



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA**

**SISTEMA PARA GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO  
DE CALOR DE PROCESO MEDIANTE  
UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO PUNTUAL (COSPAA-90)**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

**ENERGÍA- SOLAR FOTOTÉRMICA**

PRESENTA:

**ING. EDUARDO VENEGAS REYES**

TUTOR:

**DR. OSCAR ALFREDO JARAMILLO SALGADO**



2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Roberto Best y Brown

Secretario: Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado

Vocal: Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes

1er. Suplente: Dr. Rubén José Dorantes Rodríguez

2do. Suplente: Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar

Lugar donde se realizó la tesis:

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA, TEMIXCO, MORELOS.

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado

---

## **Dedicatorias**

A mis padres:

Maximino y Olga, que me han dado cariño, sustento, ejemplo y guía en mi vida.

A mi novia:

Berenice, a quien amo con todo mi corazón.

A mis hermanos:

Hugo, Maximino, Olga y Alejandra, con quienes he compartido toda una vida.

A mis sobrinitos: Sofia, Hugo y Maximino, que traen felicidad y amor a nuestra familia.

A mis tíos:

José Venegas y Marco Antonio Reyes, que me han apoyado y dado buenos consejos.

A mis amigos, a quienes tengo en gran estima.

## **Agradecimientos**

A mi director de tesis:

Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado, por su tiempo y apoyo en la realización de esta tesis.

A los miembros de mi comité tutorial:

Dr. Roberto Best y Brown  
Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado  
Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes  
Dr. Rubén José Dorantes Rodríguez  
Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar

Por su tiempo y sus comentarios en todo momento objetivos y útiles.

Al CONACYT por otorgarme la beca que me permitió realizar mis estudios de maestría.

A la DGAPA y al responsable del proyecto Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado por la beca otorgada a través del proyecto PAPIIT con clave 1N106207-3 “Concentradores Solares de Canal Parabólico para la Generación Directa de Vapor Aplicado a la Pasteurización de Tierras en Viveros”.

A los miembros de la coordinación de concentración solar, en especial al Dr. Camilo Arancibia, al Dr. Carlos Alberto Pérez Rábago y al Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar por las facilidades prestadas y por su ayuda en la realización de los experimentos.

Al Dr. Victor Hugo Gómez y al M.I. José Vidal por su ayuda en la calibración de los sensores de presión.

A mi familia por todo el cariño y apoyo que he recibido.

A todos mis amigos, en especial a Romeli, Lizbeth, Diane, Bety, Paco, Lupita y Harumi por su amistad y apoyo.

A mi novia Berenice por su amor, comprensión y apoyo.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	
1.1 Calor de Proceso, Contaminación Ambiental y Energía Solar	1
1.2 Tecnología de Foco Puntual	2
1.3 Trabajos Previos	3
1.4 Objetivos	6
<b>2. Puesta a Punto del COSPAA-90</b>	
2.1 Descripción del Sistema de Concentración	10
2.2 Descripción del sistema de Seguimiento	10
2.2.1 Calibración del Sistema de Seguimiento	13
2.2.2 Prueba del Sistema de Seguimiento	14
2.3 Descripción del Sistema de Suministro y Almacenamiento de Agua Caliente	16
2.3.1 Termotanque	17
2.3.2 Sistema Eléctrico	17
2.3.3 Sistema Hidráulico	18
2.4 Funcionamiento del Sistema	18
2.5 Caracterización del Termotanque	19
2.5.1 Prueba para 40°C	21
2.5.2 Prueba para 50°C	22
2.5.3 Prueba para 60°C	23
2.5.4 Coeficiente Global de Pérdidas	24
<b>3. Modelo Teórico del Receptor</b>	
3.1 Modelo Teórico	27
<b>4. Metodología Experimental</b>	
4.1 Requerimientos del Sistema	33
4.2 Instrumentación del Receptor	34
4.3 Instrumentación para Medición de Flujo	35
4.4 Acoplamiento de los Subsistemas	36
4.5 Diseño de los Experimentos	38
4.5.1 Eficiencia Térmica	38
4.5.2 Constante de Tiempo del Colector	39
4.5.3 Experimento en Circuito Cerrado	40
4.5.4 Experimento con Diferentes Temperaturas a Flujo Constante	40
4.5.5 Experimento para Obtener la Constante de Tiempo	42

<b>5. Análisis de Resultados Teóricos y Experimentales</b>	
5.1 Resultados en circuito cerrado	45
5.2 Resultados del Experimento de Circuito Abierto	48
5.2.1 Resultados para 1 lpm	48
5.2.2 Resultados para 2 lpm	49
5.2.3 Resultados para 3 lpm	51
5.3 Eficiencias para Distintos Flujos	53
5.4 Resultados de la Constante de Tiempo	54
<b>6. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>55</b>
<b>Apéndices</b>	
A. Circuitos Impresos para el Control de Seguimiento del Sol	59
B. Sensores de Posición de Efecto Hall	64
C. Código de Programa de Seguimiento del sol	66
D. Datos técnicos del Sistema de suministro y almacenamiento de agua Caliente	71
E. Calibración de los Sensores de Temperatura y Presión	73
E.1 Calibración de termopares	73
E.2 Calibración de los Sensores de Presión	76
<b>Referencias</b>	<b>77</b>

