



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y  
VINCULACIÓN CON LA COLECTIVIDAD**

**MAESTRIA EN ENERGÍAS RENOVABLES  
II PROMOCIÓN**

**TESIS DE GRADO MAESTRIA EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**TEMA: “CARACTERIZACIÓN DE UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN  
HORIZONTAL Y UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN POR RADIACIÓN  
SOLAR CONCENTRADA”**

**AUTOR: ING. ROMAN MAURICIO BUÑAY ANDRADE**

**DIRECTOR: ING. MSC. GUASUMBA, JOSÉ**

**SANGOLQUÍ – ECUADOR**

**FEBRERO, 2015**

## CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR

El suscrito Ing. José Guasumba Codena MSc., con cédula de identidad No. 1708318751, en calidad de Director de Tesis de la Maestría en Energías Renovables,

### CERTIFICA

Que el presente proyecto de grado que lleva como título, **“CARACTERIZACIÓN DE UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN HORIZONTAL Y UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN POR RADIACIÓN SOLAR CONCENTRADA”** realizado por el Ingeniero Román Mauricio Buñay Andrade, de nacionalidad ecuatoriana, con cédula de identidad No. 0103900775, como requisito para la obtención del título de Magíster en Energías Renovables, II Promoción de la ESPE, fue desarrollada bajo mi dirección y asesoría. La misma que cumple con los requerimientos científicos, tecnológicos y académicos, razón por la cual autorizo su presentación y defensa.

Sangolquí, 02 de febrero de 2015



ING. JOSE GUASUMBA CODENA., MSc.

**DIRECTOR**

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

**ROMAN MAURICIO BUÑAY ANDRADE**

### DECLARA QUE:

El proyecto de posgrado denominado “**CARACTERIZACIÓN DE UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN HORIZONTAL Y UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN POR RADIACIÓN SOLAR CONCENTRADA**”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 02 de febrero de 2015



ING. ROMAN MAURICIO BUÑAY ANDRADE

**AUTOR**

## AUTORIZACIÓN

Yo,

**ROMAN MAURICIO BUÑAY ANDRADE**

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución, el trabajo titulado “**CARACTERIZACIÓN DE UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN HORIZONTAL Y UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN POR RADIACIÓN SOLAR CONCENTRADA**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 02 de febrero de 2015



ING. ROMAN MAURICIO BUÑAY ANDRADE

**AUTOR**

## **DEDICATORIA**

**A la persona que a pesar que lea este mensaje no se imaginará nunca lo que ha causado en mi vida. Su llegada no solo cambio mi perspectiva sino que alteró fuertemente mi existencia, en los últimos años ha soportado mi desatención y a pesar de ello continúa apoyado mis decisiones y proyectos,**

**A ti, Karla Viviana.**

**Y también a quien ha dado firmeza a mi existencia, me dedicó su vida durante mi infancia y adolescencia y que con su esfuerzo rutinario supo darnos el ejemplo de perseverancia a mí y a mis hermanas,**

**Para usted Teresita**

*Román Mauricio*

*Febrero 2015*

## AGRADECIMIENTO

Quienes podemos tener en frente retos cada vez más grandes y al parecer inalcanzables, y a pesar de ellos, no hemos claudicado, podemos dar fe de que para alcanzar los objetivos se requiere un gran mentor y el apoyo de quienes transitan en la existencia con nosotros, se cumple así aquella afirmación de Newton siglos atrás respecto a que “*Si he logrado ver más lejos, ha sido porque he subido a hombros de gigantes*”, agradezco por ello los aportes valiosos de mi director y de mi familia, a quien además debo agradecer por ser críticos, pero también comprensivos con mi trabajo.

*Román Mauricio*

*Febrero 2015*

## Contenido

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR .....	I
DIRECTOR .....	I
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	II
AUTORIZACIÓN .....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE ANEXOS .....	XI
RESUMEN .....	XII
ABSTRACT .....	XIII
CARACTERIZACIÓN DE UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN HORIZONTAL Y UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN POR RADIACIÓN SOLAR CONCENTRADA.....	XIV
<b>CAPITULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....	3
1.5 ALCANCE .....	3
<b>CAPITULO 2.....</b>	<b>4</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
2.1 DEFINICIÓN CALDEROS .....	4
2.2 TIPOS DE CALDEROS.....	5
<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>7</b>
<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>7</b>
3.1 CONCENTRADORES DE RADIACIÓN SOLAR.....	7
3.2 CALDERO DE VAPORIZACIÓN CON CONCENTRADOR PARABÓLICO .....	10
3.3 SISTEMAS DE CALENTAMIENTO POR ENERGÍA MECÁNICA DE ROTACIÓN .....	17
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>25</b>
<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>25</b>
4.1 MATERIALES Y EQUIPOS.....	25

4.2	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN .....	25
4.3	PROCEDIMIENTO .....	30
4.4	DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO .....	32
4.5	PRUEBAS DE CALENTAMIENTO POR CONCENTRACIÓN .....	34
4.6	ENSAYO DEL CALENTADOR POR ENERGÍA MECÁNICA DE ROTACIÓN .....	36
<b>CAPITULO 5.....</b>		<b>38</b>
<b>ANALISIS DE RESULTADOS .....</b>		<b>38</b>
5.1	TABULACIÓN DE DATOS OBTENIDOS.....	38
5.2	ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	43
5.3	DESARROLLO DE CORRELACIONES MATEMÁTICAS .....	47
5.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE CALDEROS .....	52
5.5	APLICACIONES FUTURAS.....	59
<b>CAPITULO 6.....</b>		<b>61</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>61</b>
6.1	CONCLUSIONES .....	61
6.2	RECOMENDACIONES.....	63
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>64</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>66</b>
<b>LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO .....</b>		<b>77</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Diagrama Básico Caldero .....	5
<b>Figura 2</b> Región formada por el cilindro y el paraboloides .....	12
<b>Figura 3</b> Geometría y Sistema de Coordenadas .....	17
<b>Figura 4</b> Modelo de generación de calor por fricción .....	19
<b>Figura 5</b> Caldero de Vaporización Horizontal, Volumen de Control .....	21
<b>Figura 6</b> Tacómetro resultado en RPM de 0 a 1000 .....	25
<b>Figura 7</b> Medidor de Temperatura sobre superficies con Láser.....	26
<b>Figura 8</b> Medidor de Radiación Solar .....	26
<b>Figura 9</b> Nivel con burbuja de agua .....	27
<b>Figura 10</b> Anemómetro .....	27
<b>Figura 11</b> Hidrotermómetro .....	27
<b>Figura 12</b> Medidor de Temperatura en Tubería .....	28
<b>Figura 13</b> Medidor de Presión en Tubería .....	28
<b>Figura 14</b> Cámara Termográfica .....	29
<b>Figura 15</b> Termómetro con 8 termocuplas .....	29
<b>Figura 16</b> Ubicación Localidad de Experimentación.....	34
<b>Figura 17</b> Curva Irradiancia Experimento 1 .....	43
<b>Figura 18</b> Curva Irradiancia Experimento 2 .....	43
<b>Figura 19</b> Curva Irradiancia Experimento 3 .....	44
<b>Figura 20</b> Curva Temperatura Absorbedor Experimento 1 .....	44
<b>Figura 21</b> Curva Temperatura Absorbedor Experimento 2 .....	45
<b>Figura 22</b> Curva Temperatura Absorbedor Experimento 3 .....	45
<b>Figura 23</b> Curvas de Temperatura en superficie CVH 1.....	46
<b>Figura 24</b> Curvas de Temperatura en superficie CVH 2.....	46
<b>Figura 25</b> Curvas de Temperatura en superficie CVH 3.....	47
<b>Figura 26</b> Curva Temperatura Caldero Vs Irradiancia Experimento 1 .....	48
<b>Figura 27</b> Curva Temperatura Caldero Vs Irradiancia Experimento 2.....	48
<b>Figura 28</b> Curva Temperatura Caldero Vs Irradiancia Experimento 3.....	49
<b>Figura 29</b> Curva en Zona de Fricción Experimento 2.....	49
<b>Figura 30</b> Imagen Termográfica zona de fricción Bronce-Acero .....	50
<b>Figura 31</b> Curva en Zona de Fricción Experimento 3.....	50

<b>Figura 32</b> Imagen Termográfica superficie del Caldero CVH.....	51
<b>Figura 33</b> Curva Presión-Temperatura en CVH .....	51
<b>Figura 34</b> Curva de Corriente de Fase vs Velocidad de Giro .....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Ubicación Sensores de Temperatura (mm) .....	34
<b>Tabla 2</b> Datos Localidad de Experimentación .....	34
<b>Tabla 3</b> Datos Experimento con Caldero Solar .....	35
<b>Tabla 4</b> Datos experimentales de Temperatura en el Caldero Horizontal.....	36
<b>Tabla 5</b> Datos ensayo N <sup>a</sup> 1 con Concentrador Solar .....	38
<b>Tabla 6</b> Datos ensayo N <sup>a</sup> 2 Concentrador Solar .....	39
<b>Tabla 7</b> Datos ensayo N <sup>a</sup> 3 Concentrador Solar .....	39
<b>Tabla 8</b> Datos Experimento CVH N <sup>a</sup> 1parte A .....	40
<b>Tabla 9</b> Datos Experimento CVH N <sup>a</sup> 1parte B.....	40
<b>Tabla 10</b> Datos Experimento CVH N <sup>a</sup> 2 parte A .....	41
<b>Tabla 11</b> Datos Experimento CVH N <sup>a</sup> 2 parte B.....	41
<b>Tabla 12</b> Datos Experimento CVH N <sup>a</sup> 3parte A .....	42
<b>Tabla 13</b> Datos Experimento CVH N <sup>a</sup> 3 parte B.....	42
<b>Tabla 14</b> Tabla con Potencia y Energía Eléctrica .....	52
<b>Tabla 15</b> Datos Tasa de Producción de Vapor Ensayo 1 .....	53
<b>Tabla 16</b> Datos Tasa de Producción de Vapor Ensayo 2 .....	53
<b>Tabla 17</b> Datos Tasa de Producción de Vapor Ensayo 3 .....	54
<b>Tabla 18</b> Datos Característicos del Caldero Solar.....	54
<b>Tabla 19</b> Eficiencia en los diferentes ensayos del Caldero Solar.....	55
<b>Tabla 21</b> Datos Experimento 1 con CVH .....	56
<b>Tabla 22</b> Datos Experimento 2 con CVH .....	56
<b>Tabla 23</b> Datos Experimento 3 con CVH .....	57
<b>Tabla 25</b> Características de Operación del Caldero de Vaporización Horizontal.....	57

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO 1</b> Tablas De Datos Experimentales Caldero Solar.....	67
<b>ANEXO 2</b> Tablas De Datos Experimentales Caldero Por Fricción.....	69
<b>ANEXO 3</b> Imágenes Termográficas Del Caldero Horizontal En Funcionamiento. .	72

## RESUMEN

El desarrollo de nuevas tecnologías para aprovechamiento de energías alternativas, ha propiciado así mismo, la investigación de nuevos calderos que sean adaptables a la fuente de energía primaria con el fin de aprovechar de mejor manera la misma, aumentando la eficiencia de transformación de energía. Este estudio se enfoca en dos calderos específicos, uno de ellos que presenta una novedad científica, el aprovechamiento de la energía de fricción para la producción de vapor, al cual se le denomina el Caldero de Vaporización Horizontal y el otro es el Caldero de Vaporización por Radiación Solar Concentrada, cuya tecnología en la actualidad ha sido estudiada por varios autores y que para nuestro caso, se trata de un desarrollo realizado como un prototipo de investigación para evaluar los resultados de experimentación. Se han realizado varios ensayos controlados en laboratorio, para poder obtener datos experimentales. De igual manera se presenta el modelo matemático, para el cálculo de los resultados numéricos del prototipo y complementariamente, se analiza los resultados experimentales que permiten caracterizar la operación de cada prototipo. Se muestran asimismo los análisis comparativos entre los dos calderos, para evaluar los resultados energéticos y de producción de vapor, ya sea para la transferencia de energía o aplicaciones de aprovechamiento de energía térmica. Se aprecia una eficiencia superior del caldero solar con el 64% en contraste con la eficiencia del caldero de vaporización horizontal con el 11,2%. Los valores de elevación de temperatura máximos alcanzados en el CVH (164°C), son superiores a los del Caldero Solar (89.3°C).

**Palabras clave:**

**FRICCIÓN**

**CALDERO HORIZONTAL**

**ENERGÍA TÉRMICA**

**ROTACIÓN**

**APLASTAMIENTO.**

## ABSTRACT

The development of new technologies to use alternative energy, has led likewise, research into new boilers that are adaptable to the primary energy source in order to make better use of it, increasing the efficiency of energy transformation. This study focuses on two specific boilers, one of them having a scientific novelty, as is the use of friction energy to produce steam, which is called the Horizontal Steaming Boiler and the other is the Steaming Boiler of Concentrated Solar Radiation, whose technology today has been studied by several authors and is a development designed as a research prototype to evaluate the results of experimentation for our case. There have been several controlled laboratory tests to obtain experimental data. Similarly, the mathematical model for calculating the numerical results of the prototype and additionally, the experimental results allow to characterize the operation of each prototype analyzes is presented. Comparative analysis between the two boilers are also shown, to evaluate the energy performance and steam production, either for energy transfer applications or use of thermal energy. Superior efficiency of the solar boiler is seen with 64% in contrast to the low efficiency of the horizontal vaporization boiler 11.2%. The elevate values of maximum temperature reached in the CVH (164 ° C), are higher than Solar Boiler (89.3 ° C).

**Key Words:**

**FRICTION**

**HORIZONTAL BOILER**

**THERMAL ENERGY**

**ROTATION**

**COMPRESSION.**

## CARACTERIZACIÓN DE UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN HORIZONTAL Y UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN POR RADIACIÓN SOLAR CONCENTRADA

La investigación y desarrollo de fuentes alternativas de energía ha permitido disponer de nuevos prototipos en la materia de utilización de la energía solar y la energía térmica para aplicaciones domésticas como la calefacción de viviendas, cocción de alimentos, desinfección y tareas de limpieza o esterilización, y también aplicaciones industriales como son procesos calentados por vapor, generación de energía eléctrica, procesos de esterilización, hidratación y humidificación, entre otras aplicaciones; es así que el presente estudio considera el vaporizador por radiación solar concentrada y el generador de vapor de tipo horizontal por fricción, los cuales son dos prototipos que se encuentran en desarrollo. Se realizará por ello el análisis que permita la caracterización de estos dos modelos de vaporizadores, con el fin de tener una valoración de los mismos en función de los parámetros fundamentales como son la presión, temperatura de trabajo, eficiencia y rango de operación. Siendo esta comparación necesaria pero no excluyente, ya que la disponibilidad del recurso energético será primordial al momento de seleccionar uno u otro caldero. Para llevar adelante este experimento se han equipado los prototipos, con instrumentos adecuados de medición y registro, con el fin de que los datos que resulten de los ensayos y pruebas de laboratorio sean fiables para nuestro estudio y para la parametrización de los mismos. El caldero de vaporización horizontal se desarrolló utilizando conceptos de fricción como el que se plantea en el estudio de (Wen-Lih Chen, 2008), el cual plantea un algoritmo inverso basado en el método de gradiente conjugado y el principio discrepancia para estimar la incógnita de generación de calor dependiente del tiempo en la interfaz de barras cilíndricas durante el proceso de fricción. El fundamento matemático del caldero de vaporización horizontal está presentado en el trabajo de (Guasumba, 2014), en donde se realiza el ensayo experimental del prototipo obteniendo resultados referentes a la producción de vapor a temperaturas de entre 120 y 180 °C con un elemento móvil de acero y un elemento estático de bronce en el lado del caldero, mismo que tiene un intercambiador de calor

que permite la distribución del calor generado por fricción en el caldero; siendo este modelo de prototipo el empleado en análisis más adelante.

Para el caso de concentradores parabólicos de radiación solar, se considera el prototipo y el procedimiento de experimentación desarrollado por el Centro de Investigaciones Tecnológicas, Energéticas y Ambientales (CITECNIA) el 2005. En dicho estudio también se realiza el diseño y construcción de un prototipo de caldero solar con aplicación como cocina solar que considera la forma de un paraboloide en revolución. Es por ello que para el análisis comparativo se tienen dos prototipos de calderos que serán evaluados y caracterizados en base a un conjunto de experimentos que se realizan con el fin de determinar las ventajas del uso de cada uno de ellos en diferentes aplicaciones.

# **CAPITULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

La operación de calderos con radiación solar concentrada, ha sido demostrada con su aplicación a motores Stirling o para usos más cotidianos como la cocción de alimentos, sin embargo, se pueden investigar otras aplicaciones de esta tecnología con el fin de verificar su validez o no en diferentes campos.

El vapor generado podría tener varios usos en diversas aplicaciones como la generación de energía eléctrica, esterilización, hidratación, humidificación o limpieza, siendo por ello necesario experimentar las ventajas y desventajas que presentaría en su funcionamiento general.

El caldero de vaporización horizontal aprovecha la energía de fricción para producir vapor con volúmenes determinados de agua. Es necesario conocer las ecuaciones que gobiernen el funcionamiento de este equipo que puede tener aplicaciones en diversos campos en donde se tiene necesidad de aplicar por ejemplo frenado a máquinas giratorias o control de velocidad de generadores eólicos.

Ambos prototipos mencionados están contruidos, por lo que se hace necesario realizar un análisis de los resultados que pueden presentarse con experimentos controlados.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

La investigación y desarrollo buscará una alternativa de solución para la generación de vapor utilizando energía solar concentrada o energía producida por fricción, con el fin de utilizarla en la calefacción de una vivienda, realizando la caracterización de ambas propuestas que permitan tener argumento de decisión para su aplicación en condiciones de un entorno rural de una vivienda de páramo sobre los 2500 msnm.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Caracterización energética entre un caldero de vaporización por radiación solar concentrada y un generador de vapor de tipo horizontal.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a. Analizar las variables de generación de vapor entre un caldero de vaporización por radiación solar concentrada y un generador de vapor horizontal
- b. Extraer parámetros de los ensayos de campo, para determinar el comportamiento y los valores de eficiencia en cada caso.
- c. Realizar el modelado matemático de ambas opciones en función de los datos y parámetros de experimentación.

- d. Evaluar los resultados obtenidos y proponer la alternativa a usar, de entre las dos opciones de generación de vapor analizadas.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

El potencial que dispone el Ecuador referente a la energía solar es una importante motivación para realizar investigación destinada a utilizar de manera adecuada el recurso disponible, siendo para ello necesario evaluar los parámetros de eficiencia de los prototipos y modelos que se pueden emplear con el fin de aprovechar la energía solar.

Es por ello que se debe estudiar y experimentar con los modelos existentes para caracterizarlos y visualizar con esto las ventajas y desventajas que presentan de acuerdo a la aplicación que se desee dar a dichos equipos.

Los resultados de este proceso serán las evidencias para justificar o no la aplicación en un determinado uso, sabiendo de antemano que no solo esperaremos que sean eficientes y con múltiples ventajas sino que buscaremos además mostrar las posibles desventajas que presentan en determinadas condiciones o aplicaciones.

Es importante considerar como beneficiaria del proyecto de tesis investigativa a la Universidad de las Fuerzas Armadas, quien ha apostado por el desarrollo local de tecnologías alternativas con talento humano local y propuestas nuevas en el campo de las energías.

## **1.5 ALCANCE**

Obtener valores experimentales para realizar la comparación de los parámetros de cada uno de los equipos analizados y determinar con ello la eficiencia de cada uno.

## **CAPITULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 DEFINICIÓN CALDEROS**

El caldero se define como un equipo para la generación de vapor de agua a presiones superiores a la atmosférica. Es así que este vapor puede ser utilizado para la generación de energía mecánica, energía eléctrica o para suministrar calor a un proceso industrial.

A continuación en la figura 2.1, se muestra un diagrama básico con los componentes y el principio de funcionamiento.



