.*

Date Tested at Factory: May 1, 2007  
 Selected Calibration Interval: 1 Year  
 First-Time Use of Instrument: August 5, 2007

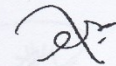
First-Time Use + Selected Interval = Date for Next Adjustment/Calibration

August 5, 2007 + 1 Year = August 5, 2008

**Example 2:** *First-time use of the instrument is more than one year after DATE TESTED.*

Date Tested at Factory: April 3, 2007  
 Selected Calibration Interval: 1 Year  
 First-Time Use of Instrument: May 22, 2008  
 Date Tested at Factory + 365 Days + Selected Interval = Date for Next Adjustment/Calibration

April 3, 2007 + 365 Days + 1 Year = April 3, 2009



Tay Eng Su  
 Quality Manager

## 8.2. Anexo II. Montaje experimental medidas de temperatura tubo receptor sin fluido y con fluido en los puntos (a, b y c).

Para poder determinar el comportamiento de la temperatura en el tubo receptor del concentrador cilindrico – parabolico, se hizo un montaje experimental como el mostrado en la figura 8.1, donde se muestran los puntos de medicion, temperatura en la entrada (TE), temperatura en el punto B (TB), temperatura en el punto C (TC), temperatura en el punto A (TA) y la temperatura en la salida (TS), en estos mismos puntos se midio la temperatura tanto sin fluido con con fluido en el tubo receptor.



*Figura 8.1.* Montaje experimental para medir la temperatura en el tubo receptor sin fluido y con fluido.

**8.3. Anexo III. Montaje experimental para la determinación eficiencia óptica y térmica del CCP.**



*Figura 8.2.* Determinación de la eficiencia óptica y térmica del CCP.

**8.4. Anexo IV. Montaje experimental para los ensayos de producción de energía eléctrica.**



*Figura 8.3.* Montaje experimental y equipo de medición en los ensayos de producción de energía eléctrica.

## 8.5. Anexo V. Determinación de la constante solar en la superficie terrestre

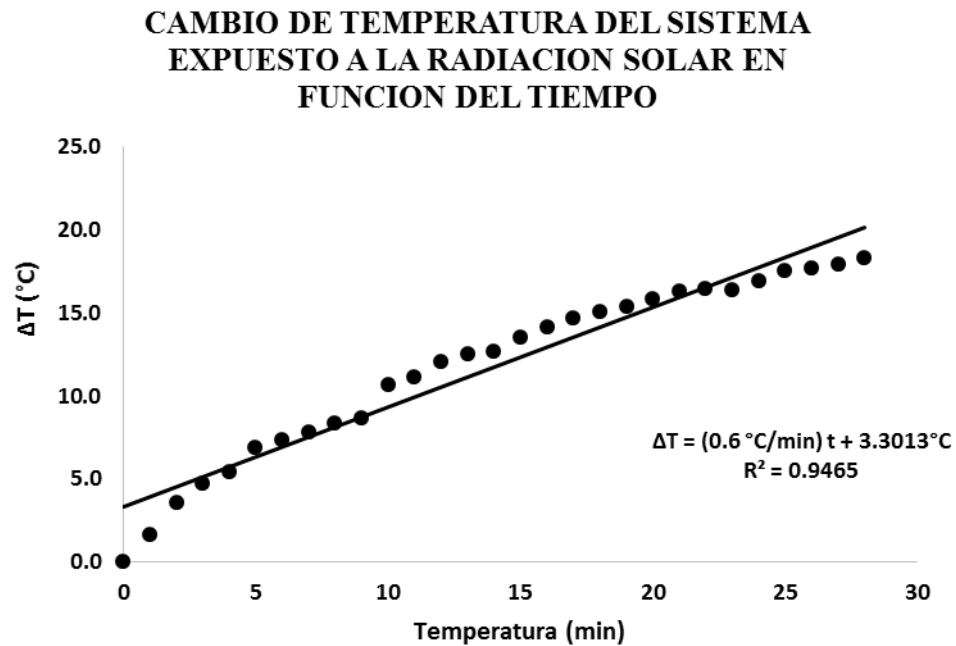


Gráfico 8.1. Determinación de la constante solar en la superficie de la tierra para el día 02/09/2015.