## **Resumen**

En este trabajo se propuso la construcción de un sistema de generación y almacenamiento de calor de proceso basado en un concentrador de disco parabólico (COSPAA-90). Debido a algunos problemas técnicos que presentaba el COSPAA-90, se identificaron como necesidades fundamentales para la construcción del sistema de calor de proceso: la construcción de un circuito de control robusto para el seguimiento del Sol y la construcción de un sistema de suministro y almacenamiento de agua como fluido térmico de operación. Se busca que el sistema de agua precalentada permita caracterizar de manera adecuada el receptor o receptores que se construyan posteriormente, además de servir como sistema de almacenamiento del agua calentada a través del receptor del COSPAA-90. Se usó como referencia para los experimentos el estándar ANSI/ASHRAE 93-1986 (1997) para la evaluación de captadores solares. Los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta tesis fueron satisfactorios, ya que se lograron caracterizar el sistema de suministro de agua caliente y el receptor. Se encontró que el factor de remoción en el receptor fue bajo de 0.34 a 0.50 para los flujos que se experimentaron.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Calor de Proceso, Contaminación Ambiental y Energía Solar.

El ser humano necesita energía para llevar a cabo sus actividades productivas. Se sabe que el grado de desarrollo de un país está ligado con su consumo energético. En los países en vías de desarrollo como México es necesario satisfacer el incremento de los requerimientos energéticos que garanticen su desarrollo, sin embargo, se debe tener en cuenta que el tipo de fuente de energía también implica un impacto ambiental. Los procesos en los que se queman hidrocarburos tienen un gran impacto ambiental ya que la quema de estos tiene como consecuencia la emisión de gases de efecto de invernadero como CO<sub>2</sub> y gases que provocan lluvia ácida como SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. El impacto ambiental no sólo es local sino también global; varios estudios muestran que la acumulación de los gases de efecto invernadero es responsable del aumento en la temperatura global y del cambio climático. Se debe tener también en mente la lluvia ácida, que en muchos casos no cae en los lugares donde se generó la contaminación y que puede ser transportada cientos de kilómetros por las corrientes de aire.

Existen diferentes actividades principalmente industriales, que usan calor en sus procesos y para producirlo requieren quemar generalmente hidrocarburos. Algunos procesos industriales que usan calor a media temperatura en el rango entre 80 y 240°C son: esterilización, pasteurización, secado, hidrolizado, limpieza, polimerización, destilación y evaporación (Kalogirou, 2005).

Una de las vías para la obtención de la energía empleada en procesos industriales de mediana temperatura es la conversión de la energía solar ya que presenta un gran potencial de aplicación para la generación de calor de proceso en la industria. La radiación que recibe la tierra es de  $1.7 \times 10^{14}$  kW (Kreith, 1978), se estima que basta esta radiación durante 30 minutos para cubrir la demanda energética mundial. Por otra parte México es un país con

un recurso solar importante ya que en promedio se cuenta con 5 KWH/m<sup>2</sup>/día (www.conae.gob.mx), esto indica que las tecnologías solares tienen gran potencial de aplicación en nuestro país en comparación con otros países con menos insolación.

Sin embargo, existen implicaciones de carácter técnico y económico que no han permitido el desarrollo de tecnologías que utilizan fuentes renovables de energía, en particular la solar fototérmica. Las de carácter técnico tienen que ver con la intermitencia de la energía solar que no coincide con todos los horarios de consumo de energía y con la baja densidad por unidad de área de la energía solar. Las de carácter económico tienen que ver con los altos costos iniciales de inversión, con la dificultad de almacenamiento de la energía solar y con la falta de inversión en investigación y desarrollo tecnológico.

Una alternativa para la conversión de la energía solar en calor útil son los sistemas fototérmicos. Dichos sistemas transforman la energía radiativa del Sol en energía interna del medio o fluido de trabajo. La componente principal de los sistemas para la transformación de dicha energía es el colector o captador solar. Existen básicamente dos tipos de captadores: no concentradores y concentradores. Los captadores solares pueden ser estacionarios, con seguimiento del Sol en un eje o en dos ejes. También pueden ser clasificados por sus temperaturas de operación, en los de baja temperatura, que se encuentran en el rango de 30 a 80 °C, los de mediana temperatura entre 80 y 300 °C, y los de alta temperatura con rangos que van desde 150 a 2000 °C. Existen diversas tecnologías que están dentro de los rangos mencionados, por ejemplo: para bajas temperaturas se encuentran los captadores planos y concentradores parabólicos compuestos, para temperaturas medias están los captadores de tubos evacuados, los captadores de canal parabólico, los captadores parabólicos compuestos y los captadores tipo fresnel; para altas temperaturas se encuentran los de disco parabólico y los de torre central. Actualmente ya que los captadores de disco parabólico pueden alcanzar altas temperaturas 340-1200 °C (Gordon, 2001) han sido motivo de investigación y desarrollo en la producción de calor de proceso y potencia eléctrica. También se han realizado proyectos que buscan hacer más barata este tipo de tecnología (Kaushika, 2000).