**Figura 1** Diagrama Básico Caldero

## 2.2 TIPOS DE CALDEROS

Hay que considerar que la clasificación que se realiza a continuación no es estricta y que hace referencia al tipo de intercambio predominante en las superficies de vaporización; es así que no se consideran los intercambios que se producen en las superficies de recuperación.

Raramente en los calderos se tiene intercambio solo por radiación y solamente por convección, es así que todos los calderos cuentan con ambos tipos de intercambio de calor.

En el hogar, predominantemente el intercambio se produce desde la llama, sin embargo, se puede producir intercambio por convección debido al flujo de humos, adicionalmente podemos tener intercambio de calor por radiación desde los gases a alta temperatura.

### 2.2.1. RADIANTES O DE RADIACIÓN TOTAL

Se consideran así a los calderos que únicamente cuentan con hogar y ahí, se puede determinar que el calor es intercambiado por radiación.

Se puede decir, que en general se trata de calderas acuotubulares de gran tamaño, donde los tubos de generación de vapor conforman las paredes del hogar. Las altas temperaturas generadas en el hogar, provocan un intercambio muy importante de

calor por radiación. Además estas calderas trabajan a presiones elevadas, con lo que el calor de vaporización necesario es relativamente bajo, y al utilizar agua de alimentación previamente calentada hasta temperaturas muy cercanas a la de saturación, se consigue que las paredes de los tubos del hogar sean suficientes para transferir todo el calor de vaporización necesario.

### **2.2.2. CONVECTIVOS**

Se consideran dentro de esta clasificación, a los calderos HRSG (Heath Recovery Steam Generator), sin cámara de combustión. Utilizan un fluido caliente como fuente de calor, producto de algún proceso previo en la misma industria o aplicación, (hornos de fundición, hornos de vidrio, turbinas de gas, motores diésel). El proceso convectivo del intercambiador de calor es el predominante para este caso.

### **2.2.3. DE CALENTAMIENTO INDIRECTO**

Son calderas de fluidos térmicos en las que se realiza el calentamiento de un fluido intermedio, típicamente un aceite, y este es el que, al circular por un intercambiador de calor, genera el vapor de agua. Se debe tener presente que el fluido es nuevamente recirculado hacia el caldero.

## CAPITULO 3

### ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 CONCENTRADORES DE RADIACIÓN SOLAR

##### 3.1.1. COLECTORES FOCALIZADORES

Los sistemas de concentración solar basan su tecnología en colectores focalizadores. Con estos es fácil obtener temperaturas mucho más altas, pero usualmente cuestan más, necesitan siempre seguir el sol y sólo utilizan la radiación directa del sol. Al focalizar la radiación solar se pueden obtener temperaturas de 3500°C o mayores dependiendo de la perfección óptica del sol.

La tasa de calor entregada con colectores focalizadores es similar a la calculada para colectores de placa plana:

$$H_n \cdot A_c \cdot r \cdot s \cdot \alpha = q_o \cdot A_t \quad (3.1)$$

En donde  $H_n$  es la radiación directa por unidad de área,  $A_c$  corresponde al área proyectada por el espejo focalizador,  $r$  es la reflectividad efectiva del material,  $s$  es un factor de forma del colector,  $\alpha$  es la absorptividad del receptor,  $q_o$  es la tasa a la cual el calor por radiación es absorbido por unidad de área por el receptor y  $A_t$  es el área del receptor.

La eficiencia del colector se describe por medio de la fórmula:

$$\eta = 1 - \frac{(q_r + q_a + q_c) \cdot A_t}{H_n \cdot A_c \cdot r \cdot s \cdot \alpha} \quad (3.2)$$

El radio de concentración efectivo es un parámetro muy importante en estos sistemas y de este depende la ventaja que tienen sobre los colectores de placa plana:

$$RC = A_c / A_t \quad (3.3)$$

De aquí que las eficiencias de los concentradores sean tan altas ya que se pueden llegar a tener radios de concentración de 1000:1.

### 3.1.2. TIPOS DE CONCENTRADORES

En la actualidad se pueden encontrar tres tipos de sistemas de concentración de energía solar: Los concentradores, las torres de potencia y los disco/motores, esto según la clasificación por la forma como colectan la energía solar.

#### a. Sistemas concentradores

Son ejemplos de estos sistemas aquellos en los que la energía del sol se concentra por reflectores en forma de canal parabólicamente curvados a una tubería receptora que se ubica a lo largo del interior de la superficie curvada. Esta energía calienta aceite que fluye a través de la tubería, y la energía calorífica es luego usada para generar electricidad en un generador a vapor convencional. Un campo colector abarca muchos concentradores en filas paralelas alineadas en los ejes norte-sur. Esta configuración permite a los concentradores de un eje perseguir el sol de este a oeste durante el día para asegurarse que el sol este continuamente enfocado en las tuberías receptoras. Sistemas concentradores individuales pueden generar cerca de 80 MW de electricidad. Algunos diseños de concentradores pueden incorporar almacenamiento térmico dejando a un lado el fluido de transferencia de calor en su fase caliente permitiendo la generación eléctrica algunas horas en la noche. Generalmente, las

plantas de concentradores parabólicos son híbridas, es decir usan combustible fósil para complementar el déficit solar en los periodos de baja radiación.

### **b. Sistemas de torres de potencia**

En estos sistemas la energía del sol es captada y concentrada por un campo de cientos o incluso miles de espejos denominados helióstatos hacia un receptor localizado en la cumbre de una torre. Esta energía transfiere calor a la sal derretida que fluye a través del receptor y la energía calorífica de la sal es usada posteriormente para generar electricidad en un generador a vapor convencional. La sal derretida retiene el calor eficientemente, así que este se puede almacenar por horas o incluso días antes de ser usado para la generación eléctrica. Cuando se necesita energía de la planta, la sal caliente es bombeada a un sistema de generación de vapor que produce vapor supercalentado para accionar una turbina y generador. Del generador de vapor, la sal retorna a un tanque frío, donde esta es almacenada y eventualmente recalentada en el receptor. Con almacenamiento térmico, las torres de potencia pueden operar a un factor de planta de 65%, lo que significa que ellas pueden potencialmente operar por 65% del año sin la necesidad de rellenar la fuente de combustible. Sin almacenamiento de energía, las tecnologías solares como esta se limitan a factores de potencia anual del 25%. La capacidad de las torres de potencia de operar por períodos prolongados de tiempo las separa de otras formas de tecnología de energía renovable.

### **c. Sistemas disco/motor**

Un sistema disco/motor es una unidad que opera aislada, compuesta primariamente de un colector, un receptor y un motor. La energía del sol se colecta y se concentra en una superficie con forma de plato a un receptor que absorbe la energía y la transfiere a un fluido de trabajo del motor. El motor convierte el calor a potencia mecánica en una manera similar a los motores convencionales o sea por compresión del fluido de trabajo cuando éste está frío, calentando el fluido de trabajo comprimido, y luego expandiéndolo a través de una turbina o con un pistón para producir trabajo. La potencia mecánica es convertida a potencia eléctrica por un

generador eléctrico o alternador. Los sistemas disco/motor usan colectores de eje dual para perseguir el sol. La forma ideal del concentrador es parabólica, creada por una sola superficie reflectora o por múltiples. Existen muchas opciones para tipos de receptores y motores, incluyendo el motor Stirling y los receptores Brayton. Estos sistemas aún no son comerciales, pero las pruebas han demostrado buen potencial. Sistemas disco/motor individuales pueden generar cerca de 25 KW de electricidad. Se obtiene más capacidad si se conectan juntos los discos. Se pueden combinar en procesos de generación híbrida de energía, para dar continuidad al mismo, con el gas natural.

### **3.2 CALDERO DE VAPORIZACIÓN CON CONCENTRADOR PARABÓLICO**

En general consiste de un elemento captador de radiación con la forma de una parábola que concentra la radiación solar en un punto llamado foco en el cual se encuentra el siguiente elemento que es el caldero.

#### **ANÁLISIS GEOMÉTRICO**

##### **3.2.1. ECUACIÓN DE LA PARÁBOLA**

Una parábola se puede describir como el lugar geométrico de un punto que se mueve en un plano, de tal manera que, su distancia a una recta fija situada en el mismo plano, es siempre igual a su distancia de un punto fijo del plano y que no pertenece a la recta llamado foco. Para encontrar la ecuación de la parábola, se toma como eje focal el eje z.

Una relación importante es la existente entre la distancia focal y el diámetro de la parábola, misma que ese describe a continuación:

$$c = \frac{D}{16\left(\frac{f}{D}\right)} \quad (3.4)$$

En donde:

**D** diámetro de boca de la parábola; **f** distancia focal; **c** profundidad de la parábola en el centro.

### 3.2.2. RELACIÓN ENTRE EL FOCO Y EL DIÁMETRO DE LA PARÁBOLA

Es importante recalcar que cuando un reflector de muy baja relación  $f/D$  con valores menores a 0.25, es muy sensible a los cambios de la intensidad de radiación.

Pequeñas variaciones provocan pérdidas por desadaptación. Además, los reflectores con muy baja relación foco diámetro exigen mayor precisión en la construcción que aquellos con mayor relación  $f/D$ . Un buen compromiso es la utilización de valores que se encuentren dentro del rango que se indican a continuación:

$$0,25 < \frac{f}{D} < 0,6 \quad (3.5)$$

### 3.2.3. ECUACIONES ANALÍTICAS DE LOS PARABOLOIDES

Para el caso del paraboloides elíptico se tiene la siguiente expresión

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = Cz \quad (3.6)$$

Para un paraboloides de revolución el semieje  $a$  es igual al semieje  $b$  por lo que la ecuación anterior se reduce a:

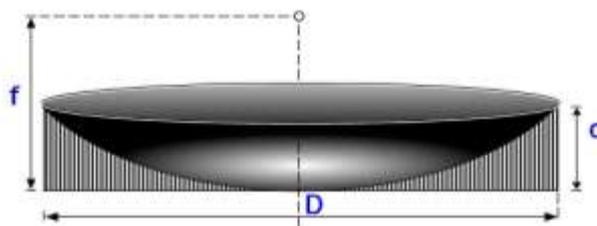
$$x^2 + y^2 = a^2 Cz \quad (3.7)$$

Si al coeficiente literal de la variable  $z$  se lo considera como  $k$  la ecuación del paraboloides de revolución se expresa de la siguiente forma:

$$x^2 + y^2 = kz \quad (3.8)$$

### 3.2.4. VOLUMEN DEL PARABOLOIDE

Para hallar el volumen de un paraboloides de revolución, se necesita restar el volumen del cilindro de diámetro  $D$  y altura  $c$ , con el volumen de la región que se encuentra bajo el paraboloides.



**Figura 2** Región formada por el cilindro y el paraboloides

**Fuente:** (Guasumba, 2005)

El modelo matemático para hallar la fórmula de cálculo del volumen para la región interna, entre cilindro y paraboloides, se presenta a continuación.

El volumen de la región que se encuentra sobre del plano  $xy$ , está limitado por el paraboloides.

$$x^2 + y^2 = kz \quad (3.9)$$

y el cilindro:

$$x^2 + y^2 = a^2 \quad (3.10)$$

Transformando estas expresiones en coordenadas cilíndricas, se tiene respectivamente:

$$z = \frac{\rho^2}{k} \quad (3.11)$$

$$\rho = a \quad (3.12)$$

Entonces, el volumen buscado es:

$$V = 4 \int_{\phi=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\rho=0}^a \int_{z=0}^{\frac{\rho^2}{k}} \rho \cdot dz \cdot d\rho \cdot d\phi \quad (3.13)$$

Por otra parte, el volumen del cilindro es:

$$V_{cil} = \frac{\pi D^2 c}{4} \quad (3.14)$$

Al restar el volumen del cilindro con el de la región, se obtendrá el valor para el volumen del paraboloides de revolución.

### 3.2.5. BALANCE DE ENERGÍA

Realizando un balance de energía, se puede determinar que los concentradores son más eficientes que los colectores planos. El calor útil entregado al fluido de proceso que puede ser agua o aceite térmico, está dado por la energía recibida por el absorbedor menos las pérdidas de calor al medio ambiente es decir:

$$q_u = q_{abs} - q_p = q_{abs} - U_c(T_c - T_a)A_r \quad (3.15)$$

Donde la energía recibida por el absorbedor está dada por

$$q_{abs} = \eta_o A_a G_d \quad (3.16)$$

En donde:  $A_a$  área de apertura,  $A_r$  área del absorbedor,  $G_d$  radiación solar directa incidente sobre el colector,  $T_a$  temperatura ambiente en °C,  $T_c$  temperatura del absorbedor en °C,  $U_c$  coeficiente global de transferencia de calor y  $\eta_o$  eficiencia óptica.

Si la eficiencia instantánea del colector es

$$\eta_c = \frac{q_u}{G_d A_a} \quad (3.17)$$

Entonces:

$$\eta_c = \eta_o - \frac{U_c (T_c - T_a)}{G_d} \frac{1}{Rc} \quad (3.18)$$

Donde la razón de concentración **Rc** está definida como  $Rc = \frac{A_a}{A_r}$ ; **A<sub>a</sub>** representa el área de apertura del paraboloide, **A<sub>r</sub>** es el área del absorbedor.

### 3.2.6. EFICIENCIA ÓPTICA (Almanza & Muñoz, 1993)

Los concentradores parabólicos son los únicos que mantienen una distancia focal constante desde el vértice del propio espejo. El paraboloide de revolución es una superficie producida al girar una parábola alrededor de su eje óptico.

La eficiencia óptica de un canal parabólico es muy semejante al de un paraboloide de revolución y está dada por

$$\eta_o = \rho_R \tau \alpha \gamma F f_t \quad (3.19)$$

En donde: **f<sub>t</sub>** fracción de la apertura no sombreada por soportes y absorbedor; **F** error en el seguimiento; **α** absortancia del absorbedor; **γ** factor de forma que depende de los errores en la pendiente del espejo y de la dispersión que sufre la radiación solar directa incidente; **ρ<sub>R</sub>** reflejancia del espejo y **τ** transmitancia de la envolvente del absorbedor.

Todos estos parámetros son adimensionales y sus valores típicos son del orden de 0,90 a 0,95 con excepción de **ρ<sub>R</sub>** cuyo valor está entre 0,75 y 0,85 según la calidad del reflector. Debido a que el área del absorbedor es reducida, las pérdidas térmicas son pequeñas y principalmente radiativas; para limitar los efectos convectivos no se necesita instalar una cubierta en el absorbedor.

### 3.2.7. COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Para realizar el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor en paredes cilíndricas, es necesario tomar en consideración los siguientes aspectos:

- $r_i$  radio interior del absorbedor
- $r_o$  radio exterior del absorbedor
- $h_i$  coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del fluido de proceso
- $h_o$  coeficiente transferencia de calor por convección debido a la influencia del viento.

Si se define el coeficiente global de transferencia de calor  $U$ , por:

$$U = \frac{1}{A \sum Rt} \quad (3.20)$$

La ecuación indica que el coeficiente global de transferencia de calor,  $U$ , es proporcional al recíproco de la suma de las resistencias térmicas. Para una configuración cilíndrica tenemos:

$$U_o = \frac{1}{r_o / r_i h_i + [r_o \ln(r_o / r_i)] / k + 1 / h_o} \quad (3.21)$$

$$U_i = \frac{1}{1 / h_i + [r_i \ln(r_o / r_i)] / k + r_i / r_o h_o} \quad (3.22)$$

Donde los subíndices  $i$  y  $o$  representan los parámetros internos y externos, respectivamente. Es importante notar que en el caso de una pared cilíndrica, el área de convección es diferente para los dos fluidos; por consiguiente, el coeficiente global de transferencia de calor y el área superficial deben ser compatibles, es decir:

$$q = U_o A_o \overline{\Delta T} = U_i A_i \overline{\Delta T} \quad (3.23)$$

Para el diseño preliminar de intercambiadores de calor, resulta ventajoso poder estimar los coeficientes globales de transferencia de calor. La gran amplitud de los valores citados es causada por la diversidad de materiales (con diferentes conductividades térmicas,  $k$ ) utilizados en intercambiadores de calor y condiciones de flujo (que influyen sobre los coeficientes de película,  $h$ ), así como la configuración geométrica.

### 3.2.8. EFICIENCIA DEL CALDERO CON CONCENTRADOR SOLAR

Para el equipo analizado se tiene las siguientes relaciones que se toman del estudio de (Guasumba, 2005);

La eficiencia instantánea del colector es

$$\eta_c = \frac{q_u}{G_d A_a} \quad (3.24)$$

Entonces:

$$\eta_c = \eta_o - \frac{U_c (T_c - T_a)}{G_d} \frac{1}{Rc} \quad (3.25)$$

Donde la razón de concentración **Rc** está definida como  $Rc = \frac{A_a}{A_r}$ ; **A<sub>a</sub>** representa el área de apertura del paraboloide, **A<sub>r</sub>** es el área del absorbedor.

La eficiencia óptica viene dada por:

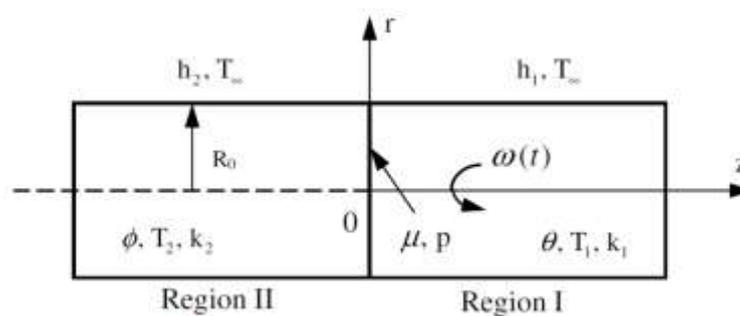
$$\eta_o = \rho_R \tau \alpha F_f f_t \quad (3.26)$$

En donde:  $f_t$  fracción de la apertura no sombreada por soportes y absorbedor;  $F$  error en el seguimiento;  $\alpha$  absortancia del absorbedor;  $\gamma$  factor de forma que depende de los errores en la pendiente del espejo y de la dispersión que sufre la radiación solar directa incidente;  $\rho_R$  reflejancia del espejo y  $\tau$  transmitancia de la envolvente del absorbedor.

Todos estos parámetros son adimensionales y sus valores típicos son del orden de 0,90 a 0,95 con excepción de  $\rho_R$  cuyo valor está entre 0,75 y 0,85 según la calidad del reflector. Debido a que el área del absorbedor es reducida, las pérdidas térmicas son pequeñas y principalmente radiativas; para limitar los efectos convectivos no se necesita instalar una cubierta en el absorbedor.

### 3.3 SISTEMAS DE CALENTAMIENTO POR ENERGÍA MECÁNICA DE ROTACIÓN

Según el planteamiento de (Wen-Lih Chen, 2008), para determinar el calor generado dependiente del tiempo en un proceso de rozamiento de dos barras cilíndricas, en las cuales la barra I gira con una velocidad angular  $\omega(t^*)$ , mientras que la barra II es estacionaria.



**Figura 3** Geometría y Sistema de Coordenadas

**Fuente:** (Wen-Lih Chen, 2008)

Bajo estas condiciones se pueden escribir las siguientes ecuaciones (Wen-Lih Chen, 2008):

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial \theta}{\partial r^*} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^{*2}} = \frac{\partial \theta}{\partial t^*} \quad (3.27)$$

$$r_\alpha \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial \phi}{\partial r^*} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^{*2}} \right) = \frac{\partial \phi}{\partial t^*} \quad (3.28)$$

Las variables adimensionales usadas en la formulación se definen a continuación:

$$r^* = r/R_0 \quad (3.29)$$

$$z^* = z/R_0 \quad (3.30)$$

$$t^* = \alpha_1 t / R_0^2 \quad (3.31)$$

$$r_\alpha = \alpha_2 / \alpha_1 \quad (3.32)$$

$$r_k = k_2 / k_1 \quad (3.33)$$

$$B_1 = h_1 R_0 / k_1 \quad (3.34)$$

$$B_2 = h_2 R_0 / k_2 \quad (3.35)$$

En donde:  $R_0$ : radio de las barras,  $r_k$  y  $r_\alpha$ : relación de conductividad y difusividad térmica,  $B_1$  y  $B_2$ : números de Biot,  $k_1$  y  $k_2$ : coeficientes de conductividad térmica,  $h_1$  y  $h_2$ : coeficientes de transferencia de calor.