El día 02 de Septiembre de 2015 se hizo la primera determinación de la constante solar en el lugar donde se realizó el experimento, obteniéndose los siguientes resultados.

Como se observa en el gráfico 8.1 la relación entre el tiempo de exposición del sistema a la radiación y el cambio de temperatura generado por el sistema es una función lineal, por lo tanto la pendiente del gráfico nos da la rapidez de calentamiento del sistema es decir el flujo de calor que absorbió el sistema en función del tiempo utilizando la ecuación 2.28 es:

$$m = \frac{\Delta T_F - \Delta T_I}{\Delta t_F - \Delta t_I}, \text{ obteniéndose el siguiente valor para la pendiente:}$$

$$m = 0.60 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

**Tabla 8.1.**

Valores de área y masa de agua usados en el sistema para determinar la constante solar el día 2 de Septiembre del 2015.

Base (cm)	Altura (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Masa (gr)
5.265	13.39	70.50	167.25

Haciendo uso de la ecuación 2.27 e introduciendo los respectivos valores de las variables necesarias, se determina el valor de la constante solar para este día así:

$$K = \frac{(167.25 \text{ gr})(1 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \text{ } ^\circ\text{C}}) + (13.2 \text{ gr})(0.215 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \text{ } ^\circ\text{C}})}{70.50 \text{ cm}^2} * 0.60 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}$$

$$K = \left(\frac{170.1 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}}{70.50 \text{ cm}^2}\right) \left(0.60 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}\right)$$

$$K = 1.448 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \times \text{min}}$$

Haciendo la conversión nos da un valor de:

$$K = 1010 \frac{\text{watt}}{\text{m}^2}$$

El día 07 de Septiembre de 2015 se hizo otra prueba para determinar la constante solar en el lugar donde se realizó el experimento, obteniéndose los siguientes resultados.

Como se observa en el grafico 8.2 la relación entre el tiempo de exposición del sistema a la radiación y el cambio de temperatura generado por el sistema es una función lineal, por lo tanto la pendiente del grafico nos da la rapidez de calentamiento del sistema es decir el flujo de calor que absorbió el sistema en función del tiempo haciendo uso de la ecuación 2.28 es:

$$m = \frac{\Delta T_F - \Delta T_I}{\Delta t_F - \Delta t_I}, \text{ obteniéndose el siguiente valor para la pendiente:}$$

$$m = 0.4562 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}$$

**CAMBIO DE TEMPERATURA DEL SISTEMA  
EXPUESTO A LA RADIACION SOLAR EN  
FUNCION DEL TIEMPO**

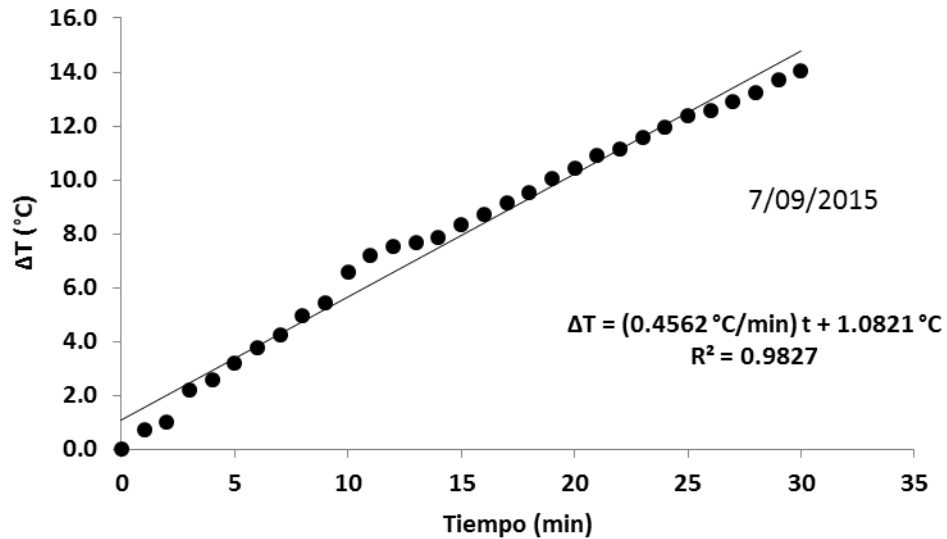


Gráfico 8.2. Determinación de la constante solar en la superficie de la tierra para el día 07/09/2015.