## **1.2 Tecnología de Foco Puntual**

El uso principal de la tecnología de disco parabólico es la producción de potencia eléctrica debido a las altas temperaturas que se pueden lograr. El primer dispositivo de foco puntual fue diseñado por Augustine Mouchot y consistía en un reflector con forma de cono truncado lo que permitía iluminar el receptor en todas las direcciones. Este dispositivo funcionó de manera exitosa y fue capaz de mover un motor de medio caballo de fuerza a 80 rpm (Kalogirou, 2004). En 1878 Mouchot y su asistente Abel Pifre construyeron una unidad más grande para la Exposición Universal de París. Está fue capaz de bombear 500 galones por hora de agua y también demostró que se podía cocinar, destilar e incluso fue preparada para producir hielo. A pesar del éxito técnico de sus dispositivos, la principal

desventaja fue de carácter económico ya que usaban reflectores de plata y eran demasiado costosos comparados entonces con las nuevas tecnologías basadas en combustibles fósiles.

En 1899 Aubrey Eneas construyó un reflector cónico como el de Mouchot con la diferencia que en este el reflector el fondo fue removido para permitir más colección en el absorbedor. El primer prototipo se construyó en una granja en Ostrich California y funcionó como bomba para irrigar 300 acres de cítricos con una capacidad de 1,400 gpm. Eneas vendió dos de sus dispositivos pero fueron destruidos por tormentas. Estos problemas aunados a que el costo era de 2 a 5 veces mayor que el de las plantas de vapor convencionales provocaron que Eneas abandonara su proyecto (Kalogirou, 2004).

Como se ha mencionado, los discos parabólicos usan un reflector con una superficie de revolución con forma de parábola, formando así un disco que capta la energía solar y la redirige hacia el foco del aparato. Por tener una región focal muy pequeña pueden alcanzar grandes razones de concentración, es decir, que la densidad de radiación solar por unidad de área es muy grande. Sin embargo, estos tienen que apuntar directamente hacia el Sol en su movimiento aparente. El primer desarrollo de la era moderna se llevó a cabo en 1977 con el *Test Bed Concentrator* (TBC) en la base Edwards de la Fuerza Aérea de Estados Unidos. Después se construyó un sistema *dish-stirling* llamado Vanguard en 1983, instalado en el rancho Mirage en California. El disco de facetas individuales MDAC-25 en los Ángeles en 1984. La mayoría tuvieron un buen desempeño óptico, sin embargo operaron esporádicamente debido al mantenimiento y descomposturas de las máquinas térmicas (Gordon, 2001).

### 1.3 Trabajos Previos

En el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la UNAM se construyó un concentrador solar parabólico con ángulo de apertura de  $90^\circ$  denominado COSPAA-90 (*Concentrador Solar de Plato Parabólico con Ángulo de Abertura de  $90^\circ$* ). Este aparato se construyó a partir de una antena parabólica de telecomunicaciones como un esfuerzo de reconversión tecnológica (Jiménez, 1997), ya que fueron dadas de baja aproximadamente 200 antenas por la compañía TELECOM. Debido a las características geométricas y materiales utilizados en dichas antenas parabólicas de telecomunicaciones se sugirió la creación de COSPAA-90 ya que es un plato parabólico con 3.32 m de diámetro, con una área de captación de  $8.66 \text{ m}^2$  y el material de la antena es de aleación de aluminio (Duraluminio) que al pulirse ofrecía una reflectancia de 0.75 para la región visible (400-700 nm) y 0.92 para la región infrarroja de la radiación solar (hasta 3000 nm) como se reportó en Jiménez (1997). Sin embargo se apuntaban diversos problemas técnicos para su reconversión tecnológica como era su amplio ángulo de captación de  $90^\circ$  y su peso de 300 kg que debían ser considerados para su correcta operación como concentrador solar. Aunado a esto también estaba presente el problema de la degradación de la superficie reflectiva por condiciones de intemperie como se observó posteriormente en las pruebas realizadas donde se determinó una disminución en la reflectancia del 15% para el rango del visible y de 2% para el infrarrojo a seis meses del tratamiento superficial, debido al

incremento de la capa de oxido y a incrustaciones de polvo en la superficie reflectora (Jiménez, 1997).



Figura 1.1. Fotografía del COSPPA-90.

En el trabajo reportado por Estrada et al. (2000) se determinó de manera experimental la zona focal y la geometría óptima del receptor, que resultó ser una forma cónica para la correcta captación de la energía solar concentrada. Mediante la metodología de trazado de rayos se determinó una función de error del concentrador de  $\sigma = 7$  mrad y un pico máximo de concentración de 250 soles. Con base en los datos experimentales obtenidos y como trabajo previo al desarrollo de esta tesis, se construyó el receptor con las siguientes características: receptor cónico de acero inoxidable A-304 con calor específico de  $0.515 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ , diámetro de apertura de 21.7 cm, altura de 17 cm, superficie de calentamiento de  $1,959 \text{ cm}^2$  como se puede ver en la figura 1.2 (Estrada et al., 2000).