Dichas ecuaciones describen el problema planteado cuando se conocen las condiciones iniciales y las propiedades termo físicas de los cilindros y la función de salida de calor por fricción  $q(t^*)r^*$ .

De igual manera se plantea el *problema inverso* considerando la función de salida de calor por fricción  $q(t^*)$ , como desconocida mientras que lo demás planteado en las ecuaciones anteriores es conocido. El objeto del análisis es predecir la función (dependiente del tiempo) de generación de calor por fricción que es desconocida.

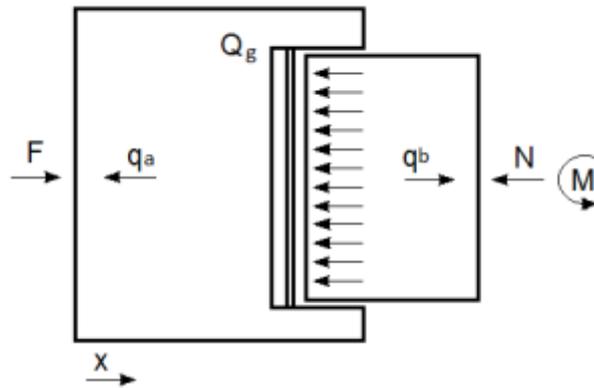
Coloquemos la temperatura medida en la posición de medición  $(r^*, z^*) = (1, -z_m^*)$  y el tiempo  $t^*$  denotado por  $Y(1, -z_m^*, t^*)$ .

La solución al problema inverso será obtenida minimizando a la función siguiente:

$$J[q(t^*)] = \int_{t^*=0}^{t^*_f} [\phi(1, -z_m^*, t^*) - \psi(1, -z_m^*, t^*)]^2 dt^* \quad (3.36)$$

En donde:  $\psi(\mathbf{1}, -\mathbf{z}_m^*, t^*) = Y(\mathbf{1}, -\mathbf{z}_m^*, t^*) - T_\infty$  y  $(\mathbf{1}, -\mathbf{z}_m^*, t^*)$ : temperatura estimada en el lugar de medición  $(\mathbf{r}^*, \mathbf{z}^*) = (\mathbf{1}, -\mathbf{z}_m^*)$ .

Ahora considerando el caso del movimiento giratorio en el par de acero y bronce, y para determinar el calor generado por el par de fricción se utiliza el esquema representado en la figura siguiente.



**Figura 4** Modelo de generación de calor por fricción

Fuente: (Guasumba, 2005)

El calor que se genera por  $Q_g$  para el estado estable se determina con la siguiente expresión.

$$Q_g = qa + qb \quad (3.37)$$

En donde:

$qa$  Calor útil conducido por el bronce hacia la zona de vaporización,  $qb$  calor transferido al acero con superficie endurecida.

Utilizando la Ley de Fourier para analizar la transferencia de calor, en los dos casos de conducción, la expresión de la ecuación diferencial reducida es la siguiente.

$$\frac{d^2t}{dx^2} = \frac{HC}{kA}(T - T_e) \quad (3.38)$$

En donde:

$T$  Temperatura de pared,  $T_e$  temperatura ambiente,  $k$  conductividad térmica del material,  $A$  es el área de transversal del par de fricción,  $H = hr + hc$ ,  $hc =$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $hr$  el coeficiente de transferencia de calor por radiación,  $C = \pi * D$  longitud de la circunferencia.

El perfil de temperatura en la pila térmica se obtiene con la siguiente expresión:

$$\theta = \theta_o \tanh(mL) \quad (3.39)$$

La curvatura del perfil depende de las características de los materiales utilizados, es decir, de su conductividad térmica.

El calor transferido en  $x = 0$  está dado por:

$$q_o = kAm\theta_o \tanh(mL) \quad (3.40)$$

Además:

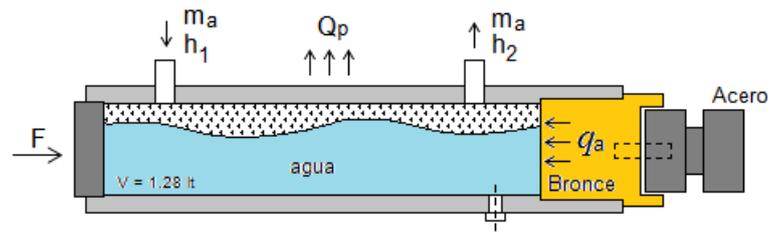
$$\theta_o = T_o - T_e \quad (3.41)$$

En donde:

$T_o$  Temperatura de pared en la zona de contacto, el valor de  $m$  se calcula con

$$m = \sqrt{\frac{HC}{kA}}$$

Para el diseño térmico de la pila se utiliza el esquema presentado en la figura 2, y su análisis corresponde al de recipientes cilíndricos horizontales.



**Figura 5** Caldero de Vaporización Horizontal, Volumen de Control

**Fuente:** (Guasumba, 2005)

En la región de calentamiento y vaporización del agua en estado estable, se utiliza para el cálculo la siguiente expresión:

$$qa = m_a(h_2 - h_1) + m_c cp(T_2 - T_1) + U_i A_s (T_p - T_e) \quad (3.42)$$

En donde:

$m_a$  es la masa de agua,  $h_2, h_1$  entalpías para el líquido comprimido y vapor sobrecalentado,  $m_c$  masa metálica,  $cp$  calor específico del metal,  $T_2, T_1$  temperatura del cilindro al inicio y al final del experimento,  $A_s$  área de pared cilíndrica,  $T_p, T_e$  temperaturas de pared y del ambiente,  $U_i$  coeficiente global de transferencia de calor tomando en cuenta el área interna del recipiente.

### 3.3.1. COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_i}{k_{Al}} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{r_i}{r_o h_o}} \quad (3.43)$$

En donde  $h_i, h_o$  son los coeficientes de transferencia de calor del agua y del aire, para el caso de espacios cilíndricos cerrados horizontales, el coeficiente  $h_i$  se calcula con la correlación propuesta por L.B.Evans y N.S. Stefan,  $r_i, r_o$  radio interior y exterior de la pila,  $k_{Al}$  conductividad térmica del metal.

### 3.3.2. ANALISIS TERMICO DE LA PARED CILINDRICA DEL CALDERO

Calor que ingresa por conducción al sistema está dado por:

$$q_a = -k A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.44)$$

Dónde:

$k$  Conductividad térmica del aluminio, en W/m<sup>°K</sup>;  $A$  área de transferencia de calor, en m<sup>2</sup>; representado por:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) \quad (3.45)$$

Dónde:

$D_o$  Diámetro exterior del cilindro de aluminio,  $D_i$  diámetro interior del cilindro, en m;

Calor que sale por conducción del sistema

$$q_b = -k A \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( -k A \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \quad (3.46)$$

Calor perdido por convección, cuando el sistema no tiene pared cilíndrica de aislamiento térmico.

$$q_c = U_o \pi D_o dx (T - T_a) \quad (3.47)$$

$$\tilde{A} = \pi D_o dx \quad (3.48)$$

### 3.3.3. BALANCE DE ENERGÍA

Realizando un balance de energía, se puede determinar los procesos de transferencia de energía que se producen por el intercambio de calor en la región del caldero o acumulador. El análisis inicia tomando un elemento diferencial del caldero

en su sección cilíndrica de acuerdo a las ecuaciones enunciadas anteriormente, lo cual en general está dado por:

$$q_{entra} - q_{sale} = q_{acc} \quad (3.49)$$

El calor acumulado en el elemento diferencial de área es:

$$q_{acc} = A dx \rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.50)$$

Utilizando las ecuaciones 3-41 y 3-42 tenemos:

$$-k A \frac{\partial T}{\partial x} + - \left[ -k A \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( -k A \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] - U_o \pi D_o dx (T - T_a) = A dx \rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.51)$$

Lo cual se puede simplificar restando los términos semejantes:

$$k A \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - U \pi D_o (T - T_a) = A \rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.52)$$

Definimos una variable auxiliar:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp} \quad (3.53)$$

Y con esta variable escribimos nuevamente la ecuación:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{U_o \pi D_o}{k A} (T - T_a) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.54)$$

Utilizamos matemáticamente la siguiente ecuación para simplificar la ecuación 3-51.

$$m_c^2 = \frac{U_o \pi D_o}{k A} \quad (3.55)$$

Que puede escribirse también de la forma:

$$m_c = \pm \sqrt{\frac{U_o \pi D_o}{k A}} \quad (3.56)$$

Y podemos escribir la ecuación 3-51 de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - m^2(T - T_a) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.57)$$

Analizando en el estado estacionario tenemos las siguientes condiciones:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.58)$$

$$\theta = T - T_a \quad (3.59)$$

Esto permite escribir la ecuación de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - m^2 \theta = 0 \quad (3.60)$$

Cuya solución general es como se plantea a continuación:

$$\lambda^2 e^{\lambda x} - m^2 e^{\lambda x} = \theta \quad (3.61)$$

Además podemos verificar que:

$$\theta = e^{\lambda x} \quad (3.62)$$

$$\theta' = \lambda e^{\lambda x} \quad (3.63)$$

$$\theta'' = \lambda^2 e^{\lambda x} \quad (3.64)$$

Citemos finalmente la ecuación auxiliar o ecuación característica de un modelo similar de solución:

$$\lambda^2 - m^2 = 0 \quad (3.65)$$

$$(x + m)(\lambda - m) = 0 \quad (3.66)$$

$$\lambda_1 = -m \quad (3.67)$$

$$\lambda_2 = m \quad (3.68)$$

$$\theta = C_1 e^{-mx} + C_2 e^{mx} \quad (3.69)$$

## CAPITULO 4

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

#### 4.1 MATERIALES Y EQUIPOS

Se utilizan equipos existentes para el desarrollo de esta experimentación, ambos son prototipos a los cuales se les realiza adecuaciones que permitan el registro de información para el posterior análisis, los materiales complementarios como sensores, aislantes, y equipamiento menor son cubiertos por quienes están realizando la experimentación, cuidando que la información que esto produzca sea de la mejor calidad para que los resultados de la experimentación sean aplicables a desarrollos futuros.

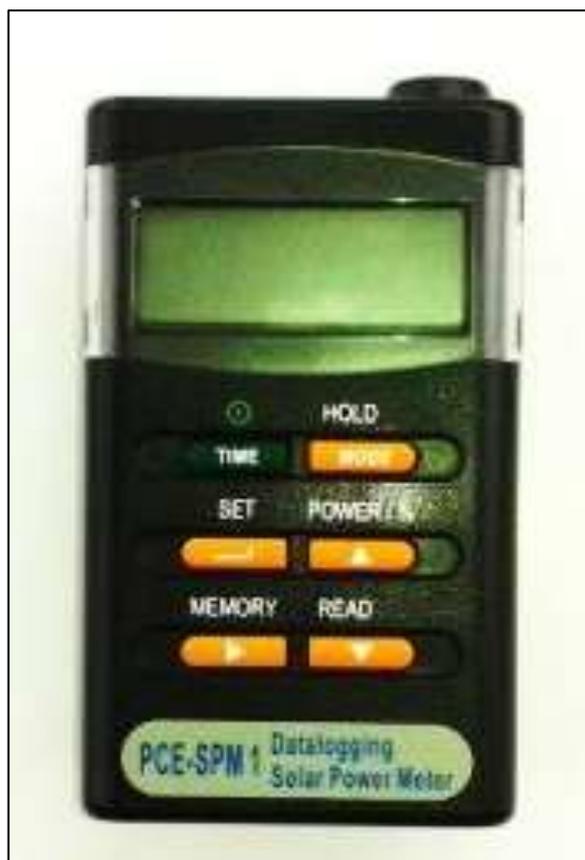
#### 4.2 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN



**Figura 6** Tacómetro resultado en RPM de 0 a 1000



**Figura 7** Medidor de Temperatura sobre superficies con Láser



**Figura 8** Medidor de Radiación Solar



**Figura 9** Nivel con burbuja de agua



**Figura 10** Anemómetro



**Figura 11** Hidrotermómetro



**Figura 12** Medidor de Temperatura en Tubería



**Figura 13** Medidor de Presión en Tubería



**Figura 14** Cámara Termográfica



**Figura 15** Termómetro con 8 termocoplas

### **4.3 PROCEDIMIENTO**

Se realizan los ensayos en cada uno de los equipos analizados de acuerdo a un procedimiento específico que se planifica para cada caso.

#### **4.3.1. PROCEDIMIENTO CALDERO DE VAPOR CON CONCENTRADORES CILÍNDRICOS PARABÓLICOS**

- Se Coloca el caldero en un lugar despejado, con el fin de que la radiación solar no tenga impedimento de alcanzar el concentrador parabólico.
- Realizamos el llenado del caldero con agua de la red pública, aproximadamente 500 gramos utilizando una balanza o un vaso de medición de laboratorio.
- Limpiamos la superficie parabólica con el fin de reducir las pérdidas por baja reflectividad en dicha superficie.
- Cerramos el caldero y verificamos la orientación del sol sobre el concentrador.
- Colocamos los equipos de medición para registrar los datos y los calibramos para su funcionamiento.
- Verificando la sombra que produce el caldero sobre el concentrador parabólico, realizamos un ajuste más fino de la orientación de nuestro caldero.
- Realizamos una primera toma de lecturas de todos los instrumentos para conocer las condiciones iniciales.
- Verificamos que nuestro caldero está concentrando la radiación en el punto focal tomando temperaturas con el medidor laser sobre las paredes del caldero.
- Se realiza la toma de lectura de instrumentos cada 5 minutos considerando como lectura inicial la tomada con las condiciones iniciales.
- Se realizan verificaciones de las condiciones del agua en el interior del caldero, para conocer el momento en el que inicia la ebullición mismo que se registrará en las observaciones del experimento
- Una vez que se haya alcanzado la temperatura de vapor esperada, se procede a verificar el volumen del líquido con el fin de conocer la tasa de producción de vapor y poder establecer las condiciones de operación de este equipo.

#### **4.3.2. PROCEDIMIENTO PARA EL CALDERO DE VAPORIZACIÓN HORIZONTAL**

- Se Coloca el caldero para el ensayo en un equipo de torno fijándolo de manera que pueda tener un mínimo desplazamiento en el eje horizontal para poder aplicar la fuerza de empuje necesaria para el proceso de fricción entre los elementos de bronce y acero que producirán la temperatura que será transferida al caldero.
- Realizamos el llenado del caldero con agua de la red pública, aproximadamente 1,8 litros mediante la apertura de las electroválvulas de control.
- Cerramos la fuente de ingreso y salida de agua del caldero.
- Colocamos los equipos de medición para registrar los datos y los calibramos para su funcionamiento.
- Arrancamos el motor para generar el movimiento en la parte de acero.
- Realizamos una primera toma de lecturas de todos los instrumentos para conocer las condiciones iniciales.
- Procedemos al acoplamiento para la interacción en el punto de fricción, acercando el caldero hasta conseguir el contacto con la parte de bronce que será estática y la parte de acero en movimiento, para lo cual previamente frotamos vela de cebo alrededor de las piezas que van a entrar en contacto, para generar un poco de lubricación.
- Una vez conseguido el contacto de las dos partes mencionadas anteriormente, se verifica dicho acoplamiento por la elevación de temperatura de esta unión.
- Se realiza la toma de lectura de instrumentos cada 5 minutos considerando como lectura inicial la tomada con las condiciones iniciales.
- Debido a que los metales tienen un factor de expansión una vez que se eleva la temperatura, se debe realizar un mínimo ajuste del desplazamiento en el caldero para producir el alejamiento entre los metales en contacto que son el acero y el bronce.
- Una vez alcanzada la temperatura de vapor requerida, se debe realizar la liberación de vapor con la apertura de la llave de salida, posterior a lo cual se separa el caldero de la parte móvil de acero y se suspende su movimiento.

## 4.4 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO

Se analizan los siguientes parámetros en cada caso:

### 4.4.1 PARÁMETROS CALDERO DEL CONCENTRADOR PARABÓLICO

Se considera el siguiente conjunto de parámetros para ser analizados en el caldero de concentrador solar:

**HORA:** Se recopila esta información con el fin de conocer la radiación incidente en ese momento del día.

**TIEMPO:** Hace referencia al tiempo que lleva desarrollándose la prueba.

**TEMPERATURA AMBIENTE:** Como parámetros de comparación de la temperatura del caldero, se consideran aquí las temperaturas en exposición directa y a la sombra.

**TEMPERATURA DEL ABSORBEDOR (TA):** Hace referencia a la temperatura del caldero en sus paredes exteriores que reciben la radiación concentrada directa.

**HUMEDAD RELATIVA (HR):** Se considera este dato para establecer los parámetros ambientales y su posible influencia en los resultados.

**RADIACIÓN SOLAR:** Parámetro de especial interés para la operación del caldero, permite establecer la eficiencia del prototipo.

### 4.4.2 PARÁMETROS DEL CALDERO DE VAPORIZACIÓN HORIZONTAL

En el caso del caldero de vaporización horizontal tenemos que prestar atención a un conjunto un poco más extenso de variables como son:

**HORA:** Se recopila esta información con el fin de registrar datos temporales del experimento.

**VELOCIDAD DE ROTACIÓN (RPM):** Dato que permitirá establecer una relación entre la velocidad de rotación y la tasa de producción de vapor.

**CORRIENTE Y VOLTAJE DEL MOTOR DEL TORNO (I,V):** Datos importantes para establecer la potencia eléctrica suministrada al motor para el experimento, teniendo presente que por ensayo se utiliza energía eléctrica.

**TEMPERATURAS Y PRESIONES DE INGRESO Y SALIDA DEL CALDERO (Tfi, Pfi, Tfo, Pfo):** Permitirán establecer la ganancia de temperatura y presión que ha tenido el fluido en su paso por el caldero.

**TEMPERATURA Y PRESIÓN EN EL CALDERO (Tcal, Pcal):** Datos importantes para determinar la operación en el caldero.

**TEMPERATURAS SUPERFICIALES EN EL ACERO Y EN EL BRONCE (Tsa, Tsb):** Datos importantes para determinar la transferencia de temperatura en el caldero.

**TEMPERATURA AMBIENTE (Ta):** Como parámetros de comparación de la temperatura del caldero, se considera aquí la temperatura a la sombra.

**TEMPERATURAS SUPERFICIALES DEL CALDERO:** Se requieren para esto los datos de doce puntos sobre la superficie del caldero, esto es con una distribución equidistante, esto con el fin de analizar el intercambio de calor que se produce en el interior del caldero al producirse el calor en el par de fricción en un extremo del mismo. La colocación de los sensores es de acuerdo a la tabla siguiente:

**Tabla 1** Ubicación Sensores de Temperatura (mm)

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
95	140	185	230	275	320	365	410	455	500	545	590
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm

**VELOCIDAD DEL VIENTO (Va):** Variable de aplicación para determinar su efecto en las pérdidas de calor por convección.

#### 4.5 PRUEBAS DE CALENTAMIENTO POR CONCENTRACIÓN

Las pruebas de este prototipo se realizaron en la ciudad de Cuenca en la ubicación mostrada a continuación, los parámetros para la realización de la prueba fueron medidos con los equipos indicados en este documento además de comparación de estos parámetros con equipos similares ubicados cerca del lugar del experimento para contrastar los datos ambientales obtenidos.

**Tabla 2** Datos Localidad de Experimentación

LOCALIDAD	COORDENADAS	ALTITUD	TEMPERATURA AMBIENTE
CUENCA ciudad	2°53'S; 79°00'O Grados, Min, Seg metros	2550msnm	15°C promedio Grados

**Figura 16** Ubicación Localidad de Experimentación

**Fuente:** (INAMHI, 2012)

En este ensayo se colocan 500 gr de agua y se inicia a las 10:35 de la mañana, tomando datos cada 5 minutos, para posterior a la realización del experimento, verificar el volumen de agua en el recipiente y con ello calcular la cantidad de vapor que se ha producido en el intervalo de tiempo del experimento.