**Tabla 8.2.**

Valores de área y masa de agua usados en el sistema para determinar el valor de la constante solar el día 7 de Septiembre del 2015.

Base (cm)	Altura (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Masa (gr)
5.265	13.39	70.50	218.2

Haciendo uso de la ecuación 2.27 e introduciendo los respectivos valores de las variables, obtenemos un valor de la constante solar para ese día así:

$$K = \frac{(218.2 \text{ gr}) \left(1 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}}\right) + (13.2 \text{ gr}) \left(0.215 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \cdot ^\circ\text{C}}\right)}{70.50 \text{ cm}^2} * 0.4562 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}$$

$$K = \left(\frac{221.04 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}}{70.50 \text{ cm}^2}\right) \left(0.4562 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}\right)$$

$$K = 1.43 \frac{cal}{cm^2 \times min}$$

Haciendo la conversión nos da un valor de:

$$K = 998 \frac{watt}{m^2} \equiv 1000 \frac{Watt}{m^2}$$

En el lugar donde se está haciendo el experimento de acuerdo con resultados obtenidos, se puede usar el valor estándar de  $1000 \frac{watt}{m^2}$ , para un día totalmente soleado y con condiciones climáticas óptimas. Ya que el valor obtenido experimentalmente se ajusta.

## 8.6. Anexo VI. Costos económicos de la investigación.

**Tabla 8.3.**

Materiales utilizados en el desarrollo de esta investigación y sus costos económicos.

<b>MATERIALES</b>	<b>COSTO (\$)</b>
LAMINA DE ALUMINIO (2 M)	12.00
LAMINA GALVANIZADA LISA	10.20
ESPEJO (2.35 M <sup>2</sup> )	50.00
CORTE DE ESPEJO (TIRAS 3 CM)	8.00
TRANSPORTE DE LOS ESPEJOS	20.00
6 TUBOS GALVANIZADOS ( ½')	54.40
2 PLATINAS DE HIERO	9.20
REMACHES	5.00
CONSTRUCCIÓN DEL CCP	40.00
REAJUSTES CCP	20.00
TUBO GALVANIZADO (1 ¼')	28.00
PEGAMENTO ADI-FLEX (2)	15.00
TIJERA CORTAR LAMINA	5.80
2 ADAPTADORES NIPLE (1 ¼')	3.50

Continuación tabla 8.3.

<b>MATERIALES</b>	<b>COSTO (\$)</b>
<b>2 REDUCTORES DE 1 ¼' A 1'</b>	3.60
<b>6 ADAPTADORES NIPLE DE ½'</b>	2.90
<b>1 MANÓMETRO DE 100 PSI</b>	3.50
<b>1 MANÓMETRO DE 400 PSI</b>	13.00
<b>2 CODOS DE ½'</b>	0.86
<b>7 SPRAY HAMS ALTA</b>	30.00
<b>1 TUBO METÁLICO ADAPTADOR</b>	5.50
<b>1 LIMPIADOR DE ESPEJO</b>	3.25
<b>FRANELAS PARA LIMPIAR</b>	4.90
<b>2 SILICONA ALTA TEMPERATURA</b>	3.50
<b>TRANSPORTE DE MATERIAL</b>	10.00
<b>2 IMANES</b>	30.00
<b>COSTO DE LA TURBINA</b>	100.00
<b>COSTOS ADICIONALES</b>	200.00
<b>TOTAL</b>	<b>702.57</b>

## 8.7. Anexo VII. Base de datos para la comparación estadística de la temperatura en el tubo receptor simple con fluido estacionario.

*Tabla 8.4.*

Valores de temperatura promedio en los diferentes puntos de medida del tubo receptor simple con fluido estacionario.