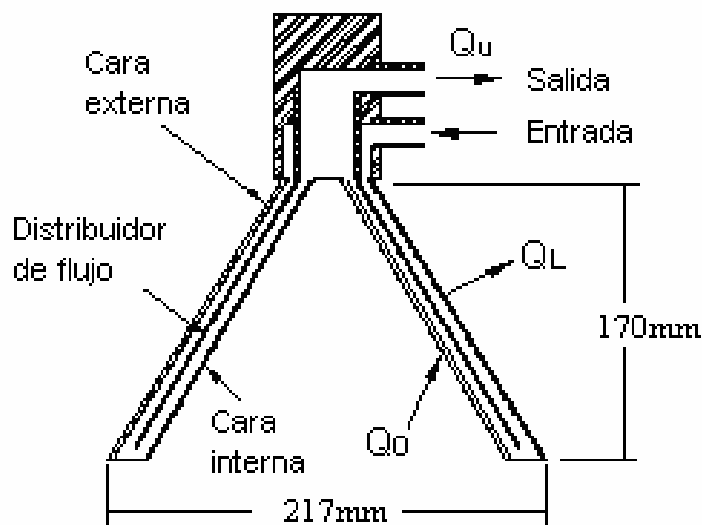


Figura 1.2. Corte Longitudinal del receptor.

El receptor del COSPAA-90 fue caracterizado térmicamente y reportado por Rojas (2006). Cabe mencionar que el sistema no contaba con un sistema automático de seguimiento del Sol, si no que se operaba de manera manual y que estaba basado en relevadores y que fue construido por Quiñones et al. (2005). En el mismo trabajo también se propuso el uso de un código de programa y un circuito basado en un puente "H" para control bidireccional de motores que permitiera el seguimiento del Sol en forma automática. En el trabajo reportado por Tecpoyotl et al. (2006) se presenta la construcción y prueba del circuito propuesto por Quiñones et al. (2005), sin embargo el circuito presentaba problemas de robustez debido a que los elementos se quemaban frecuentemente, principalmente los transistores de potencia.

En este trabajo se retoman los trabajos previos realizados en la UAM Azcapotzalco (donde se inició el proyecto de reconversión tecnológica dirigido por el Dr. Rubén Dorantes) y en la Coordinación de Concentración Solar del CIE: Jiménez M. R. y Hernández (1997), Estrada et al. (2000), Quiñones et al. (2005), Rojas A. (2006), Tecpoyotl et al. (2006) (algunos dirigidos por el Dr. Claudio A. Estrada Gasca) para la reconversión tecnológica y utilización del COSPAA-90. Se propone la construcción de un sistema de generación y almacenamiento de calor de proceso basado en dicho concentrador. Debido a algunos problemas técnicos en el COSPAA-90, se identificaron como necesidades fundamentales para la construcción del sistema de calor de proceso: la construcción de un circuito de control robusto para el seguimiento del Sol y la construcción de un sistema de suministro y almacenamiento de agua caliente. Se busca que el sistema de agua precalentada permita caracterizar de manera adecuada el receptor o receptores que se construyan posteriormente, además de servir como sistema de almacenamiento del agua recirculada a través del receptor del COSPAA-90.

Con base en lo antedicho se formulan los siguientes objetivos:

### **Objetivo General**

Construir y caracterizar un sistema de generación de calor de proceso usando como fuente de calor el concentrador solar de foco puntual COSPAA-90.

### **Objetivos Particulares**

1. Diseñar y construir las tarjetas electrónicas para asegurar la funcionalidad y robustez del sistema de control de seguimiento del Sol.
2. Calibrar y evaluar el sistema de seguimiento.
3. Construir el sistema de suministro de agua caliente basado en un termotanque, resistencias eléctricas y un sistema de control de temperatura.
4. Caracterizar el sistema de suministro y almacenamiento de agua caliente.
5. Caracterizar el receptor.
6. Implementar un modelo teórico para el receptor y validarlo con base en los resultados experimentales.
7. Analizar los resultados teóricos y experimentales.

La tesis está compuesta por cinco capítulos. En este primer capítulo se abordó la introducción a los concentradores solares de disco parabólico y los trabajos previos que anteceden a este trabajo en el esfuerzo de reconversión tecnológica que representa el COSPAA-90. En el segundo capítulo se presentan los trabajos referentes a la mejora del sistema de seguimiento la construcción del sistema de suministro y almacenamiento de agua caliente y las pruebas de funcionamiento. Estos trabajos fueron: el diseño y construcción de los circuitos impresos y la calibración del sistema de control de seguimiento del sol del COSPAA-90, la construcción y puesta a punto del sistema de almacenamiento de agua caliente (incluidos: el control de temperatura, el aislamiento térmico y los sistemas hidráulico y eléctrico). En el tercer capítulo se propone el modelo teórico para el receptor basado en un balance termodinámico con base en la Primera Ley que permita aproximar el comportamiento de variables del sistema como la temperatura a la salida del receptor. En el cuarto capítulo se propone la metodología experimental, la instrumentación del sistema y el diseño de los experimentos cuya finalidad fue evaluar el desempeño del receptor acoplado a un sistema de almacenamiento de calor. Los experimentos realizados estuvieron basados en el estándar ANSI/ASHRAE 93-1986 (1997)

para la evaluación del comportamiento térmico de captadores solares. En el quinto capítulo se hace el análisis de resultados usando métodos estadísticos. Finalmente en el sexto capítulo se exponen las conclusiones y recomendaciones que surgen a partir de los resultados experimentales.