**Tabla 3** Datos Experimento con Caldero Solar

Hora	Tiempo (minutos)	Temperatura ambiente		TA (°C)	HR (%)	Radiación W/m <sup>2</sup>	Observaciones
		Sombra (°C)	Visible (°C)				
10:35	0	15	21	31,9	36	898	
10:40	5	15	22	44,3	38	896	
10:45	10	16	22	70,5	36	902	
10:50	15	15	21	82,3	38	904	
10:55	20	16	21	83,9	38	910	
11:00	25	15	22	85,4	36	913	
11:05	30	16	21	85,4	32	706	Nubosidad
11:10	35	16	21	89,3	34	950	Hierve el agua
11:15	40	16	21	84	34	953	
11:20	45	15	22	85,9	34	928	
11:25	50	16	21	81	36	840	Nubosidad
11:30	55	17	22	84,4	34	1000	
11:35	60	17	23	86,5	34	1003	

### **OBSERVACIONES EXPERIMENTALES:**

Durante el desarrollo del ensayo, se tuvieron importantes novedades que son útiles de compartir para futuros desarrollos de este tipo de experimentos, entre las que podemos mencionar:

- El equipo debe tener libre acceso a la luz solar en todo el recorrido del mismo durante el día, para evitar sombras que podrían perjudicar el desarrollo del experimento.
- Se debe pesar y medir el líquido previo a la realización del ensayo, con el fin de poder tener establecidas las condiciones iniciales.
- La manipulación del caldero la realizaremos con precaución debido a que la temperatura del líquido es superior a la de las paredes del mismo en el exterior.
- La sombra del caldero, ayuda a la correcta orientación del concentrador.

- Es conveniente registrar los momentos en los que no se tiene brillo de la luz del sol, pues implica que no se obtiene radiación directa para nuestro caldero.
- Será conveniente asimismo realizar la medición de la velocidad del viento para que se pueda establecer así las pérdidas de energía calorífica por convección.

#### 4.6 ENSAYO DEL CALENTADOR POR ENERGÍA MECÁNICA DE ROTACIÓN

Las pruebas con este equipo las realizamos en Quito en un taller particular en el cual nos facilitaron el equipo de torno para producir el movimiento de rotación que requeríamos simular para el experimento.

Aplicando el procedimiento propuesto se tienen los siguientes datos:

**Tabla 4** Datos experimentales de Temperatura en el Caldero Horizontal

ORDEN	FECHA DD-MM-YYYY	HORA (24 horas)	N RPM	MOTOR		LUJO DEL PROCES				CALDERO		PAR DE FRICCIÓN		AMBIENTE	
				I (A)	V (V)	T <sub>fi</sub> (°C)	T <sub>fo</sub> (°C)	P <sub>fo</sub> (PSI)	T <sub>cald</sub> (°C)	P <sub>cald</sub> (PSI)	T <sub>sa</sub> (°C)	T <sub>sb</sub> (°C)	V <sub>a</sub> (m/s)	T <sub>a</sub> (°C)	
1	22/08/2014	11:45	760	14	220	24	24	25	18	40	126	130	1,9	21	
2	22/08/2014	11:50	740	16	220	24	38	30	40	50	180	148	2,14	21	
3	22/08/2014	11:55	810	9,3	220	24	50	40	50	60	171	163	3,01	21	
4	22/08/2014	12:00	765	12	220	24	58	55	58	65	192	196	2,5	20	
5	22/08/2014	12:05	746	12	220	24	64	80	70	95	205	201	2,8	20	
6	22/08/2014	12:10	654	16	220	24	78	85	86	100	238	243	2,7	20	
7	22/08/2014	12:15	659	16	220	24	89	90	103	100	255	256	2,25	20	
8	22/08/2014	12:20	619	16	220	24	102	105	117	165	262	251	2,13	20	
9	22/08/2014	12:25	722	13	220	24	114	140	128	149	223	273	2,5	20	
10	22/08/2014	12:30	720	13	220	24	119	130	135	160	245	271	2,3	21	
11	22/08/2014	12:35	706	14	220	24	126	145	144	153	240	273	2	21	
12	22/08/2014	12:40	678	13	220	24	135	145	152	165	252	268	2,3	21	
13	22/08/2014	12:45	721	12	220	24	131	130	160	150	253	274	2	21	
14	22/08/2014	12:50	709	13	220	24	128	140	164	157	246	273	2,2	21	

DESCARGA DE VAPOR

#### OBSERVACIONES EXPERIMENTALES:

Durante el desarrollo de las pruebas, se tuvieron importantes novedades que son útiles de compartir para futuros desarrollos de este tipo de ensayos, entre las que podemos mencionar:

- El equipo debe ser sujetado con firmeza desde el inicio del experimento en la base del torno, sin embargo, debemos tener presente que se requiere un

movimiento ligero de la posición para el acercamiento de las piezas móviles, así que el ajuste no debe ser muy fuerte al inicio del experimento.

- Los parámetros de temperatura en cada punto del cuerpo del caldero, al ser tomados con el equipo láser, producen una lectura errada, lo cual se ha corregido con el uso de una cinta negra sobre la superficie de aluminio del caldero.
  
- Los lectores de presión del experimento a la salida del vapor, presentan lecturas erradas debido a que el vapor se concentra en la parte alta del mismo y por ello es necesario purgar antes de cada lectura el vapor, abriendo un poco la llave de salida con cuidado debido a la temperatura que puede alcanzar.
  
- A medida que nos acercamos a la temperatura de descarga de vapor, se empiezan a observar fugas mínimas de vapor por los puntos de acoplamiento de los equipos de medición, lo cual debería ser corregido en un prototipo siguiente, considerando la utilización de sellante en los acoples que soporte altas temperaturas y altas presiones.

## CAPITULO 5

### ANALISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 TABULACIÓN DE DATOS OBTENIDOS

Iniciamos con los ensayos del caldero con concentrador parabólico de radiación solar:

**Tabla 5** Datos ensayo N<sup>o</sup> 1 con Concentrador Solar

Hora	Tiempo (minutos)	Temperatura ambiente		TA (°C)	HR (%)	Radiación W/m <sup>2</sup>	Observaciones
		Sombra (°C)	Visible (°C)				
10:35	0	15	21	31,9	36	898	
10:40	5	15	22	44,3	38	896	
10:45	10	16	22	70,5	36	902	
10:50	15	15	21	82,3	38	904	
10:55	20	16	21	83,9	38	910	
11:00	25	15	22	85,4	36	913	
11:05	30	16	21	85,4	32	706	Nubosidad
11:10	35	16	21	89,3	34	950	Hierve el agua
11:15	40	16	21	84	34	953	
11:20	45	15	22	85,9	34	928	
11:25	50	16	21	81	36	840	Nubosidad
11:30	55	17	22	84,4	34	1000	
11:35	60	17	23	86,5	34	1003	
PROMEDIO						<b>908</b>	

Tiempo de ensayo de 60 minutos, hierve a los 35 minutos aproximadamente, la radiación promedio es de 908 W/m<sup>2</sup>.

**Tabla 6** Datos ensayo N°2 Concentrador Solar

Hora	Tiempo (minutos)	Temperatura ambiente		TA (°C)	HR (%)	Radiación W/m <sup>2</sup>	Observaciones
		Sombra (°C)	Visible (°C)				
12:25	0	17	19	34,6	32	970	
12:30	5	18	19	36,2	31	976	
12:35	10	18	21	41,5	32	963	
12:40	15	18	21	56,5	33	954	
12:45	20	18	21	58,2	34	943	
12:50	25	19	22	72,4	31	980	
12:55	30	19	23	74,5	30	964	
13:00	35	17	21	75,1	32	750	Nubosidad
13:05	40	17	21	74,2	34	812	Hierve el agua
13:10	45	18	22	78,5	32	965	
13:15	50	19	22	82,4	31	980	
13:20	55	19	21	82,1	34	954	
13:25	60	21	23	88,3	33	1031	
PROMEDIO						<b>942</b>	

Tiempo de ensayo de 60 minutos, hierve a los 40 minutos aproximadamente, la radiación promedio es de 942 W/m<sup>2</sup>.

**Tabla 7** Datos ensayo N°3 Concentrador Solar

Hora	Tiempo (minutos)	Temperatura ambiente		TA (°C)	HR (%)	Radiación W/m <sup>2</sup>	Observaciones
		Sombra (°C)	Visible (°C)				
11:15	0	19	23	31,5	32	958	
11:20	5	21	25	38,5	32	987	
11:25	10	21	24	44,4	32	1000	
11:30	15	22	25	59,6	31	1031	
11:35	20	21	24	65,4	32	1121	
11:40	25	22	25	79,6	32	1010	
11:45	30	21	25	80,4	31	998	Hierve el agua
11:50	35	22	24	81,3	32	1035	
11:55	40	21	24	81,5	34	985	
12:00	45	22	25	80,6	33	990	Ligera nubosidad
12:05	50	22	26	82,3	33	965	
12:10	55	22	26	80,7	32	941	
12:15	60	22	26	84,9	32	956	
PROMEDIO						<b>998</b>	

Tiempo de ensayo de 60 minutos, hierve a los 30 minutos aproximadamente, la radiación promedio es de 998 W/m<sup>2</sup>.

A continuación los ensayos con el caldero de vaporización horizontal:

**Tabla 8** Datos Experimento CVH N<sup>a</sup>1 parte A

ORDEN	FECHA DD-MM-YYYY	HORA (24 horas)	N RPM	MOTOR		FLUJO DEL PROCESO			CALDERO		PAR DE FRICCIÓN		AMBIENTE	
				I (A)	V (V)	Tfi (°C)	Tfo (°C)	Pfo (PSI)	Tcald (°C)	Pcald (PSI)	Tsa (°C)	Tsb (°C)	Va (m/s)	Ta (°C)
1	26/06/2014	11:10	420	7,1	220	20	20	20	8	25	32	39	0,23	22
2	26/06/2014	11:15	420	8,1	220	20	20	20	10	25	52	48	0,47	21
3	26/06/2014	11:20	420	7,7	220	20	22	20	14	25	76	66	0,52	21
4	26/06/2014	11:25	420	8,8	220	20	28	20	24	25	100	80	1,3	21
5	26/06/2014	11:30	420	7,3	220	20	34	20	32	30	106	102	0,6	21
6	26/06/2014	11:35	420	9	220	21	40	20	42	30	134	126	0,6	21
7	26/06/2014	11:40	420	9,3	220	26	52	20	54	40	116	140	0,7	21
8	26/06/2014	11:45	420	7,1	220	30	58	20	62	50	120	113	0,7	20
9	26/06/2014	11:50	420	10	220	35	62	20	66	55	135	148	0,82	20
10	26/06/2014	11:55	420	11	220	40	70	20	80	95	165	201	0,82	20
11	26/06/2014	12:00	420	15	220	44	84	55	100	60	200	215	0,72	20
12	26/06/2014	12:05	420	7,1	220	58	104	85	120	100	232	185	0,62	20
13	26/06/2014	12:10	420	13	220	70	112	140	132	160	225	250	0,63	20
14	26/06/2014	12:15	420	10	220	82	152	85	142	95	200	181	0,66	21

DESCARGA DE VAPOR

El tiempo de ensayo de 65 minutos, hierve a los 45 minutos aproximadamente, la velocidad de rotación es 420 RPM, el vapor alcanza una temperatura de 160°C.

**Tabla 9** Datos Experimento CVH N<sup>a</sup>1 parte B

ORDEN	FECHA DD-MM-YYYY	HORA (24 horas)	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
			95	140	185	230	275	320	365	410	455	500	545	590
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
			(°C)											
1	26/06/2014	11:10	17	17	18	17,2	21	25,3	21	20,7	22	22,4	22,6	21
2	26/06/2014	11:15	20	20	23	24,3	24,7	25,6	20,8	20,5	20,4	20	21,2	21
3	26/06/2014	11:20	22,5	22	28	26,6	26,5	26,4	22,5	21,4	21,5	23,2	22,8	21
4	26/06/2014	11:25	26	24	28	23,6	28,2	28,1	23,6	22,7	22,7	23,5	23	24
5	26/06/2014	11:30	26	27	25	22,5	26,1	24,3	22,8	23,3	22,3	22,3	22,8	22
6	26/06/2014	11:35	27,5	29	27	28,8	24,5	29,7	24	23,8	23,5	23	24,2	25
7	26/06/2014	11:40	30,3	27	29	25	20	27,2	25,3	25,2	24,5	25,7	24,9	24
8	26/06/2014	11:45	31	30	29	31,4	37	32,5	26,5	26,5	26,4	26,7	25,8	25
9	26/06/2014	11:50	35	29	28	25,8	24,2	29	24,3	24,4	21	25	24,7	24
10	26/06/2014	11:55	39	34	31	33,3	27,4	32	27,9	28,5	26,6	28,4	28	32
11	26/06/2014	12:00	40	36	30	29,7	31	32,4	28,3	28,1	28,5	27,5	27,8	31
12	26/06/2014	12:05	46	41	34	34,1	29,4	41	34,5	31,7	33,7	33,4	31,5	37
13	26/06/2014	12:10	54,2	47	37	36,2	37	39,2	35,7	39,3	38,7	36,5	33,2	35
14	26/06/2014	12:15	74	60	46	36,2	38,8	41	37,5	39	33,6	35,6	37,6	34

DESCARGA DE VAPOR

Termocuplas de la superficie del caldero durante el experimento que tiene una duración de 65 minutos, hierve a los 45 minutos aproximadamente, la velocidad de rotación es 420 RPM, el vapor alcanza una temperatura de 160°C.

**Tabla 10** Datos Experimento CVH N°2 parte A

ORDEN	FECHA	HORA	N RPM	MOTOR		LUJO DEL PROCES			CALDERO		PAR DE FRICCIÓN		AMBIENTE	
	DD-MM-YYYY (24 horas)			I (A)	V (V)	Tfi (°C)	Tfo (°C)	Pfo (PSI)	Tcald (°C)	Pcald (PSI)	Tsa (°C)	Tsb (°C)	Va (m/s)	Ta (°C)
1	22/08/2014	11:45	760	14	220	24	24	25	18	40	126	130	1,9	21
2	22/08/2014	11:50	740	16	220	24	38	30	40	50	180	148	2,14	21
3	22/08/2014	11:55	810	9,3	220	24	50	40	50	60	171	163	3,01	21
4	22/08/2014	12:00	765	12	220	24	58	55	58	65	192	196	2,5	20
5	22/08/2014	12:05	746	12	220	24	64	80	70	95	205	201	2,8	20
6	22/08/2014	12:10	654	16	220	24	78	85	86	100	238	243	2,7	20
7	22/08/2014	12:15	659	16	220	24	89	90	103	100	255	256	2,25	20
8	22/08/2014	12:20	619	16	220	24	102	105	117	165	262	251	2,13	20
9	22/08/2014	12:25	722	13	220	24	114	140	128	149	223	273	2,5	20
10	22/08/2014	12:30	720	13	220	24	119	130	135	160	245	271	2,3	21
11	22/08/2014	12:35	706	14	220	24	126	145	144	153	240	273	2	21
12	22/08/2014	12:40	678	13	220	24	135	145	152	165	252	268	2,3	21
13	22/08/2014	12:45	721	12	220	24	131	130	160	150	253	274	2	21
14	22/08/2014	12:50	709	13	220	24	128	140	164	157	246	273	2,2	21

DESCARGA DE VAPOR

Este experimento tiene una duración de 65 minutos, hierve a los 25 minutos aproximadamente, la velocidad de rotación es 720 RPM, el vapor alcanza una temperatura de 164°C.

**Tabla 11** Datos Experimento CVH N°2 parte B

ORDEN	FECHA DD-MM-YYYY (24 horas)	HORA	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
			95	140	185	230	275	320	365	410	455	500	545	590
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
			(°C)											
1	22/08/2014	11:45	22	20	19	24	23	21	24	23	20	23	24	23
2	22/08/2014	11:50	67	45	42	40	36	39	37	34	33	35	35	33
3	22/08/2014	11:55	75	61	58	54	52	50	49	50	48	47	46	46
4	22/08/2014	12:00	78	65	63	62	59	56	56	57	56	54	53	53
5	22/08/2014	12:05	92	80	76	73	71	71	70	69	63	60	64	63
6	22/08/2014	12:10	118	99	94	90	84	82	84	84	81	82	83	80
7	22/08/2014	12:15	130	114	108	103	102	102	97	100	102	98	101	91
8	22/08/2014	12:20	139	126	123	121	117	117	115	112	112	112	112	112
9	22/08/2014	12:25	143	124	126	122	130	130	123	127	128	123	123	121
10	22/08/2014	12:30	156	137	138	136	132	132	133	134	132	131	130	132
11	22/08/2014	12:35	165	148	146	142	137	137	129	134	140	141	140	134
12	22/08/2014	12:40	170	170	153	152	148	148	151	149	149	150	147	145
13	22/08/2014	12:45	171	165	164	162	154	154	155	159	156	154	157	154
14	22/08/2014	12:50	175	172	168	166	165	164	160	161	162	162	162	160

DESCARGA DE VAPOR

Se pueden ver las temperaturas en la superficie del caldero durante el experimento que tiene una duración de 65 minutos, hierve a los 25 minutos aproximadamente, la velocidad de rotación es 720 RPM, el vapor alcanza una temperatura de 164°C, misma que se evidencia en la superficie con una ligera disminución.

**Tabla 12** Datos Experimento CVH N<sup>a</sup>3 parte A

ORDEN	FECHA	HORA	N	MOTOR		LUJO DEL PROCES			CALDERO		PAR DE FRICCIÓN		AMBIENTE	
	DD-MM-YYYY (24 horas)			I	V	Tfi	Tfo	Pfo	Tcald	Pcald	Tsa	Tsb	Va	Ta
				(A)	(V)	(°C)	(°C)	(PSI)	(°C)	(PSI)	(°C)	(°C)	(m/s)	(°C)
1	22/08/2014	14:45	838	0	220	25	29	20	22	35	26	34	0,02	22
2	22/08/2014	14:50	778	13	220	25	29	20	22	35	60	82	2,5	21
3	22/08/2014	14:55	738	13	220	25	24	15	36	30	148	171	2,3	21
4	22/08/2014	15:00	716	13	220	25	40	17	54	30	176	174	1,7	21
5	22/08/2014	15:05	708	16	220	25	46	25	71	40	221	209	2,15	21
6	22/08/2014	15:10	702	15	220	25	75	40	89	55	252	238	1,9	21
7	22/08/2014	15:15	634	17	220	25	90	70	104	83	256	259	1,8	21
8	22/08/2014	15:20	641	16	220	25	101	145	119	155	264	292	2,4	22
9	22/08/2014	15:25	645	18	220	25	117	115	133	125	260	295	2,3	22
10	22/08/2014	15:30	621	14	220	25	127	130	144	145	277	291	1,7	22
11	22/08/2014	15:35	706	12	220	25	136	140	153	160	276	290	2,2	22
12	22/08/2014	15:40	688	12	220	25	136	138	159	155	258	284	1,7	22

## DESCARGA DE VAPOR

Para este experimento se tiene una duración de 55 minutos, una velocidad de 720 RPM, hierve a los 25 minutos aproximadamente, el vapor alcanza una temperatura de 159°C.