Tiempo (s)	Medidas temperatura en el tubo receptor simple con fluido estacionario		
	$T_{A,prom}$	$T_{B,prom}$	$T_{C,prom}$
0	44.83	56.24	47.18
20	44.96	56.12	47.18
40	54.00	74.52	58.84
60	61.61	84.23	68.48
80	64.90	92.90	72.60
100	67.56	95.39	75.40
120	69.62	98.35	77.68
140	71.37	97.19	78.97
160	74.58	99.28	83.55
180	76.59	102.96	86.09
200	78.78	105.83	88.26
220	80.36	108.45	90.68
240	80.86	111.30	93.83
260	82.95	111.54	95.60
280	84.20	107.22	95.53
300	85.73	106.44	97.73
320	87.39	107.33	98.22
340	89.78	107.57	99.01
360	91.61	103.44	98.29
380	91.94	107.56	101.24
400	93.89	107.46	101.89
420	93.87	107.83	103.51
440	93.47	108.77	102.38

Continuación tabla 8.4.

Tiempo (s)	Medidas temperatura en el tubo receptor simple con fluido estacionario		
	T <sub>A,prom</sub>	T <sub>B,prom</sub>	T <sub>C,prom</sub>
460	95.21	111.16	105.45
480	97.43	111.13	105.18
500	98.47	108.98	106.00
520	99.56	112.95	107.20
540	100.33	117.87	105.64
560	100.54	117.67	106.09
580	101.41	118.45	108.33
600	102.61	119.71	110.54
620	103.60	121.55	113.02
640	104.93	123.24	112.81
660	106.19	124.92	114.56
700	107.92	124.68	114.82
720	109.71	124.15	113.71
740	110.75	127.11	116.73
760	111.89	128.46	117.70
780	112.07	129.64	118.13
800	113.50	130.17	119.14
820	114.96	130.47	120.91
840	116.03	132.29	121.39
860	117.27	134.42	122.81
880	117.64	135.70	122.79
900	117.03	137.17	121.92
920	117.09	135.31	119.18
940	117.98	138.28	121.08
960	118.78	137.93	123.87
980	119.32	139.36	124.45
1000	120.02	140.26	125.51
1020	120.37	141.35	126.48
1040	120.85	141.46	126.44

Continuación tabla 8.4.

Tiempo (s)	Medidas temperatura en el tubo receptor simple con fluido estacionario		
	$T_{A,prom}$	$T_{B,prom}$	$T_{C,prom}$
1060	121.58	140.33	125.82
1080	121.05	142.32	128.08
1100	122.73	143.63	128.83
1120	123.02	141.71	127.13
1140	124.80	144.96	130.48
1160	120.39	137.47	124.44
1180	118.60	132.28	120.66
1200	119.88	135.12	123.91
1220	122.52	138.00	126.63
1240	123.66	138.22	128.37
1260	122.99	137.09	127.34
1280	126.05	142.47	129.38
1300	123.93	143.22	126.88
1320	120.02	136.55	122.35
1340	117.65	131.67	119.62
1360	111.19	128.21	117.10
1380	111.55	131.47	117.30
1400	118.83	136.98	118.23
1420	120.84	136.77	122.12
1440	121.18	138.36	124.66
1460	122.71	140.26	126.96
1480	123.04	140.93	126.63
1500	122.69	140.00	126.62
1520	123.06	140.92	128.07
1540	122.80	142.21	127.05
1560	122.99	142.26	126.36
1580	121.58	141.01	125.13
1600	122.58	143.40	128.23
1620	122.34	143.30	125.75

Continuación tabla 8.4.

Tiempo (s)	Medidas temperatura en el tubo receptor simple con fluido estacionario		
	$T_{A,prom}$	$T_{B,prom}$	$T_{C,prom}$
1640	121.29	142.25	125.81
1660	120.74	141.59	124.44
1680	119.47	139.27	119.16
1700	116.84	138.64	118.13
1720	116.72	139.49	117.02
1740	113.98	138.14	115.37
1760	112.45	138.51	115.16
1780	110.65	138.92	115.72
1800	110.06	136.79	114.94
1820	110.41	138.32	116.78
1840	110.17	137.07	116.12
1860	111.52	138.72	117.34
1880	111.21	138.53	118.04
1900	111.14	138.94	118.01
1920	111.13	138.54	117.57
1940	110.28	138.08	117.54
1960	110.49	137.13	116.67
1980	111.12	137.50	117.40
2000	111.18	137.62	118.45
2020	108.38	138.98	116.35
2040	109.66	137.65	115.65
2060	110.29	137.46	116.75
2080	111.06	138.93	118.72
2100	110.86	136.12	116.67
2120	110.38	134.83	115.14
2140	110.58	134.54	116.51
2160	111.32	135.34	115.64
2180	109.89	135.97	116.38
2200	110.32	136.69	117.97

Continuación tabla 8.4.