## **CAPÍTULO 2**

### **PUESTA A PUNTO DEL COSPAA-90**

En este capítulo se describen las actividades realizadas en esta tesis para poner a punto el sistema de generación de calor de proceso. Si bien los trabajos previos que se realizaron con el COSPAA-90 tuvieron alcances importantes como proponer la reconversión tecnológica de las antenas de TELECOM (Jiménez et. al., 1997), determinar la geometría óptima del receptor (Estrada et. al., 2000), la implementación del sistema de control de seguimiento solar (Quiñones et al, 2005 y Tecpoyotl, 2006), no se contaba con un sistema adecuado para el suministro de agua caliente y el sistema de seguimiento no era suficientemente confiable. Como parte de esta tesis se propuso poner a punto el COSPAA-90 para poder realizar la caracterización del receptor y estimar su eficiencia.

En la primera parte se hace una descripción breve del sistema de concentración y el tipo de tracción que usa. Después se describe el sistema de seguimiento solar construido, así como su calibración y las pruebas de funcionamiento. Es importante resaltar que el uso de circuitos impresos dan mayor robustez al sistema ya que evita las fallas por falsas conexiones que pudiera tener una tarjeta de prueba, además, las fallas son más fáciles de identificar en un componente dañado. También se describe el sistema de suministro y almacenamiento de agua caliente y las pruebas de funcionamiento que se le aplicaron. Una aportación importante en este trabajo fue la configuración hidráulica del sistema ya que la interconexión y válvulas permiten el uso de diferentes estrategias para la puesta en operación del equipo y para los experimentos.

## 2.1 Descripción del Sistema de Concentración

Como se ha dicho anteriormente, el COSPAA-90 es un concentrador parabólico de tipo foco puntual que está conformado por una antena parabólica de telecomunicaciones de aluminio, la torreta de soporte y su transmisión, y el sistema de control de seguimiento del Sol. Donde es necesario el seguimiento de la trayectoria aparente del Sol con un movimiento en dos ejes (ver Figura 2.1). El sistema mecánico de la torreta permite mover la antena en altura y en azimut usando dos motores eléctricos de corriente continua.

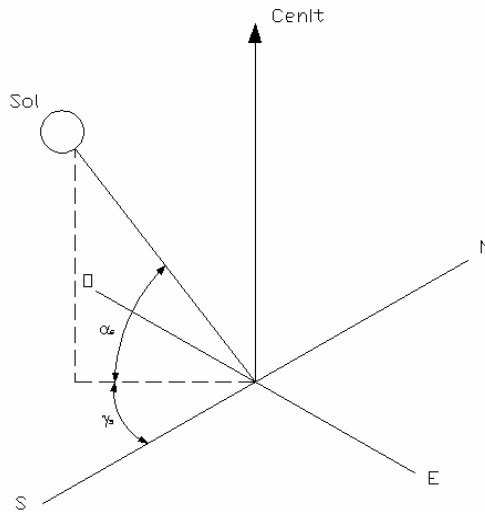


Figura 2.1. Sistema de referencia para la posición aparente del sol.

## 2.2 Descripción del Sistema de Seguimiento

En el trabajo reportado por Tecpoyotl (2006) se diseñó un sistema que permitía controlar los motores encargados de mover la torreta, donde el sistema de control de seguimiento se basa en un programa de computadora que usa las ecuaciones que describen el movimiento aparente del Sol y que se presentan en el libro de Duffie y Beckman (1991), un circuito de transmisión y otro de recepción de la señal de control y un circuito de potencia. El programa calcula la posición del Sol según la fecha y la hora del día que proporciona el reloj de la computadora donde se ejecuta el programa (ver apéndice C). Por medio del puerto paralelo la señal de control pasa al circuito de transmisión que transforma la señal digital de control en una señal de radiofrecuencia (R.F.) y la transmite hacia el circuito de recepción que transforma la señal de R.F. en una señal digital de control. Finalmente esta señal pasa a un circuito de potencia que controla a ambos motores de corriente continua de la torreta que soporta al COSPAA-90. El programa de seguimiento se retroalimenta con dos sensores de posición angular de efecto Hall, cada uno acoplado al eje del motor respectivo. La señal de retroalimentación se transmite por el circuito de R.F. del



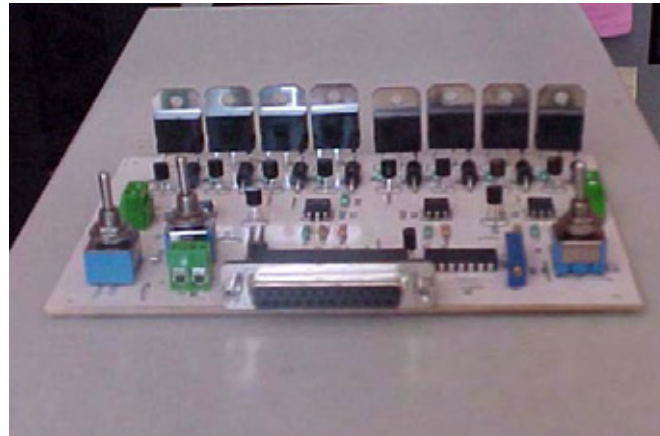


Figura 2.4. Tarjeta de control de seguimiento solar.

El costo aproximado de las tarjetas sin incluir el costo de fabricación fue de \$307.00 para la tarjeta de control y \$553.50 para la tarjeta de radiofrecuencia.