**Tabla 13** Datos Experimento CVH N<sup>a</sup>3 parte B

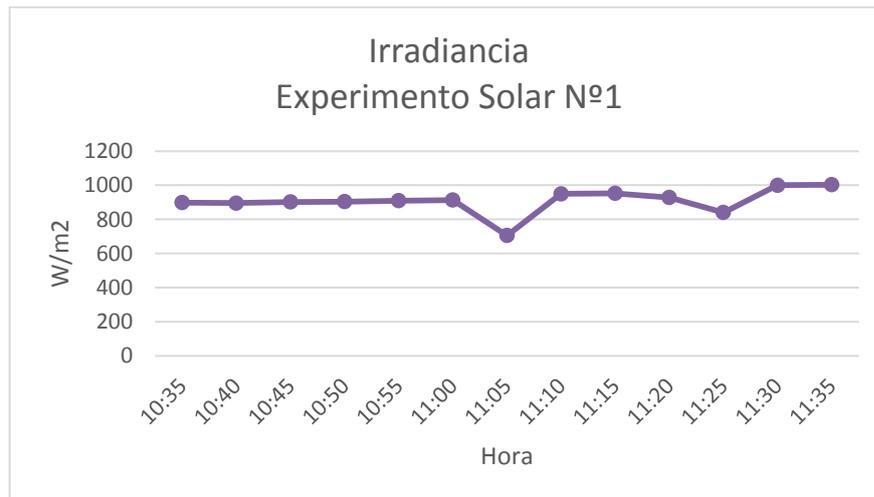
ORDEN	FECHA	HORA	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
			95	140	185	230	275	320	365	410	455	500	545	590
	DD-MM-YYYY (24 horas)		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
			(°C)											
1	22/08/2014	14:45	33	31	30	29	28	27	27	26	26	26	25	25
2	22/08/2014	14:50	35	31	30	29	29	28	28	29	28	28	28	28
3	22/08/2014	14:55	54	49	45	42	40	37	36	34	35	35	35	34
4	22/08/2014	15:00	80	66	60	58	56	55	51	52	51	49	48	41
5	22/08/2014	15:05	101	81	78	74	70	70	68	61	65	60	62	63
6	22/08/2014	15:10	111	99	94	91	90	89	88	87	84	83	82	75
7	22/08/2014	15:15	130	102	111	108	105	82	84	100	101	95	96	83
8	22/08/2014	15:20	145	126	121	110	111	106	115	107	106	113	106	107
9	22/08/2014	15:25	154	136	134	136	124	110	126	128	127	123	127	112
10	22/08/2014	15:30	157	151	148	146	143	121	137	128	135	125	141	138
11	22/08/2014	15:35	173	158	156	155	154	149	152	151	145	145	147	147
12	22/08/2014	15:40	171	161	154	152	159	136	155	157	155	154	154	150

## EVACUACION DE VAPOR

Se pueden ver las temperaturas en la superficie del caldero durante el experimento que tiene una duración de 55 minutos, cuyas curvas se muestran más adelante.

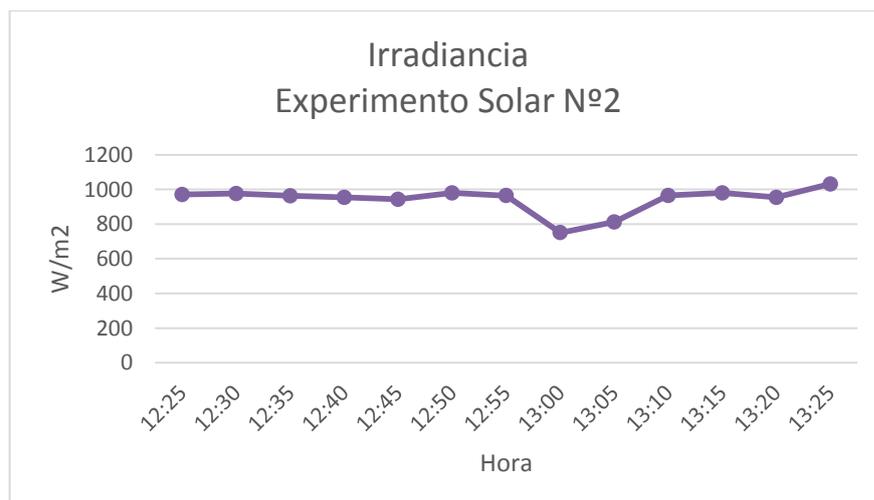
## 5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Analizando los mismos se presentan las siguientes curvas en la operación del prototipo:



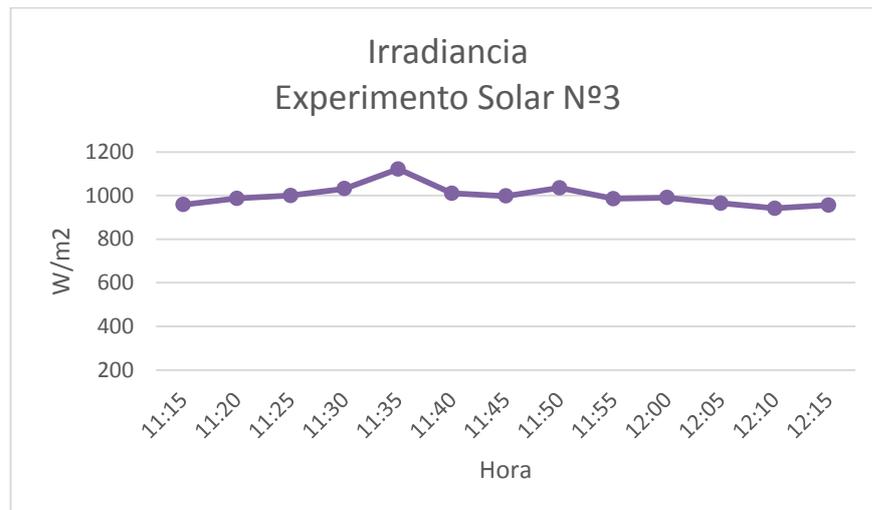
**Figura 17** Curva Irradiancia Experimento 1

Se pueden apreciar momentos de nubosidad a las 11:05 y a las 11:25, y una tendencia a incrementarse ligeramente los valores de la radiación solar.



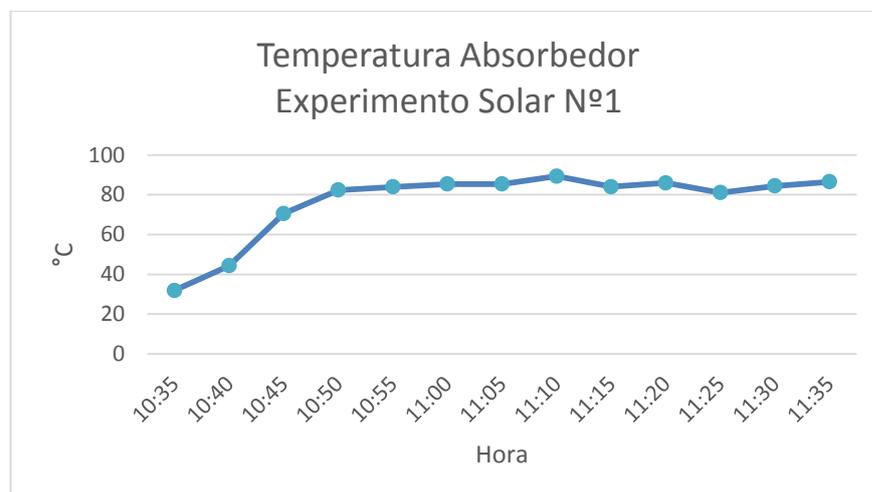
**Figura 18** Curva Irradiancia Experimento 2

Se aprecia una disminución de la radiación a las 13:00 debido a que se tiene ligera nubosidad hasta las 13:10.



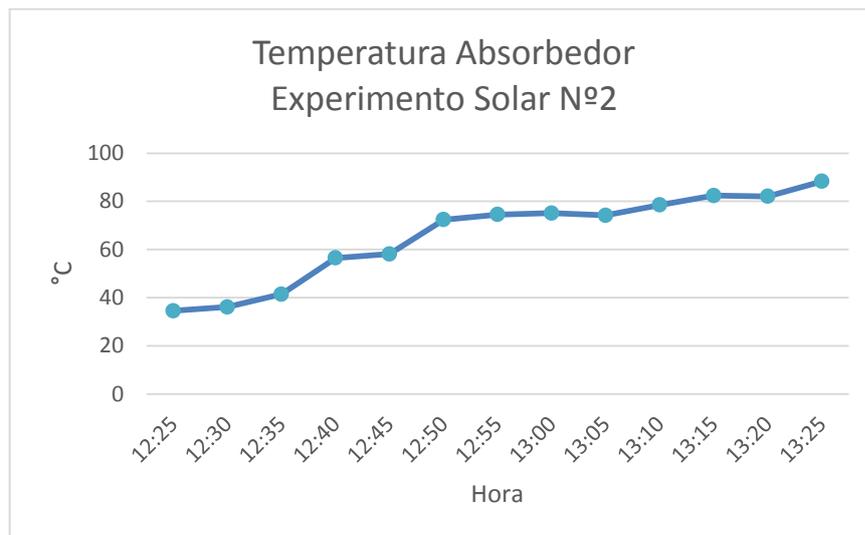
**Figura 19** Curva Irradiancia Experimento 3

La irradiancia medida durante los experimentos muestra buenas características debido a la poca presencia de intervalos con baja irradiancia que han sido consecuencia de la poca presencia de nubes que evitan el paso de la radiación directa que necesitamos para la operación de nuestro concentrador, lo cual beneficia al ensayo realizado.



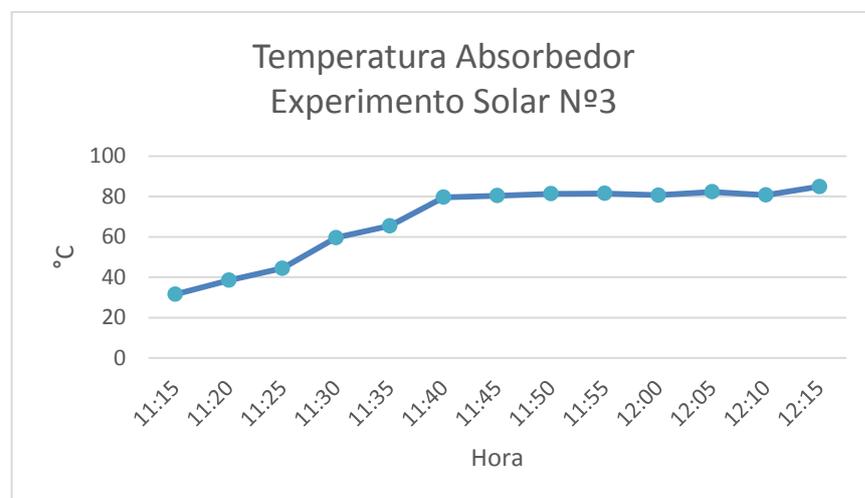
**Figura 20** Curva Temperatura Absorbedor Experimento 1

Se puede observar una mayor tasa de incremento de temperatura en los primeros 15 minutos del experimento.



**Figura 21** Curva Temperatura Absorbedor Experimento 2

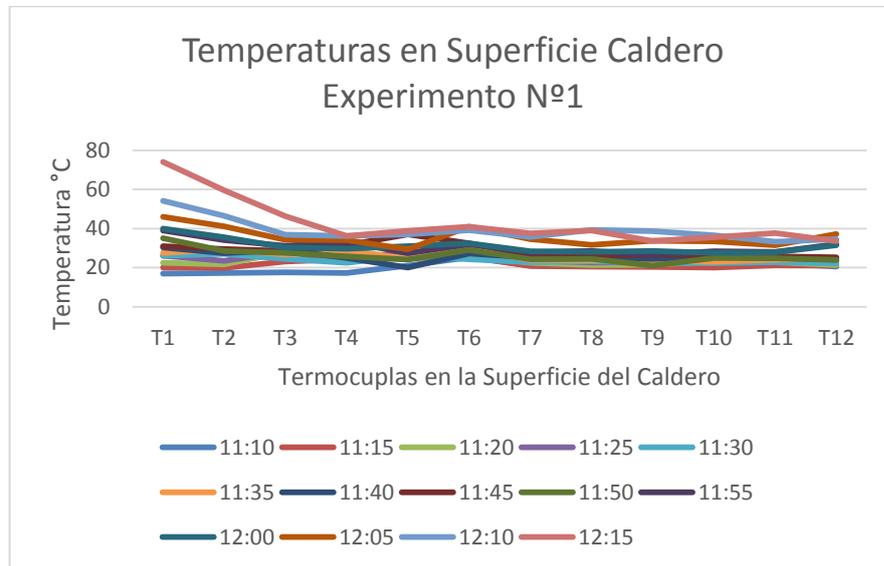
En este experimento, se aprecia un incremento de la temperatura del caldero durante los primeros 25 minutos con mayor velocidad.



**Figura 22** Curva Temperatura Absorbedor Experimento 3

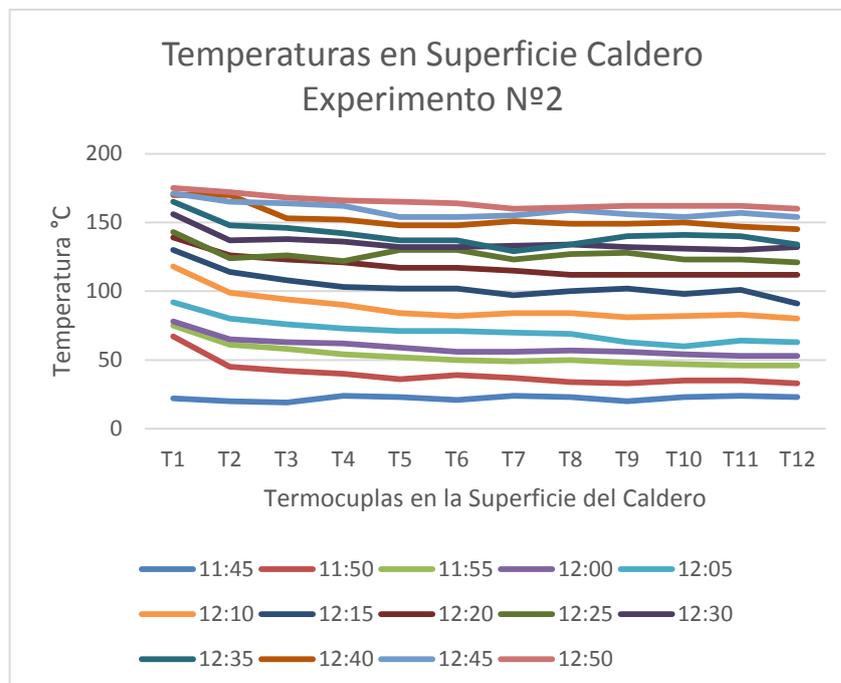
El aumento de temperatura en los primeros veinticinco minutos es un hallazgo importante en estos ensayos, demostrando una tasa de elevación de temperatura considerable y que para los siguientes minutos muestra una tasa de cambio menor y tendiente a estabilizarse para los tres experimentos realizados con el concentrador solar.

Para el caso del caldero de Vaporización Horizontal (CVH), tenemos:

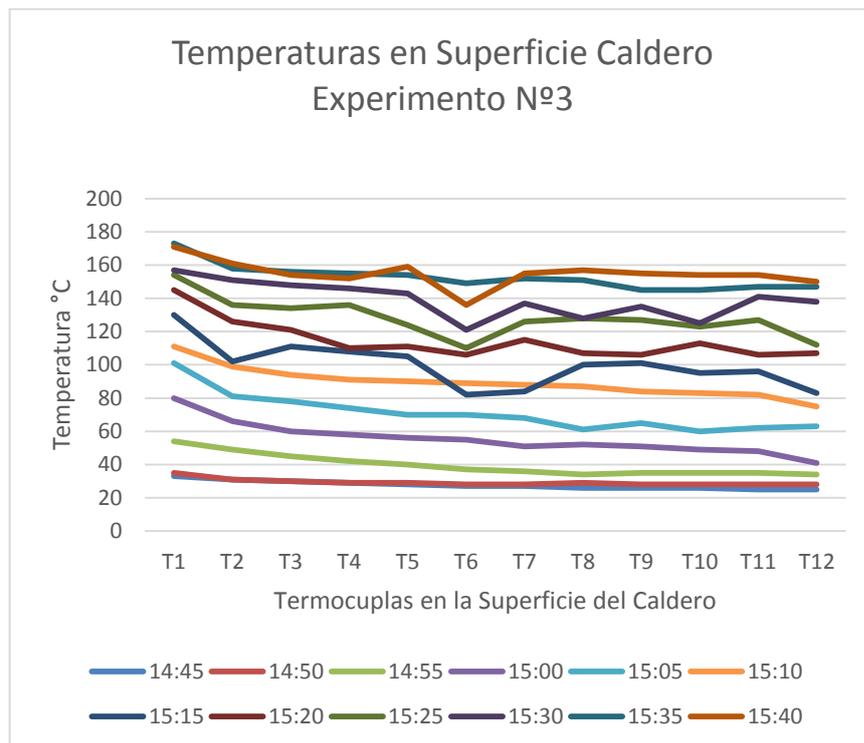


**Figura 23** Curvas de Temperatura en superficie CVH 1

Se visualizan las temperaturas de la superficie del caldero, tomadas con medidor laser sobre la superficie según el detalle de las ubicaciones mostrado en la tabla 4.1.



**Figura 24** Curvas de Temperatura en superficie CVH 2

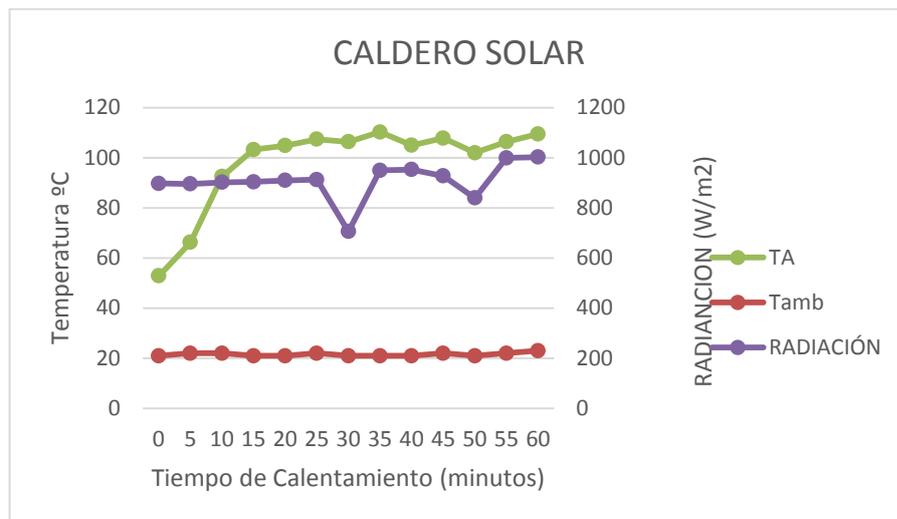


**Figura 25** Curvas de Temperatura en superficie CVH 3

Podemos observar que desde el punto de generación de calor, en el par bronce-acero, que corresponde a la Termocupla 1, se tiene una distribución de calor hacia el líquido en el caldero de manera oscilante, debido a que en el interior del caldero, el líquido estará en movimiento debido al proceso de ebullición provocado por el incremento de temperatura, de igual manera podemos observar una mayor oscilación de la temperatura a medida que la temperatura se eleva.