Tiempo (s)	Medidas temperatura en el tubo receptor simple con fluido estacionario		
	$T_{A,prom}$	$T_{B,prom}$	$T_{C,prom}$
2220	110.99	136.27	117.56
2240	111.36	136.42	116.80
2260	112.07	137.15	117.27
2280	111.65	136.03	116.74
2300	111.20	135.87	116.98
2320	111.74	135.27	116.20
2340	108.97	129.42	112.84
2360	107.65	123.73	110.06
2380	105.84	121.15	108.11
2400	107.46	124.11	108.72
2420	94.22	115.21	95.41
2440	93.32	113.82	91.62
2460	92.86	110.82	94.22
2480	92.72	109.87	94.65
2500	93.19	110.19	95.54
2520	92.18	110.19	95.69
2540	91.64	108.40	96.22
2560	91.58	107.21	95.52
2580	92.17	107.70	96.05
2600	92.23	108.40	96.10
2620	92.27	108.27	96.61
2640	92.16	108.19	96.95
2660	91.61	107.36	97.41
2680	92.00	108.50	98.36
2700	91.91	107.96	98.01
2720	91.74	107.89	97.31
2740	91.63	107.80	96.83
2760	90.84	107.78	95.71
2780	91.40	107.24	95.73

Continuación tabla 8.4.

Tiempo (s)	Medidas temperatura en el tubo receptor simple con fluido estacionario		
	$T_{A,prom}$	$T_{B,prom}$	$T_{C,prom}$
2800	89.94	105.87	94.39
2820	88.99	105.49	94.99
2840	89.28	103.58	94.45
2860	89.04	104.38	95.40
2880	89.06	105.72	95.21
2900	90.16	106.67	94.54
2920	90.52	106.18	96.11
2940	90.58	106.91	96.61
2960	90.35	105.93	96.08
2980	88.90	103.68	93.84
3000	90.54	104.62	94.46
3020	89.51	104.92	95.02
3040	89.68	106.25	95.24
3060	90.19	105.92	96.34
3080	89.30	104.83	94.42
3100	88.46	103.64	92.88
3120	87.31	102.40	92.39
3140	87.75	101.37	91.43
3160	86.68	100.96	91.86
3180	88.23	101.39	93.14
3200	86.77	100.96	92.81
3220	86.59	101.19	92.69
3240	86.86	101.60	91.95
3260	86.38	100.09	91.22

**Tabla 8.5.**

Valores de temperatura promedio en los diferentes puntos de medida del tubo receptor compuesto con fluido estacionario.

Tiempo (s)	Medida temperatura tubo receptor compuesto con fluido estacionario		
	T <sub>A,prom</sub>	T <sub>B,prom</sub>	T <sub>C,prom</sub>
0	39.58	40.02	41.96
20	39.78	40.21	42.17
40	43.67	37.20	47.06
60	46.73	44.07	52.25
80	48.57	47.33	52.84
100	49.87	49.03	54.58
120	52.09	52.53	60.92
140	54.49	54.62	65.50
160	56.18	57.04	70.00
180	55.79	58.49	73.68
200	59.16	61.22	77.25
220	60.09	63.44	80.92
240	59.92	65.48	84.09
260	62.31	66.04	85.95
280	62.40	69.06	88.43
300	62.77	71.96	90.42
320	64.04	73.33	91.75
340	66.51	75.11	92.96
360	69.12	76.42	94.49
380	71.23	76.95	97.16
400	73.62	81.03	99.86
420	74.88	86.38	102.17
440	77.28	88.76	103.92
460	79.45	89.39	103.28
480	81.01	91.84	104.28
500	82.40	93.81	106.04

Continuación tabla 8.5.