Una vez probada la funcionalidad de las tarjetas electrónicas se llevó a cabo la calibración del sistema de seguimiento. Cabe señalar que por facilidad de operación del sistema de control y adquisición de datos se optó por conectar el puerto paralelo de la computadora directamente a la tarjeta de control (ver Figura 2.5) evitando además que el sistema remoto presentara problemas en la captación de las señales de retroalimentación. En el apéndice A se describe el procedimiento de construcción y se presentan los diagramas de los circuitos impresos usados.

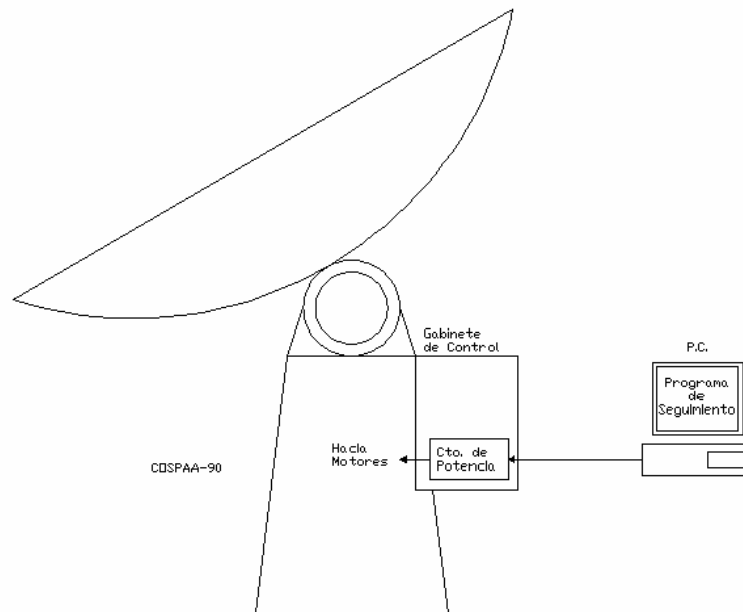


Figura 2.5. Configuración de conexión directa del sistema de seguimiento.

### 2.2.1 Calibración del Sistema de Seguimiento

Para calibrar el sistema de seguimiento se caracterizó el movimiento de los motores. Se hicieron 40 mediciones (para cada eje) de desplazamiento angular ( $s$ ) y tiempo ( $t$ ) usando un programa de calibración. Este programa permite que el motor avance hasta una cuenta de 3000 pulsos que provienen de los sensores de desplazamiento angular. Los pulsos a su vez corresponden a 300 revoluciones de cada motor, es decir por cada revolución se reciben diez pulsos del sensor de desplazamiento angular. Estas mediciones se hicieron con un voltaje de alimentación de 30V, para los ejes azimutal y cenital. La velocidad angular está descrita por:

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{s}{rt} \quad (2.1)$$

donde  $\theta$  es el desplazamiento angular,  $s$  es la longitud de arco y  $r$  es el radio de la circunferencia la cual fue de 154.5 cm para el movimiento azimutal y de 129 cm para el movimiento cenital. Sabiendo que a cada 3000 pulsos le corresponde un desplazamiento angular con la ecuación (2.1) se obtienen las constantes de calibración con dimensiones de desplazamiento angular por pulsos. Los valores obtenidos para las constantes de calibración son 0.00111 Grados/Pulso para el azimut y 0.00104 Grados/Pulso para el cenit. La velocidad angular fue de  $3.20 \pm 0.11$  grados/min para el azimut y  $2.79 \pm 0.10$  grados/min para el cenit (ver figuras 2.6 y 2.7).

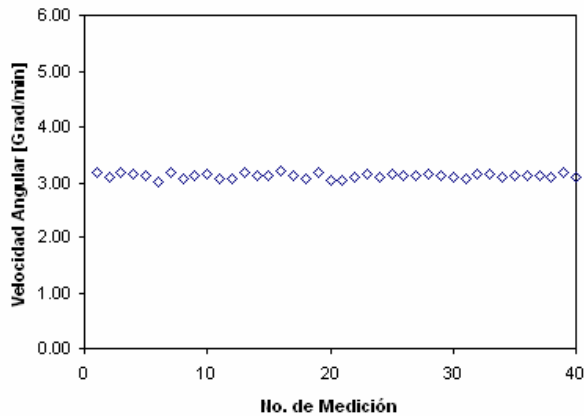


Figura 2.6. Velocidad angular para el azimut.

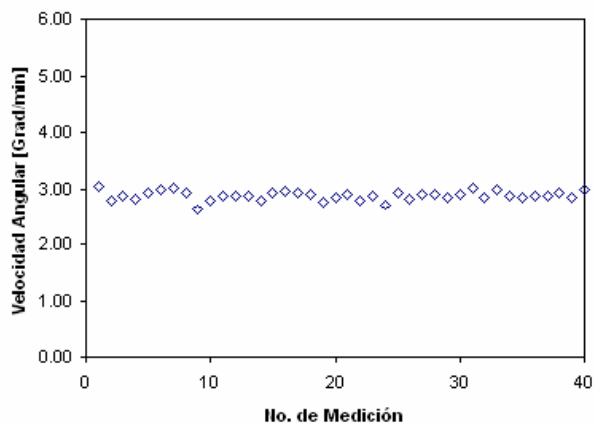


Figura 2.7. Velocidad angular para el cenit.