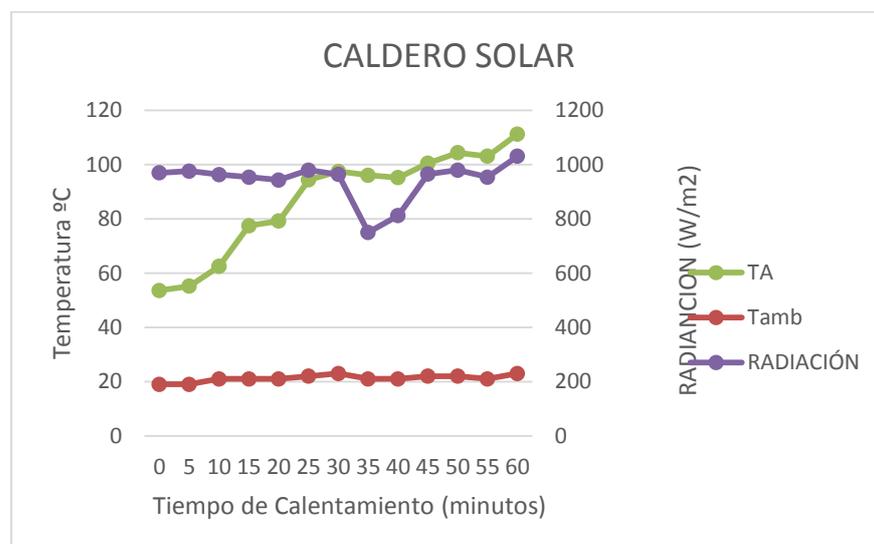
### 5.3 DESARROLLO DE CORRELACIONES MATEMÁTICAS

Para el caldero del concentrador de radiación solar tenemos:



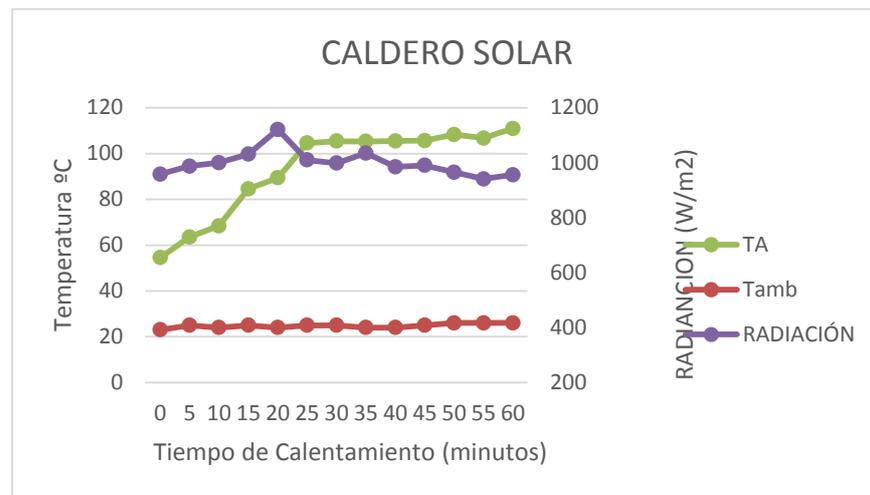
**Figura 26** Curva Temperatura Caldero Vs Irradiancia Experimento 1

Se puede observar el incremento de temperatura en el absorbedor, debido a la radiación concentrada que recibe de manera constante.



**Figura 27** Curva Temperatura Caldero Vs Irradiancia Experimento 2

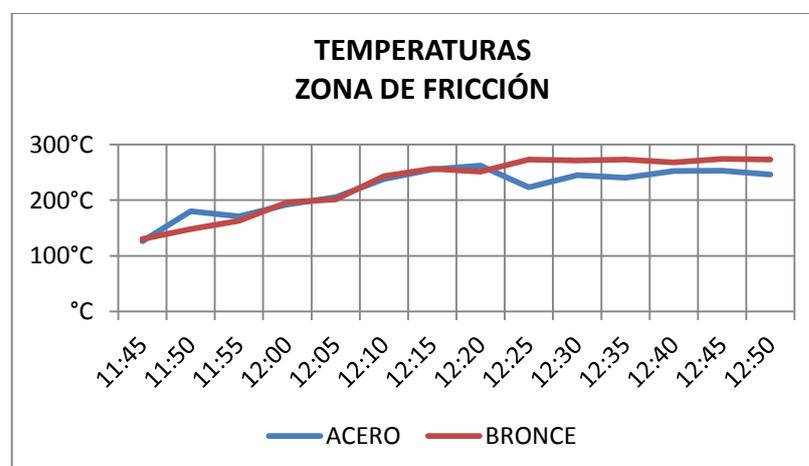
Se observa además del incremento de temperatura que se produce en el absorbedor, también tenemos un ligero aumento en la temperatura ambiente.



**Figura 28** Curva Temperatura Caldero Vs Irradiancia Experimento 3

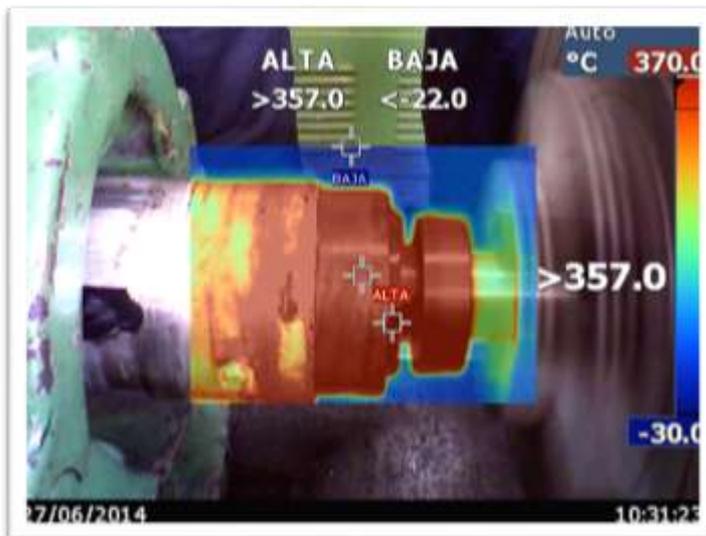
Es posible que podamos observar que la radiación solar de cierta manera constante durante el experimento ha producido un incremento de la temperatura en el caldero para el caso de los tres ensayos, de igual manera, aunque no tan notorio, se puede apreciar un incremento de la temperatura ambiente con el incremento de la irradiancia.

Si tomamos como muestra los datos del experimento con el Caldero de Vaporización Horizontal por fricción, tenemos la siguiente información que resulta interesante debido a que en la zona de temperaturas de entre 150 °C y 250 °C se produce una transferencia de calor desde el bronce al acero, como se puede ver en los gráficos siguientes:



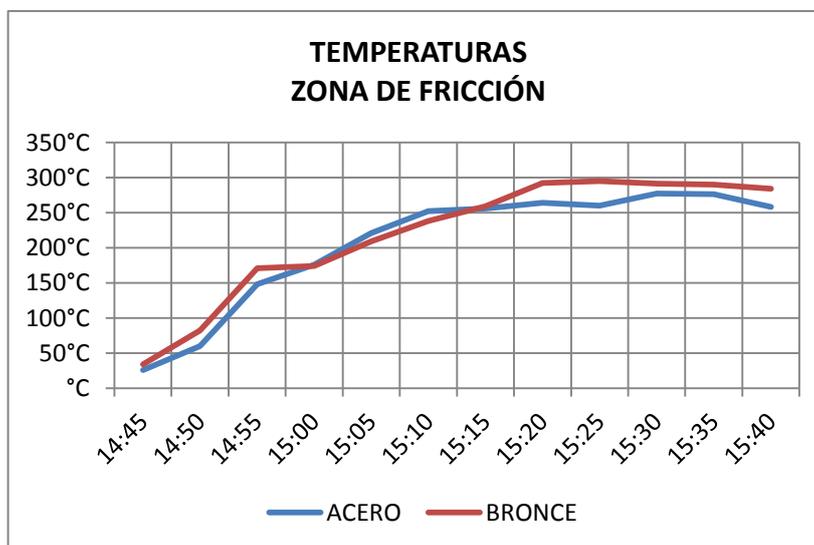
**Figura 29** Curva en Zona de Fricción Experimento 2

En cierto instante del experimento, el bronce también transfiere calor al acero.



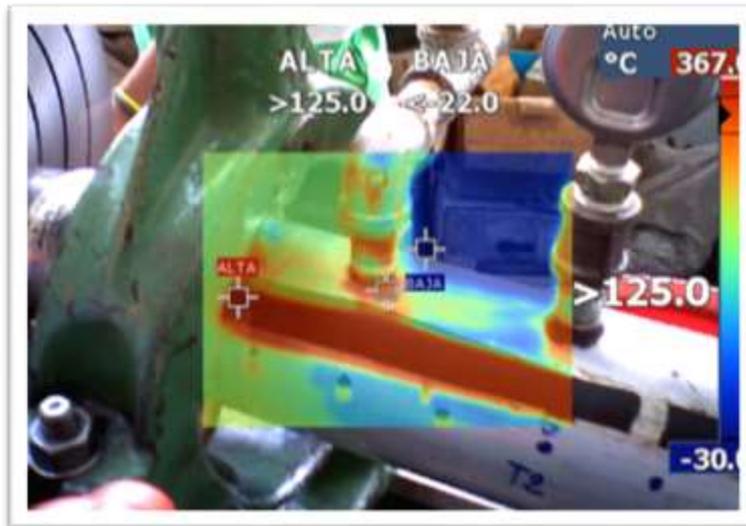
**Figura 30** Imagen Termográfica zona de fricción Bronce-Acero

La imagen muestra el calor producido en el punto de fricción durante un experimento realizado para caracterizar este caldero.



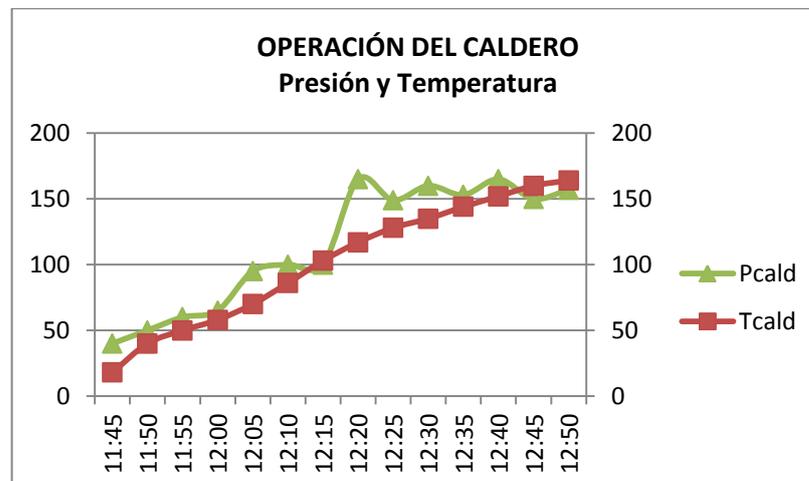
**Figura 31** Curva en Zona de Fricción Experimento 3

De igual manera podemos encontrar relación entre la temperatura en el caldero y la presión que se produce al tener cerrado el recipiente durante la prueba:



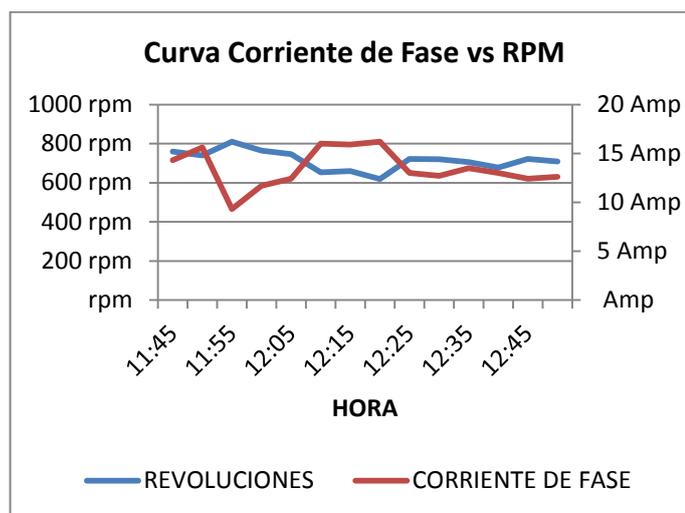
**Figura 32** Imagen Termográfica superficie del Caldero CVH

Se puede ver en la imagen 5.16 la temperatura sobre la superficie del caldero, la cual se visualiza con la ayuda de una cámara termográfica.



**Figura 33** Curva Presión-Temperatura en CVH

La relación que existe entre la corriente de fase y la velocidad de giro se puede visualizar en la curva siguiente en donde tenemos como dato importante que al incrementar la corriente, se ven disminuidas la cantidad de revoluciones en el punto de fricción, esto seguramente se debe a que el par de fricción genera mayor resistencia al expandirse por la temperatura y tiende a frenar el motor, lo cual provoca un aumento de la corriente por la carga que representa para el mismo, en estos eventos, se intervenía por parte del operador del ensayo, actuando sobre el equipo, separando muy lentamente y en distancias muy pequeñas el par de fricción.



**Figura 34** Curva de Corriente de Fase vs Velocidad de Giro

Podemos también establecer la energía eléctrica empleada para producir el vapor en el caldero:

**Tabla 14** Tabla con Potencia y Energía Eléctrica

ORDEN	FECHA	HORA	N	MOTOR		LUJO DEL PROCES				CALDERO		PAR DE FRICCIÓN		AMBIENTE		Potencia Eléctrica W	Energía Eléctrica Wh
	DD-MM-YYYY (24 horas)	RPM	I (A)	V (V)	Tfi (°C)	Tfo (°C)	Pfo (PSI)	Tcald (°C)	Pcald (PSI)	Tsa (°C)	Tsb (°C)	Va (m/s)	Ta (°C)				
1	22/08/2014	14:45	838	0	220	25	29	20	22	35	26	34	0,02	22	0	0	
2	22/08/2014	14:50	778	13	220	25	29	20	22	35	60	82	2,5	21	4877	406	
3	22/08/2014	14:55	738	13	220	25	24	15	36	30	148	171	2,3	21	4839	403	
4	22/08/2014	15:00	716	13	220	25	40	17	54	30	176	174	1,7	21	4954	413	
5	22/08/2014	15:05	708	16	220	25	46	25	71	40	221	209	2,15	21	6135	511	
6	22/08/2014	15:10	702	15	220	25	75	40	89	55	252	238	1,9	21	5792	483	
7	22/08/2014	15:15	634	17	220	25	90	70	104	83	256	259	1,8	21	6478	540	
8	22/08/2014	15:20	641	16	220	25	101	145	119	155	264	292	2,4	22	6135	511	
9	22/08/2014	15:25	645	18	220	25	117	115	133	125	260	295	2,3	22	6935	578	
10	22/08/2014	15:30	621	14	220	25	127	130	144	145	277	291	1,7	22	5259	438	
11	22/08/2014	15:35	706	12	220	25	136	140	153	160	276	290	2,2	22	4611	384	
12	22/08/2014	15:40	688	12	220	25	136	138	159	155	258	284	1,7	22	4573	381	
<b>DESCARGA DE VAPOR</b>																<b>Total</b>	<b>5049</b>

En el caso analizado se requiere aproximadamente 5 KWh de energía eléctrica para producir el vapor a la temperatura de 136 °C. Se debe recordar que el uso del torno con motor eléctrico es únicamente para efectos de simulación de la energía mecánica de rotación.

## 5.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE CALDEROS

Analizando los parámetros tabulados y dado el análisis de los resultados obtenidos de la experimentación, podemos establecer las condiciones de operación

que se presentan en los calderos analizados, sin dejar de mencionar que los prototipos han sido ensayados en un ambiente controlado que permite establecer ciertos condicionamientos que en la operación rutinaria pueden ocasionar resultados diferentes a los obtenidos en los ensayos mencionados:

#### 5.4.1. CALDERO DE VAPORIZACIÓN POR RADIACIÓN SOLAR CONCENTRADA

Para establecer las características de operación del caldero solar, analizaremos los resultados experimentales que hemos obtenido y a partir de ellos estableceremos las mismas.

**Tabla 15** Datos Tasa de Producción de Vapor Ensayo 1

ENSAYO 1		
VOLUMEN INICIAL DE AGUA:	500	cc
VOLUMEN FINAL DE AGUA:	351	cc
TIEMPO TRANSCURRIDO HASTA EBULLICIÓN:	25	minutos
VOLUMEN DE AGUA CONVERTIDA EN VAPOR:	149	cc
TASA DE CONVERSIÓN DE AGUA EN VAPOR:	255,4	cc/hora
PROMEDIO DE RADIACIÓN INCIDENTE:	907,92	W/m <sup>2</sup>

Se utiliza un volumen de agua de medio litro, el cual hierve a los 25 minutos.

**Tabla 16** Datos Tasa de Producción de Vapor Ensayo 2

ENSAYO 2		
VOLUMEN INICIAL DE AGUA:	500	cc
VOLUMEN FINAL DE AGUA:	334	cc
TIEMPO TRANSCURRIDO HASTA EBULLICIÓN:	20	minutos
VOLUMEN DE AGUA CONVERTIDA EN VAPOR:	166	cc
TASA DE CONVERSIÓN DE AGUA EN VAPOR:	249	cc/hora
PROMEDIO DE RADIACIÓN INCIDENTE:	941,69	W/m <sup>2</sup>

La radiación promedio en este caso es ligeramente superior a la del experimento 1, por lo cual el agua hierve a los 20 minutos.

**Tabla 17** Datos Tasa de Producción de Vapor Ensayo 3

ENSAYO 3		
VOLUMEN INICIAL DE AGUA:	500	cc
VOLUMEN FINAL DE AGUA:	379	cc
TIEMPO TRANSCURRIDO HASTA EBULLICIÓN:	30	minutos
VOLUMEN DE AGUA CONVERTIDA EN VAPOR:	121	cc
TASA DE CONVERSIÓN DE AGUA EN VAPOR:	242	cc/hora
PROMEDIO DE RADIACIÓN INCIDENTE:	998,23	W/m <sup>2</sup>

Se puede establecer entonces, con los datos de los experimentos anteriores un perfil de comportamiento del caldero de acuerdo a los datos promediados que obtenemos luego de analizar la cercanía de los mismos en los diferentes ensayos.

**Tabla 18** Datos Característicos del Caldero Solar

CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN		
TASA DE PRODUCCIÓN DE VAPOR:	249	cc/hora
IRRADIANCIA PROMEDIO REQUERIDA:	949	W/m <sup>2</sup>
TIEMPO PARA INICIAR EBULLICIÓN:	25	minutos
VOLUMEN DE CARGA DEL CALDERO:	500	cc

Se considera que la producción de vapor en el caldero se inicia cuando el agua empieza el proceso de ebullición, es por ello que la tasa de producción de vapor se calcula considerando el tiempo desde este momento del experimento.

Si se realiza el análisis de la eficiencia para este captador solar, se requiere los siguientes cálculos que se han tomado del estudio del equipo realizado por (Guasumba, Cocina Solar Portátil, 2005):

El coeficiente global de transferencia, tomado del análisis indicado, es  $U_i = 5.271$  W/m<sup>2</sup> °C.

La Razón de Concentración se calcula considerando el diámetro exterior del recipiente concentrador:

$$d_o = 0.109$$

$$A_{abs} = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4}$$

$$R_c = \frac{A_a}{A_{abs}}$$

Lo cual da como resultado:

$$R_c = 41.242$$

Ahora para el cálculo de la eficiencia óptica, se deberá considerar diversas perturbaciones en el proceso de captación, reflexión y absorción, ya que estarán presentes, imperfecciones superficiales, desplazamiento focal, pérdidas por no captación de radiación difusa, dificultades en el seguimiento, entre otras causas que disminuyen el valor de la eficiencia del dispositivo y se tiene:

$$\rho_r = 0.85$$

$$\tau = 0.95$$

$$\alpha = 0.95$$

$$\gamma = 0.95$$

$$F_e = 0.95$$

$$f_a = 0.95$$

Con estos valores se tiene la eficiencia óptica que sigue:

$$\eta_o = 0.658$$

Con esta eficiencia óptica y con los parámetros que se muestran a continuación, se podrá calcular la eficiencia del caldero solar en cada experimento tal como se muestra en la tabla

**Tabla 19** Eficiencia en los diferentes ensayos del Caldero Solar

Experimento	Ta	Tc	Gd	Rc	U <sub>i</sub>	$\eta_o$	$\eta_c$
1	15	89,3	908	41	5,271	65,80%	64,75%
2	17	88,3	942	41	5,271	65,80%	64,83%
3	19	84,9	998	41	5,271	65,80%	64,96%

Estos resultados permiten obtener como promedio de eficiencia del caldero el valor de **64.85%**.

#### 5.4.2. CALDERO DE VAPORIZACIÓN POR FRICCIÓN

El caldero de vaporización horizontal presenta ciertos parámetros adicionales como la potencia eléctrica utilizada para simular el movimiento mecánico de rotación que se requiere para generar el proceso de fricción que generará posteriormente el calor necesario para convertir el agua en vapor.