Tiempo (s)	Medida temperatura tubo receptor compuesto con fluido estacionario		
	$T_{A,prom}$	$T_{B,prom}$	$T_{C,prom}$
520	84.50	95.45	107.84
540	85.80	97.66	109.60
560	86.20	99.25	111.53
580	87.36	100.72	113.66
600	89.72	103.71	116.78
620	91.66	106.34	119.09
640	93.36	107.84	121.12
660	96.00	110.94	122.85
680	98.93	112.58	124.64
700	100.38	115.38	126.98
720	101.62	116.68	128.49
740	103.70	120.00	131.02
760	105.61	123.02	132.72
780	107.28	124.73	134.18
800	108.41	125.31	135.57
820	109.63	127.17	137.01
840	110.85	128.77	126.60
860	116.01	128.48	128.91
880	119.54	130.39	130.33
900	121.31	131.23	132.39
920	122.81	133.61	133.87
940	125.11	134.78	135.57
960	125.82	135.11	136.63
980	128.10	136.76	138.37
1000	129.42	137.88	139.53
1020	130.98	138.77	140.78
1040	131.47	139.96	141.79
1060	132.07	136.62	143.01
1080	134.43	139.24	143.40

Continuación tabla 8.5.

Tiempo (s)	Medida temperatura tubo receptor compuesto con fluido estacionario		
	$T_{A,prom}$	$T_{B,prom}$	$T_{C,prom}$
1100	135.67	141.24	144.58
1120	138.58	141.67	145.92
1140	140.04	142.76	146.94
1160	141.02	143.20	147.88
1180	140.10	144.23	148.63
1200	142.27	144.75	149.00
1220	143.03	145.26	148.57
1240	142.43	145.35	148.98
1260	143.68	145.88	149.18
1280	144.18	145.74	150.08
1300	140.22	147.39	151.93
1320	147.23	147.42	153.22
1340	145.89	147.75	153.32
1360	147.01	148.23	153.74
1380	148.16	146.84	154.26
1400	145.65	149.28	155.73
1420	146.37	150.62	156.05
1440	148.70	151.58	156.84
1460	146.89	150.92	157.13
1480	149.51	153.28	157.47
1500	149.47	153.29	157.39
1520	146.18	153.42	158.03
1540	147.42	154.28	157.27
1560	150.51	155.97	152.35
1580	151.38	156.33	152.79
1600	153.31	156.19	153.29
1620	155.19	156.40	153.43
1640	155.55	155.80	155.01
1660	156.96	157.51	157.07

Continuación tabla 8.5.

Tiempo (s)	Medida temperatura tubo receptor compuesto con fluido estacionario		
	$T_{A,prom}$	$T_{B,prom}$	$T_{C,prom}$
1680	157.96	157.88	158.11
1700	158.92	158.46	159.56
1720	158.90	156.95	160.06
1740	159.79	159.27	161.27
1760	158.53	158.68	161.39
1780	158.64	157.47	161.66
1800	158.93	157.05	161.83
1820	159.16	159.31	162.13
1840	159.46	157.11	162.44
1860	159.46	159.76	162.91
1880	158.56	158.66	163.15
1900	159.82	155.50	160.57
1920	160.00	157.26	163.13
1940	160.54	156.81	164.20
1960	149.23	156.48	163.75
1980	156.95	155.93	163.43
2000	157.15	156.43	163.91
2020	155.98	155.96	163.62
2040	156.78	155.18	162.85
2060	156.08	155.55	162.31
2080	155.52	156.88	163.48
2100	155.57	156.15	163.54
2120	154.59	156.89	163.86
2140	153.81	156.76	164.29
2160	155.57	155.61	163.90
2180	149.16	148.05	160.93
2200	142.97	136.79	156.91
2220	139.83	135.69	154.92
2240	132.11	130.49	145.70

Continuación tabla 8.5.

Tiempo (s)	Medida temperatura tubo receptor compuesto con fluido estacionario		
	$T_{A,prom}$	$T_{B,prom}$	$T_{C,prom}$
2260	122.64	123.35	136.06
2280	115.35	117.29	129.12
2300	119.56	118.38	129.09
2320	119.60	122.11	133.58
2340	121.58	122.48	126.44
2360	116.67	105.67	132.35
2380	96.95	100.29	111.01
2400	72.07	53.41	64.15
2420	49.71	44.58	49.69

**Tabla 8.6.**

Valores de temperatura promedio en los diferentes puntos de medida del tubo receptor simple y compuesto con fluido estacionario.