### 2.2.2 Prueba del Sistema de Seguimiento

Una vez obtenidas las constantes de calibración se incluyeron en el programa de seguimiento mostrado en el apéndice C y se probó el sistema. Las pruebas consistieron en los siguientes procedimientos:

1. Enfocar el equipo de modo manual.
2. Una vez enfocado poner a funcionar el sistema con el programa de seguimiento. El programa está preparado para almacenar las posiciones angulares en los ejes de cenit y azimut.
3. Recopilar los datos en los archivos asignados por el programa.

En el movimiento de cenit el seguimiento presentó valores muy cercanos a los valores calculados por las ecuaciones del programa como puede observarse en la Figura 2.8, con un error relativo promedio de  $1.1 \pm 0.9 \%$  y que ocurre sólo en los casos extremos con ángulos cenitales grandes.

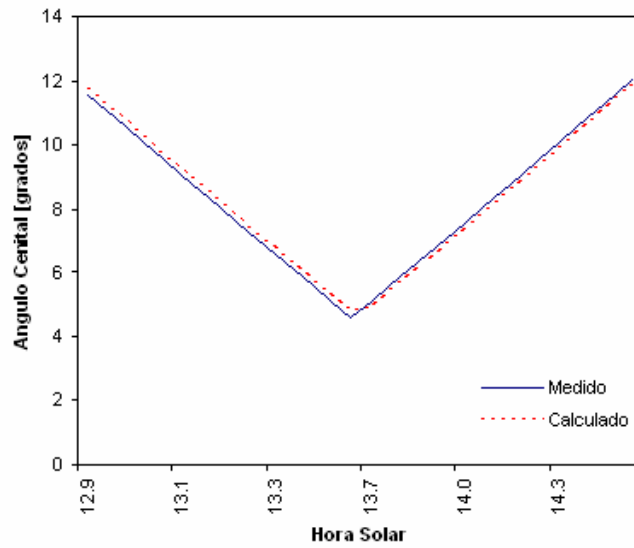


Figura 2.8. Seguimiento en el cenit.

En el movimiento de azimut el seguimiento también estuvo bastante cercano al valor calculado por las ecuaciones del programa como se observa en la Figura (2.9), con un error relativo promedio de  $0.76 \pm 0.06 \%$ . Sin embargo en algunos días del año (de Mayo y Julio) el seguimiento puede tener un desfase debido a que la velocidad del Sol en su componente azimutal es mayor que la velocidad del motor.

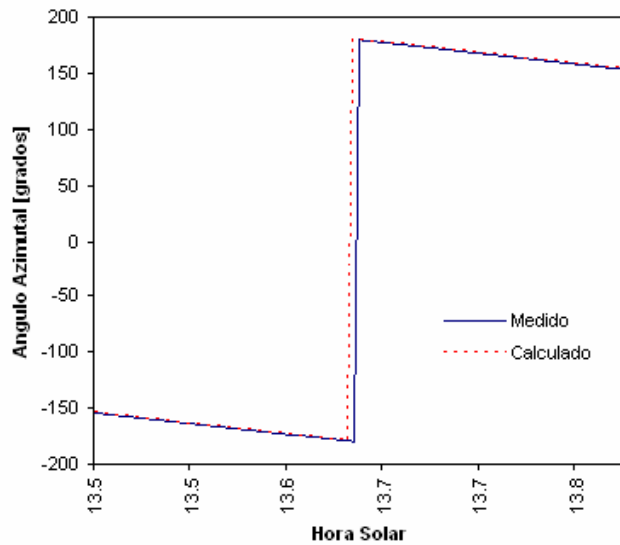


Figura 2.9. Seguimiento en el azimut.

Es importante indicar que este nuevo sistema logró una resolución de 0.181 mrad para la altitud y 0.194 mrad para el azimut. Después de muchas pruebas operativas la electrónica del sistema de seguimiento demostró ser suficientemente robusta para usarse en dicho sistema ya que no ha presentado fallos hasta el momento.

### 2.3 Descripción del Sistema de Suministro y Almacenamiento de Agua Caliente

El sistema se construyó con el fin de suministrar agua precalentada para la caracterización del colector y a la vez operar como sistema de almacenamiento. El sistema de suministro y almacenamiento de agua caliente está compuesto de: un termotanque, un sistema eléctrico-electrónico que incluye el control de temperatura para el calentamiento de agua, y un sistema hidráulico. Tal sistema proporciona agua caliente en un rango de temperaturas que va desde la temperatura de suministro de agua al tanque hasta una temperatura de 70°C. Gracias al sistema de control es posible tener una variación de temperatura en el suministro de agua no mayor que  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . En la figura 2.10 puede observarse el sistema de suministro y almacenamiento de agua caliente y el sistema de adquisición de datos que se usó para caracterizarlo.



Figura 2.10 Sistema de suministro de agua precalentada y sistema de adquisición de datos.



En seguida se describen los componentes que integran el sistema de suministro y almacenamiento de agua caliente:

### **2.3.1 Termotanque**

La función del termotanque es la de almacenar el agua que circula por el colector y mantenerla a una temperatura predeterminada durante el tiempo que dure la prueba del colector, y también funciona como sistema de almacenamiento de calor.

En el apéndice D se agregan los datos técnicos del termotanque, del sistema eléctrico, del control de temperatura y del sistema hidráulico.