**Tabla 20** Datos Experimento 1 con CVH

ENSAYO 1		
VOLUMEN INICIAL DE AGUA:	1280	cc
VOLUMEN FINAL DE AGUA:	0	cc
TIEMPO TRANSCURRIDO HASTA EBULLICIÓN:	50	minutos
VOLUMEN DE AGUA CONVERTIDA EN VAPOR:	1280	cc
TASA DE CONVERSIÓN DE AGUA EN VAPOR:	1182	cc/hora
ENERGÍA ELÉCTRICA REQUERIDA:	4128	Wh
TEMPERATURA DE VAPOR:	152	°C
VELOCIDAD DE GIRO:	420	RPM

La velocidad de rotación en el par de fricción está colocada en 420 RPM y con ésta, el agua hierve a los 50 minutos aproximadamente.

**Tabla 21** Datos Experimento 2 con CVH

ENSAYO 2		
VOLUMEN INICIAL DE AGUA:	1280	cc
VOLUMEN FINAL DE AGUA:	0	cc
TIEMPO TRANSCURRIDO HASTA EBULLICIÓN:	30	minutos
VOLUMEN DE AGUA CONVERTIDA EN VAPOR:	1280	cc
TASA DE CONVERSIÓN DE AGUA EN VAPOR:	1182	cc/hora
ENERGÍA ELÉCTRICA REQUERIDA:	5988,85	Wh
TEMPERATURA DE VAPOR:	128	°C
VELOCIDAD DE GIRO:	720	RPM

Para este ensayo, la velocidad ha sido aumentada, con lo que se puede tener una mayor velocidad para que el agua hierva, a los 30 minutos.

**Tabla 22** Datos Experimento 3 con CVH

ENSAYO 3		
VOLUMEN INICIAL DE AGUA:	1280	cc
VOLUMEN FINAL DE AGUA:	0	cc
TIEMPO TRANSCURRIDO HASTA EBULLICIÓN:	30	minutos
VOLUMEN DE AGUA CONVERTIDA EN VAPOR:	1280	cc
TASA DE CONVERSIÓN DE AGUA EN VAPOR:	1396	cc/hora
ENERGÍA ELÉCTRICA REQUERIDA:	5048,93	Wh
TEMPERATURA DE VAPOR:	136	°C
VELOCIDAD DE GIRO:	720	RPM

Es necesario considerar que los ensayos dos y tres difieren del ensayo uno en la velocidad de giro en el punto de fricción, lo que sin duda modifica las condiciones de operación, es así que se evidencia un mayor tiempo para alcanzar la ebullición con la menor velocidad de giro.

Será importante además el efecto que tiene la variación de la velocidad de giro a medida que la fuerza de fricción en el punto de contacto ejerce un fenómeno de frenado que aumenta la corriente eléctrica en el motor y reduce la velocidad de giro, sin embargo aumenta la temperatura en el par de fricción.

**Tabla 23** Características de Operación del Caldero de Vaporización Horizontal

CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN		
TASA DE PRODUCCIÓN DE VAPOR:	3703	cc/hora
ENERGÍA PROMEDIO REQUERIDA:	5519	Wh
TIEMPO PARA INICIAR EBULLICIÓN:	30	minutos
VOLUMEN DE CARGA DEL CALDERO:	1800	cc
TEMPERATURA DE VAPOR:	132	°C
VELOCIDAD DE GIRO:	720	RPM

Si se aplica el análisis de la eficiencia del caldero horizontal, se debe iniciar considerando el calor en el punto de fricción con la expresión:

$$Q_f = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu_k \cdot P_a \cdot \omega \cdot (R_s^3 - R_p^3)$$

En nuestro análisis tenemos, para el par de fricción de acero y bronce:

$$\mu_k = 0.18 \text{ coeficiente cinético de rozamiento}$$

$$R_s = 0.7 \text{ m}$$

$$R_p = 0.015 \text{ m}$$

Con la velocidad de 720 RPM, podemos calcular:

$$\omega = \frac{720 \cdot 2 \cdot \pi}{60}$$

$$\omega = 75.4 \text{ rad/seg}$$

De ensayos experimentales del resorte utilizado con el caldero horizontal, se obtienen los siguientes datos:

$$F_a = 2500 \text{ N}$$

$$P_a = 1,702 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

A partir de estos resultados, se puede calcular:

$$Q_f = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot 0.18 \cdot 1,702 \times 10^5 \cdot 75.4 \cdot (0.07^3 - 0.015^3)$$

$$Q_f = 1054,67 \text{ W}$$

Asimismo podemos calcular para el caldero, el calor utilizado para el proceso:

$$Q_u = \frac{1.28 \text{ Kg} \cdot 4184 \cdot (80 - 20)}{45 \cdot 60}$$

$$Q_u = 119.01 \text{ W}$$

Las pérdidas por convección con el aire se calculan a continuación:

$$A_{Ext} = \pi \cdot D_o \cdot L$$

$$A_{Ext} = \pi \cdot 0.10 \text{ m} \cdot 0.60 \text{ m}$$

$$A_{Ext} = 0.18849 \text{ m}^2$$

En la superficie del caldero la temperatura es:

$$T_s = 102.49 \text{ }^\circ\text{C}$$

El calor perdido está dado por:

$$Q_p = 10 \cdot 0.18849 \cdot (102.49 - 20)$$

$$Q_p = 155.48 \text{ W}$$

El calor necesario es la suma de los anteriores:

$$Q_N = Q_u + Q_p$$

$$Q_N = 119.01 + 155.48$$

$$Q_N = 274.49 \text{ W}$$

La eficiencia en el caldero viene dada por:

$$\eta_{caldero} = \frac{119.01}{274.49} = 0.43356$$

$$\eta_{caldero} = 43.3 \%$$

Ahora se deben considerar las pérdidas mecánicas del banco de simulación de pruebas con el caldero.

Se tiene el calor de fricción:

$$Q_f = 1054,67 \text{ W}$$

La eficiencia mecánica de esta transferencia de calor será:

$$\eta_{mec} = \frac{274.49}{1054.67} = 0.26026$$

$$\eta_{mec} = 26.02 \%$$

El conjunto de pérdidas mecánicas y en el caldero dan como resultado una eficiencia de:

$$\eta_T = \eta_{caldero} \cdot \eta_{mec}$$

$$\eta_T = 0.433 \cdot 0.26026$$

$$\eta_T = 0.1126$$

$$\eta_T = \mathbf{11.26 \%}$$

Es entonces este valor, la real eficiencia del caldero horizontal de vaporización.

## 5.5 APLICACIONES FUTURAS

El desarrollo alcanzado en las dos tecnologías analizadas es aún insuficiente como para superar los resultados de tecnologías convencionales de similar aplicación, con respecto a la futura aplicación de las mismas esto estará condicionado a requerimientos específicos y a la disponibilidad de los recursos naturales en el medio a intervenir, es decir, si se dispone de un potencial de energía mecánica de rotación que pueda ser utilizado para nuestro caldero de vaporización horizontal, se pueden solventar necesidades de calefacción, esterilización de material médico, cocción de

alimentos o aplicaciones derivadas del uso del vapor que se podría producir con el prototipo planteado.

Asimismo, el caldero con el concentrador de radiación solar será una alternativa para el uso en cocción de alimentos, generación de vapor o agua caliente para aplicaciones puntuales, o para mantener un pequeño ambiente con temperatura controlada utilizando la energía que podría captarse con el prototipo estudiado en este documento.

## **CAPITULO 6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **6.1 CONCLUSIONES**

- Una vez realizado el presente proyecto de investigación en el cual se han analizado dos prototipos de energías alternativas, es importante considerar que el enfoque dado al mismo es la profundización de conocimientos y reforzamiento de los mismos en el campo práctico al realizar ensayos y verificar los parámetros que se conceptualizaron a lo largo de la maestría en Energías Renovables.
- El equipo que se utilice en cada caso deberá ser considerado bajo análisis del uso final que se desee para el mismo y además de la disponibilidad del recurso en la localidad.
- Los caldero solares presentan una prometedora futura aplicación como alternativa de calentamiento de agua con fines de cocción de alimentos en zonas rurales con buena incidencia de radiación solar, el desarrollo de la tecnología actual permite pensar en un mejor desempeño de los equipos de concentración de energía solar, teniendo siempre la idea de preservación ambiental como parámetro influyente en la decisión de la tecnología a usar.

- Se puede pensar además que la energía solar requerida puede tener aplicaciones útiles a corto plazo y con relativa economía si se analizan prototipos de cocinas solares existentes en el mercado.
- Una variable crítica como no podría ser de otra manera es la Irradiancia y por ello se requiere de días despejados y condiciones ambientales como baja velocidad del viento para mejorar los resultados de este tipo de tecnología solar.
- En lo que se refiere al caldero de vaporización horizontal, se obtuvieron datos importantes sobre la producción de vapor, aprovechando el calor del proceso de fricción de dos metales como el acero y el bronce, sin embargo, la simulación de este fenómeno de fricción representa un consumo elevado de energía en el motor eléctrico y se requiere además corregir el fenómeno de frenado que se produce por la expansión de los metales en el punto de rozamiento, fenómeno que puede afectar el proceso si ocasiona una deformación en el par de fricción o a algún otro componente.
- Se tienen además datos importantes en lo referente al comportamiento de las temperaturas en la superficie del caldero, las cuales no varían de forma lineal, sino más bien tienen un comportamiento oscilatorio a medida que se aumenta la temperatura y que se produce la ebullición en el interior del caldero
- Al tratarse de unos prototipos de experimentación, los valores resultantes servirán para evolucionar el diseño con el fin de conseguir mejores condiciones de operación a medida que los estudios de estos sean ampliados.
- La eficiencia del caldero de vaporización horizontal es aún baja como para su utilización y posible construcción para fines comerciales.
- EL caldero solar tiene una buena eficiencia alrededor de 64% lo que beneficia su uso y construcción con fines comerciales, para lugares con buena radiación y como alternativa limpia para cocción de alimentos.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Para el caldero solar se debe tener muy en cuenta la Irradiancia en la zona a aplicar, además como consideración operativa se debe prestar atención a la limpieza de la superficie reflectiva que beneficiará al caldero al tener mayor cantidad de energía reflejada.
- La operación del caldero solar permitirá que sea aplicado en sistemas de cocción ya que los tiempos para alcanzar la ebullición son aceptables del orden de los 25 minutos y sus temperaturas no exceden valores críticos para los alimentos, ya que se encuentran en rangos de entre 80 y 120 °C.
- Para el Caldero de Vaporización Horizontal se recomienda la colocación de sensores que permitan automatizar la toma de datos de temperatura superficial y adicional se debería considerar la colocación del aislamiento térmico en la superficie para reducir las pérdidas por convección con el aire.
- El acople de los sensores y los acoples para el ingreso y salida del fluido deben ser sellados de mejor manera, ya que se evidenciaron fugas de vapor cuando se tienen temperaturas muy cercanas al vapor de salida deseado de 160 °C.
- Sería conveniente realizar además la automatización del proceso de evacuación de vapor del caldero para que el proceso de producción sea continuo.
- La eficiencia del prototipo es muy baja y se deberá trabajar en la misma, mejorando el diseño, para lo cual se podría iniciar colocando aislamiento térmico en la superficie del caldero y cambiando el material de bronce por uno de diferentes características, para el proceso de fricción.
- Con los datos obtenidos y analizados en el presente proyecto, se deja materia prima para futuros desarrollos que podrán continuar su investigación desde nuestra contribución en adelante.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almanza, R., & Muñoz, F. (1993). *Ingeniería de la Energía Solar*. México: El Colegio Nacional.
- Benavides, S., & Guasumba, J. (2006). *Cocina Solar de Tipo Cilíndrico Parabólico*. Sangolquí.
- Bolton, W. (1990). *Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. México: Alfaomega.
- Cengel, Y. (2003). *Transferencia de Calor*. México: Mc. Graw Hill.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2000). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.
- Chapman, J. S. (1976). *Máquinas Eléctricas*. México: Mc. Graw Hill.
- DIAZ, A. P. (2012). *SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN DE ENERGÍA SOLAR*. BOGOTA - COLOMBIA: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1974). *Solar Energy Thermal Processes*. Nueva York: John Wiley and Sons.
- Gieck, K. (1975). *Manual de Fórmulas Técnicas*. México: Representaciones y servicios de Ingeniería.
- Guasumba, J. (2004). *Método para la Generación, Transferencia y Aprovechamiento de la Alta Energía Calórica Producida por el Rozamiento Deslizante en Capa Semisólida de Bronce*. Sangolquí.
- Guasumba, J. (2005). *Cocina Solar Portátil*. QUITO: CITECNIA CORP.
- Guasumba, J. (2005). *Sistema Termomecánico de alta energía alternativa para generar vapor por fricción*. Sangolquí.
- Guasumba, J. (2014). *Análisis y aprovechamiento de la energía térmica por fricción en película semisólida rotatoria de aleación Cu-Sn, bajo los efectos de alta presión*. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo.
- Horta, J. (1998). *Técnicas de Automatización Industrial*. México: Limusa.
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: Prentice Hall.
- Jutglar, L. (2004). *Energía Solar*. Barcelona: Ceac.
- Mills, A. (s.f.). *Transferencia de Calor*. España: IRWIN.
- Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México: Pears.

Rohner, P. (1990). *Control for Industrial Automation*. New York: Wiley.

Sánchez, F. (2004). *Energía Solar*. España: Cencer.

Shigley, J. (1989). *Manual de Diseño Mecánico*. México: McGraw Hill.

VALLE, D. J. (2012). *CALDEROS*. GUAYAQUIL: UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL.

Wen-Lih Chen, Y.-C. Y.-S. (2008). *Estimation of heat generation at the interface of cylindrical bars during friction process*. Department of Mechanical Engineering. Yung-Kang City: Clean Energy Center.

**ANEXOS**

**ANEXO 1**  
**TABLAS DE DATOS EXPERIMENTALES CALDERO SOLAR**

FECHA		27/11/2015					
Hora	Tiempo (minutos)	Temperatura ambiente		TA (°C)	HR (%)	Radiación W/m <sup>2</sup>	Observaciones
		Sombra (°C)	Visible (°C)				
10:35	0	15	21	31,9	36	898	
10:40	5	15	22	44,3	38	896	
10:45	10	16	22	70,5	36	902	
10:50	15	15	21	82,3	38	904	
10:55	20	16	21	83,9	38	910	
11:00	25	15	22	85,4	36	913	
11:05	30	16	21	85,4	32	706	Nubosidad
11:10	35	16	21	89,3	34	950	Hierve el agua
11:15	40	16	21	84	34	953	
11:20	45	15	22	85,9	34	928	
11:25	50	16	21	81	36	840	Nubosidad
11:30	55	17	22	84,4	34	1000	
11:35	60	17	23	86,5	34	1003	
FIN DEL ENSAYO							

FECHA		29/11/2014					
Hora	Tiempo (minutos)	Temperatura ambiente		TA (°C)	HR (%)	Radiación W/m <sup>2</sup>	Observaciones
		Sombra (°C)	Visible (°C)				
12:25	0	17	19	34,6	32	970	
12:30	5	18	19	36,2	31	976	
12:35	10	18	21	41,5	32	963	
12:40	15	18	21	56,5	33	954	
12:45	20	18	21	58,2	34	943	
12:50	25	19	22	72,4	31	980	
12:55	30	19	23	74,5	30	964	
13:00	35	17	21	75,1	32	750	Nubosidad
13:05	40	17	21	74,2	34	812	Hierve el agua
13:10	45	18	22	78,5	32	965	
13:15	50	19	22	82,4	31	980	
13:20	55	19	21	82,1	34	954	
13:25	60	21	23	88,3	33	1031	
FIN DEL ENSAYO							



FECHA	04/12/2014						
Hora	Tiempo (minutos)	Temperatura ambiente		TA	HR	Radiación	Observaciones
		Sombra (°C)	Visible (°C)	(°C)	(%)	W/m <sup>2</sup>	
11:15	0	19	23	31,5	32	958	
11:20	5	21	25	38,5	32	987	
11:25	10	21	24	44,4	32	1000	
11:30	15	22	25	59,6	31	1031	
11:35	20	21	24	65,4	32	1121	
11:40	25	22	25	79,6	32	1010	
11:45	30	21	25	80,4	31	998	Hierve el agua
11:50	35	22	24	81,3	32	1035	
11:55	40	21	24	81,5	34	985	
12:00	45	22	25	80,6	33	990	Ligera nubosidad
12:05	50	22	26	82,3	33	965	
12:10	55	22	26	80,7	32	941	
12:15	60	22	26	84,9	32	956	

FIN DEL ENSAYO

## ANEXO 2

## TABLAS DE DATOS EXPERIMENTALES CALDERO POR FRICCIÓN

## EXPERIMENTO 1

ORDEN	FECHA	HORA	N RPM	MOTOR		FLUJO DEL PROCESO			CALDERO		PAR DE FRICCIÓN		AMBIENTE	
	DD-MM-YYYY	(24 horas)		I (A)	V (V)	Tfi (°C)	Tfo (°C)	Pfo (PSI)	Tcald (°C)	Pcald (PSI)	Tsa (°C)	Tsb (°C)	Va (m/s)	Ta (°C)
1	26/06/2014	11:10	420	7,1	220	20	20	20	8	25	32	39	0,23	22
2	26/06/2014	11:15	420	8,1	220	20	20	20	10	25	52	48	0,47	21
3	26/06/2014	11:20	420	7,7	220	20	22	20	14	25	76	66	0,52	21
4	26/06/2014	11:25	420	8,8	220	20	28	20	24	25	100	80	1,3	21
5	26/06/2014	11:30	420	7,3	220	20	34	20	32	30	106	102	0,6	21
6	26/06/2014	11:35	420	9	220	21	40	20	42	30	134	126	0,6	21
7	26/06/2014	11:40	420	9,3	220	26	52	20	54	40	116	140	0,7	21
8	26/06/2014	11:45	420	7,1	220	30	58	20	62	50	120	113	0,7	20
9	26/06/2014	11:50	420	10	220	35	62	20	66	55	135	148	0,82	20
10	26/06/2014	11:55	420	11	220	40	70	20	80	95	165	201	0,82	20
11	26/06/2014	12:00	420	15	220	44	84	55	100	60	200	215	0,72	20
12	26/06/2014	12:05	420	7,1	220	58	104	85	120	100	232	185	0,62	20
13	26/06/2014	12:10	420	13	220	70	112	140	132	160	225	250	0,63	20
14	26/06/2014	12:15	420	10	220	82	152	85	142	95	200	181	0,66	21

DESCARGA DE VAPOR

ORDEN	FECHA DD-MM-YYYY	HORA (24 horas)	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
			95	140	185	230	275	320	365	410	455	500	545	590
			T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)	T9 (°C)	T10 (°C)	T11 (°C)	T12 (°C)
1	26/06/2014	11:10	17	17	18	17,2	21	25,3	21	20,7	22	22,4	22,6	21
2	26/06/2014	11:15	20	20	23	24,3	24,7	25,6	20,8	20,5	20,4	20	21,2	21
3	26/06/2014	11:20	22,5	22	28	26,6	26,5	26,4	22,5	21,4	21,5	23,2	22,8	21
4	26/06/2014	11:25	26	24	28	23,6	28,2	28,1	23,6	22,7	22,7	23,5	23	24
5	26/06/2014	11:30	26	27	25	22,5	26,1	24,3	22,8	23,3	22,3	22,3	22,8	22
6	26/06/2014	11:35	27,5	29	27	28,8	24,5	29,7	24	23,8	23,5	23	24,2	25
7	26/06/2014	11:40	30,3	27	29	25	20	27,2	25,3	25,2	24,5	25,7	24,9	24
8	26/06/2014	11:45	31	30	29	31,4	37	32,5	26,5	26,5	26,4	26,7	25,8	25
9	26/06/2014	11:50	35	29	28	25,8	24,2	29	24,3	24,4	21	25	24,7	24
10	26/06/2014	11:55	39	34	31	33,3	27,4	32	27,9	28,5	26,6	28,4	28	32
11	26/06/2014	12:00	40	36	30	29,7	31	32,4	28,3	28,1	28,5	27,5	27,8	31
12	26/06/2014	12:05	46	41	34	34,1	29,4	41	34,5	31,7	33,7	33,4	31,5	37
13	26/06/2014	12:10	54,2	47	37	36,2	37	39,2	35,7	39,3	38,7	36,5	33,2	35
14	26/06/2014	12:15	74	60	46	36,2	38,8	41	37,5	39	33,6	35,6	37,6	34