Tiempo (s)	Tubo receptor simple con fluido estacionario	Tubo receptor compuesto con fluido estacionario
	$T_{C,prom}$ (TS)	$T_{C,prom}$ (TC)
0	47.18	41.96
20	47.18	42.17
40	58.84	47.06
60	68.48	52.25
80	72.60	52.84
100	75.40	54.58
120	77.68	60.92
140	78.97	65.50
160	83.55	70.00
180	86.09	73.68
200	88.26	77.25
220	90.68	80.92
240	93.83	84.09

Continuación tabla 8.6.

Tiempo (s)	Tubo receptor simple con fluido estacionario	Tubo receptor compuesto con fluido estacionario
	$T_{C,prom} (TS)$	$T_{C,prom} (TC)$
260	95.60	85.95
280	95.53	88.43
300	97.73	90.42
320	98.22	91.75
340	99.01	92.96
360	98.29	94.49
380	101.24	97.16
400	101.89	99.86
420	103.51	102.17
440	102.38	103.92
460	105.45	103.28
480	105.18	104.28
500	106.00	106.04
520	107.20	107.84
540	105.64	109.60
560	106.09	111.53
580	108.33	113.66
600	110.54	116.78
620	113.02	119.09
640	112.81	121.12
660	114.56	122.85
680	114.52	124.64
700	114.82	126.98
720	113.71	128.49
740	116.73	131.02
760	117.70	132.72
780	118.13	134.18
800	119.14	135.57
820	120.91	137.01

Continuación tabla 8.6.

Tiempo (s)	Tubo receptor simple con fluido estacionario	Tubo receptor compuesto con fluido estacionario
	$T_{C,prom} (TS)$	$T_{C,prom} (TC)$
840	121.39	126.60
860	122.81	128.91
880	122.79	130.33
900	121.92	132.39
920	119.18	133.87
940	121.08	135.57
960	123.87	136.63
980	124.45	138.37
1000	125.51	139.53
1020	126.48	140.78
1040	126.44	141.79
1060	125.82	143.01
1080	128.08	143.40
1100	128.83	144.58
1120	127.13	145.92
1140	130.48	146.94
1160	124.44	147.88
1180	120.66	148.63
1200	123.91	149.00
1220	126.63	148.57
1240	128.37	148.98
1260	127.34	149.18
1280	129.38	150.08
1300	126.88	151.93
1320	122.35	153.22
1340	119.62	153.32
1360	117.10	153.74
1380	117.30	154.26
1400	118.23	155.73

---

Continuación tabla 8.6.

Tiempo (s)	Tubo receptor simple con fluido estacionario	Tubo receptor compuesto con fluido estacionario
	$T_{C,prom}$ (TS)	$T_{C,prom}$ (TC)
1420	122.12	156.05
1440	124.66	156.84
1460	126.96	157.13
1480	126.63	157.47
1500	126.62	157.39
1520	128.07	158.03
1540	127.05	157.27
1560	126.36	152.35
1580	125.13	152.79
1600	128.23	153.29
1620	125.75	153.43
1640	125.81	155.01
1660	124.44	157.07
1680	119.16	158.11
1700	118.13	159.56
1720	117.02	160.06
1740	115.37	161.27
1760	115.16	161.39
1780	115.72	161.66
1800	114.94	161.83
1820	116.78	162.13
1840	116.12	162.44
1860	117.34	162.91
1880	118.04	163.15
1900	118.01	160.57
1920	117.57	163.13
1940	117.54	164.20
1960	116.67	163.75
1980	117.40	163.43

---

Continuación tabla 8.6.

Tiempo (s)	Tubo receptor simple con fluido estacionario	Tubo receptor compuesto con fluido estacionario
	$T_{C,prom}$ (TS)	$T_{C,prom}$ (TC)
2000	118.45	163.91
2020	116.35	163.62
2040	115.65	162.85
2060	116.75	162.31
2080	118.72	163.48
2100	116.67	163.54
2120	115.14	163.86
2140	116.51	164.29
2160	115.64	163.90
2180	116.38	160.93
2200	117.97	156.91
2220	117.56	154.92
2240	116.80	145.70
2260	117.27	136.06
2280	116.74	129.12
2300	116.98	129.09
2320	116.20	133.58
2340	112.84	126.44
2360	110.06	132.35
2380	108.11	111.01
2400	108.72	64.15
2420	95.41	49.69

---