DESCARGA DE VAPOR

## EXPERIMENTO 2

ORDEN	FECHA	HORA	N RPM	MOTOR		FLUJO DEL PROCESO			CALDERO		PAR DE FRICCIÓN		AMBIENTE	
	DD-MM-YYYY	(24 horas)		I (A)	V (V)	Tfi (°C)	Tfo (°C)	Pfo (PSI)	Tcald (°C)	Pcald (PSI)	Tsa (°C)	Tsb (°C)	Va (m/s)	Ta (°C)
1	22/08/2014	11:45	760	14	220	24	24	25	18	40	126	130	1,9	21
2	22/08/2014	11:50	740	16	220	24	38	30	40	50	180	148	2,14	21
3	22/08/2014	11:55	810	9,3	220	24	50	40	50	60	171	163	3,01	21
4	22/08/2014	12:00	765	12	220	24	58	55	58	65	192	196	2,5	20
5	22/08/2014	12:05	746	12	220	24	64	80	70	95	205	201	2,8	20
6	22/08/2014	12:10	654	16	220	24	78	85	86	100	238	243	2,7	20
7	22/08/2014	12:15	659	16	220	24	89	90	103	100	255	256	2,25	20
8	22/08/2014	12:20	619	16	220	24	102	105	117	165	262	251	2,13	20
9	22/08/2014	12:25	722	13	220	24	114	140	128	149	223	273	2,5	20
10	22/08/2014	12:30	720	13	220	24	119	130	135	160	245	271	2,3	21
11	22/08/2014	12:35	706	14	220	24	126	145	144	153	240	273	2	21
12	22/08/2014	12:40	678	13	220	24	135	145	152	165	252	268	2,3	21
13	22/08/2014	12:45	721	12	220	24	131	130	160	150	253	274	2	21
14	22/08/2014	12:50	709	13	220	24	128	140	164	157	246	273	2,2	21

DESCARGA DE VAPOR

ORDEN	FECHA	HORA	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
	DD-MM-YYYY	(24 horas)	95	140	185	230	275	320	365	410	455	500	545	590
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
			(°C)											
1	22/08/2014	11:45	22	20	19	24	23	21	24	23	20	23	24	23
2	22/08/2014	11:50	67	45	42	40	36	39	37	34	33	35	35	33
3	22/08/2014	11:55	75	61	58	54	52	50	49	50	48	47	46	46
4	22/08/2014	12:00	78	65	63	62	59	56	56	57	56	54	53	53
5	22/08/2014	12:05	92	80	76	73	71	71	70	69	63	60	64	63
6	22/08/2014	12:10	118	99	94	90	84	82	84	84	81	82	83	80
7	22/08/2014	12:15	130	114	108	103	102	102	97	100	102	98	101	91
8	22/08/2014	12:20	139	126	123	121	117	117	115	112	112	112	112	112
9	22/08/2014	12:25	143	124	126	122	130	130	123	127	128	123	123	121
10	22/08/2014	12:30	156	137	138	136	132	132	133	134	132	131	130	132
11	22/08/2014	12:35	165	148	146	142	137	137	129	134	140	141	140	134
12	22/08/2014	12:40	170	170	153	152	148	148	151	149	149	150	147	145
13	22/08/2014	12:45	171	165	164	162	154	154	155	159	156	154	157	154
14	22/08/2014	12:50	175	172	168	166	165	164	160	161	162	162	162	160

DESCARGA DE VAPOR

### EXPERIMENTO 3

ORDEN	FECHA	HORA	N	MOTOR		FLUJO DEL PROCESO			CALDERO		PAR DE FRICCIÓN		AMBIENTE	
	DD-MM-YYYY	(24 horas)	RPM	I (A)	V (V)	Tfi (°C)	Tfo (°C)	Pfo (PSI)	Tcald (°C)	Pcald (PSI)	Tsa (°C)	Tsb (°C)	Va (m/s)	Ta (°C)
1	22/08/2014	14:45	838	0	220	25	29	20	22	35	26	34	0,02	22
2	22/08/2014	14:50	778	13	220	25	29	20	22	35	60	82	2,5	21
3	22/08/2014	14:55	738	13	220	25	24	15	36	30	148	171	2,3	21
4	22/08/2014	15:00	716	13	220	25	40	17	54	30	176	174	1,7	21
5	22/08/2014	15:05	708	16	220	25	46	25	71	40	221	209	2,15	21
6	22/08/2014	15:10	702	15	220	25	75	40	89	55	252	238	1,9	21
7	22/08/2014	15:15	634	17	220	25	90	70	104	83	256	259	1,8	21
8	22/08/2014	15:20	641	16	220	25	101	145	119	155	264	292	2,4	22
9	22/08/2014	15:25	645	18	220	25	117	115	133	125	260	295	2,3	22
10	22/08/2014	15:30	621	14	220	25	127	130	144	145	277	291	1,7	22
11	22/08/2014	15:35	706	12	220	25	136	140	153	160	276	290	2,2	22
12	22/08/2014	15:40	688	12	220	25	136	138	159	155	258	284	1,7	22

DESCARGA DE VAPOR

ORDEN	FECHA	HORA	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
	DD-MM-YYYY	(24 horas)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)	T9 (°C)	T10 (°C)	T11 (°C)	T12 (°C)
1	22/08/2014	14:45	33	31	30	29	28	27	27	26	26	26	25	25
2	22/08/2014	14:50	35	31	30	29	29	28	28	29	28	28	28	28
3	22/08/2014	14:55	54	49	45	42	40	37	36	34	35	35	35	34
4	22/08/2014	15:00	80	66	60	58	56	55	51	52	51	49	48	41
5	22/08/2014	15:05	101	81	78	74	70	70	68	61	65	60	62	63
6	22/08/2014	15:10	111	99	94	91	90	89	88	87	84	83	82	75
7	22/08/2014	15:15	130	102	111	108	105	82	84	100	101	95	96	83
8	22/08/2014	15:20	145	126	121	110	111	106	115	107	106	113	106	107
9	22/08/2014	15:25	154	136	134	136	124	110	126	128	127	123	127	112
10	22/08/2014	15:30	157	151	148	146	143	121	137	128	135	125	141	138
11	22/08/2014	15:35	173	158	156	155	154	149	152	151	145	145	147	147
12	22/08/2014	15:40	171	161	154	152	159	136	155	157	155	154	154	150

EVACUACION DE VAPOR

**ANEXO 3**  
**IMÀGENES TERMOGRÀFICAS DEL CALDERO HORIZONTAL EN**  
**FUNCIONAMIENTO**

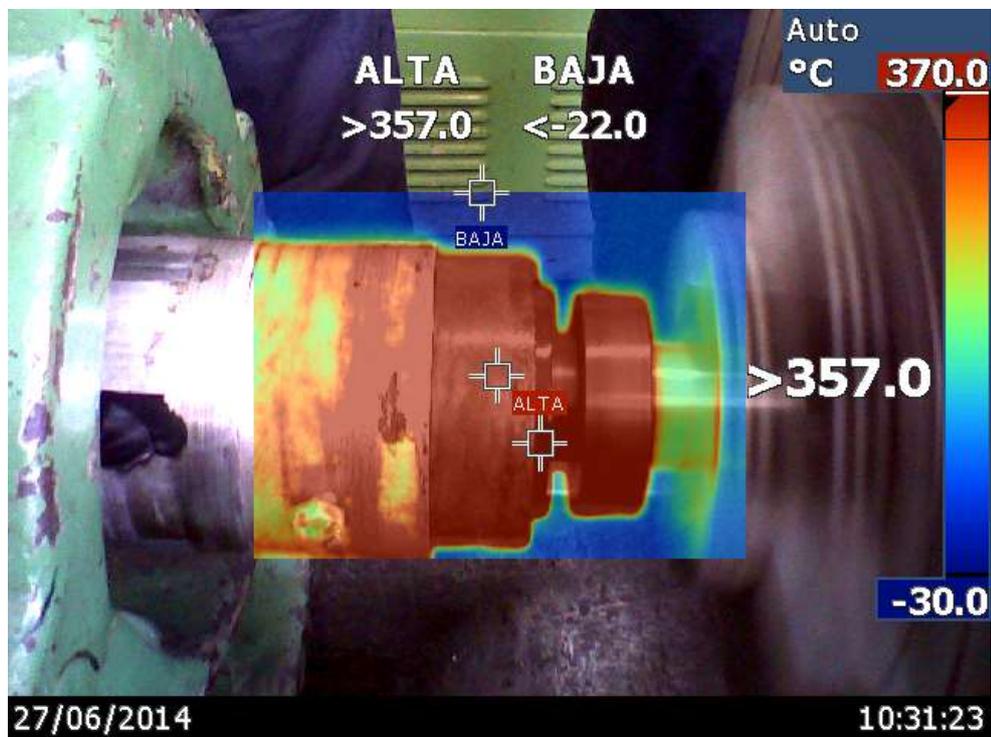


Imagen de en área de fricción con temperaturas superiores a 300 grados centígrados

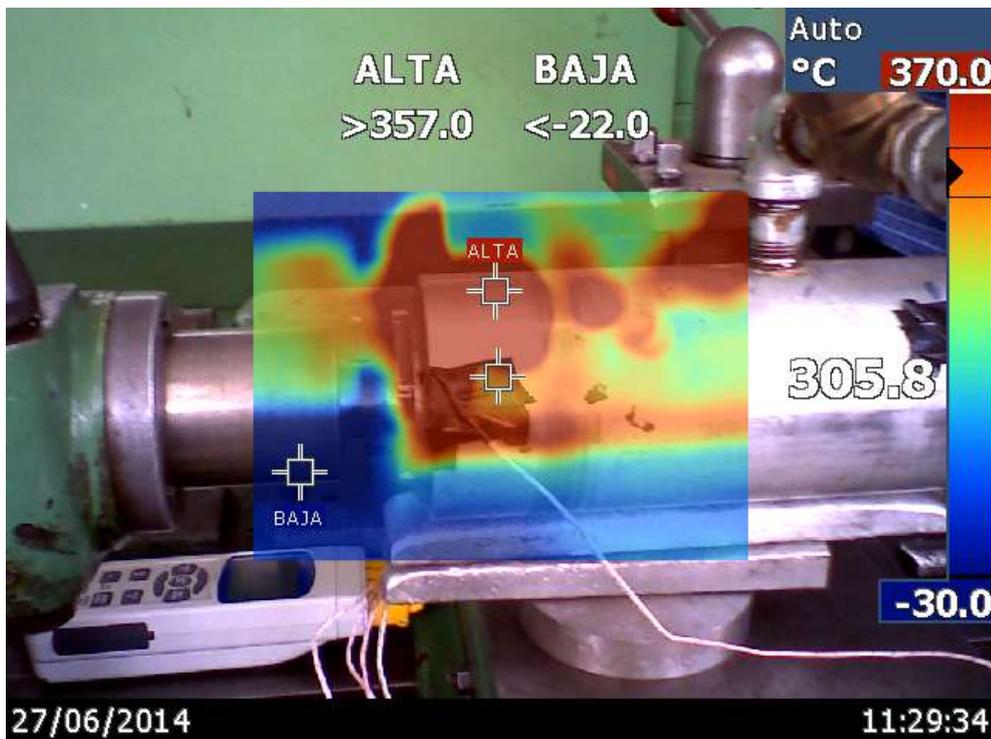
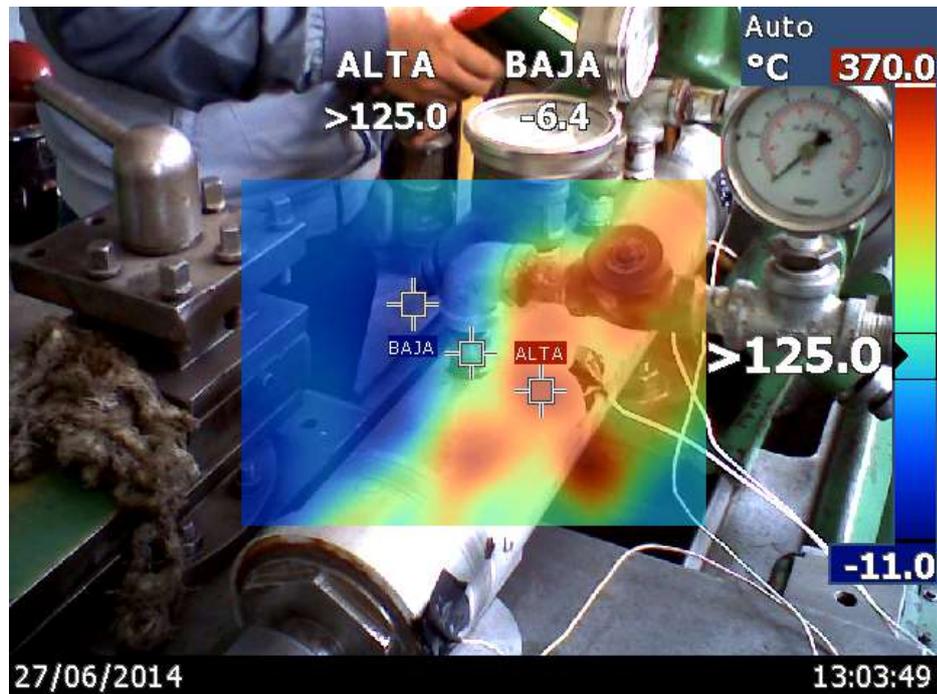


Imagen termográfica en la parte posterior del caldero, en el punto de acoplamiento durante el experimento.



Temperatura en la superficie del caldero durante el proceso de fricción, se ven elementos de medición y tuberías de los fluidos.



Temperatura en accesorios de la tubería galvanizada utilizada en el proceso de calentamiento de agua con el CVH.

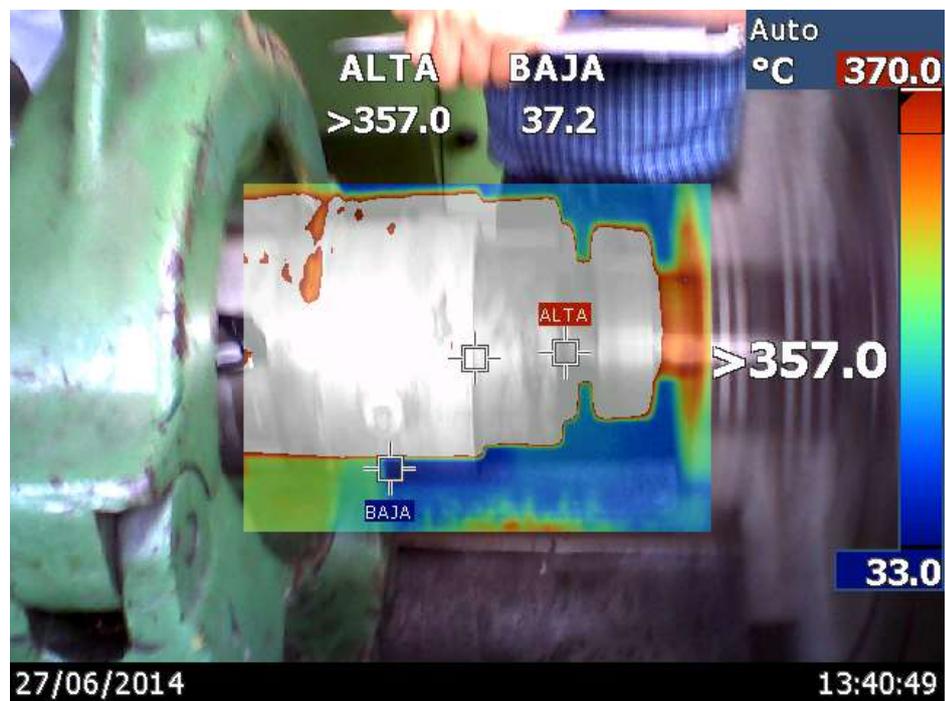
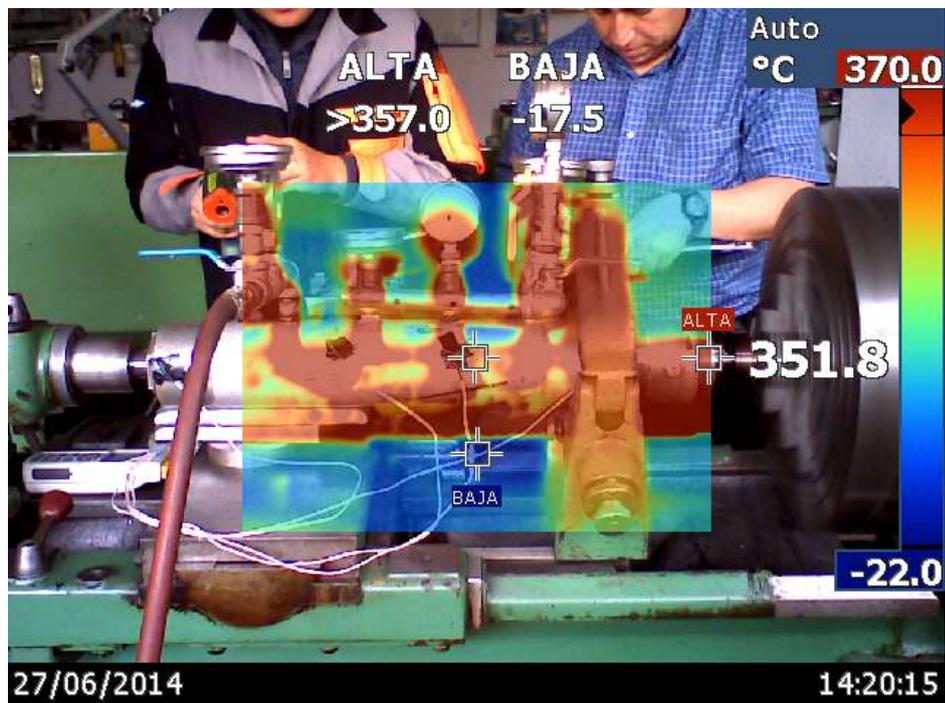


Imagen tomada mientras se desarrolla el proceso de rotación que genera el calor del proceso en el par de fricción.

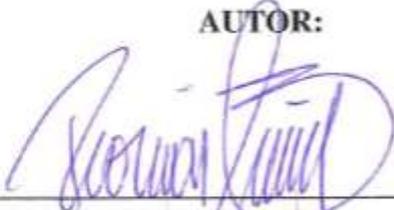


Una imagen panorámica del equipo completo durante la operación sobre el banco de pruebas del laboratorio.

## LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“CARACTERIZACIÓN DE UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN  
HORIZONTAL Y UN CALDERO DE VAPORIZACIÓN POR RADIACIÓN  
SOLAR CONCENTRADA”.**

**AUTOR:**



---

**ING. ROMAN MAURICIO BUÑAY ANDRADE**

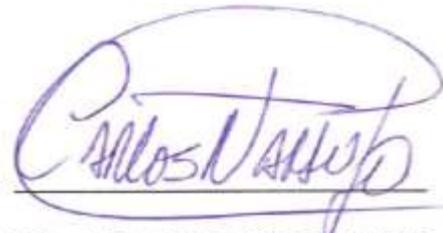
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**



---

**MSc. ING. ALEXANDER IBARRA**

**COORDINADOR**

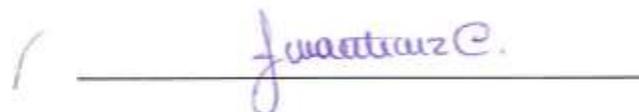


---

**MSc. ING. CARLOS NARANJO**

**DIRECTOR DEL DECEM**

**UNIDAD DE GESTIÓN DE POSGRADOS**



---

**DRA. AMPARO MARTÍNEZ, PhD  
DIRECTORA DE LA UGP**

Sangolquí – Ecuador

Febrero 02, 2015