### **2.3.2 Sistema eléctrico**

El sistema eléctrico tiene como función alimentar y controlar a las resistencias que calientan el agua dentro del termotanque (ver Figura 2.11), de tal forma que se pueda controlar la temperatura de suministro de agua caliente hacia el receptor.



Figura 2.11. Sistema eléctrico y de control.

### 2.3.3 Sistema hidráulico.

La función del sistema hidráulico es la de suministrar agua caliente al receptor y controlar el flujo hacia este, cuenta con válvulas que le permite optar por diferentes estrategias en el control del flujo.

En las siguientes secciones se hace una descripción detallada del funcionamiento del sistema y operación.

### 2.4 Funcionamiento del Sistema

El agua del tanque es calentada por las resistencias de 3 y 6 KW. Durante el desarrollo de las pruebas y experimentación sólo se conectó el banco de resistencias de 6 KW. La temperatura deseada en el tanque se ajusta con el dispositivo de control de temperatura y es retroalimentada a este último a través de un termopar ubicado dentro del termotanque (ver figura 2.12). Para suministrar el agua precalentada se cuenta con una bomba de 1/2 HP. La velocidad del flujo del agua suministrada se controla con una válvula de aguja y se monitorea con un flujómetro de la marca Headland serie HB2800. También pueden ser monitoreadas la presión y la temperatura de salida del termotanque. El sistema puede alcanzar más rápido la temperatura deseada mediante la recirculación del agua proveniente del colector (abriendo V7 y manteniendo cerrada V9), una vez que se alcanzó la temperatura deseada en el termotanque se abre V9, se cierra V7 y se abre V10 para que entre agua de repuesto.

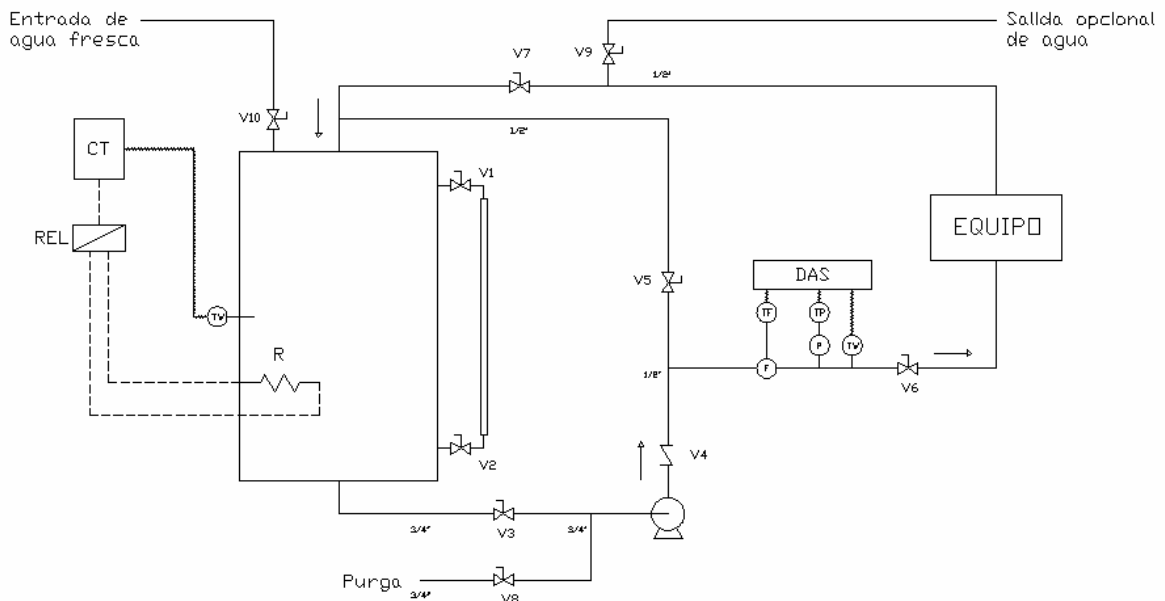


Figura 2.12. Diagrama del sistema de suministro de agua precalentada.

Para medir la temperatura dentro del termotanque se seleccionaron termopares tipo K con un error de  $\pm 2.2$  °C en un rango reportado por el fabricante de -110 a 285 °C. Para medir flujo volumétrico se seleccionó un flujometro de tipo turbina del que ya se disponía en laboratorio de calorimetría, este dispositivo tiene un error de  $\pm 1.0\%$  en un rango de 2.7 a 11 litros por minuto (lpm). Los sensores de presión son Cole Parmer, uno de 0 a 100 psi y otro de 0 a 500 psi con  $\pm 1$  % de error sobre la escala total. Las curvas de calibración de todos los sensores se incluyen en el apéndice E. Se usó un adquisidor de datos Agilent 34970 con una tarjeta multiplexora de 20 canales.

## 2.5 Caracterización del Termotanque

Las pruebas realizadas con este sistema tienen como objetivo caracterizar los tiempos de respuesta del sistema y la precisión con que se alcanza la temperatura de suministro deseada. Las pruebas se llevaron a cabo a las temperaturas de operación de 40, 50 y 60°C. Para la realización de estas pruebas al sistema se realizaron los siguientes procedimientos:

1. Se llena el tanque con agua hasta donde se puede observar el nivel en la mirilla de vidrio (aproximadamente 147 litros).
2. Se enciende el adquisidor de datos y se corre el programa de interface del adquisidor para medir las temperaturas dentro del termotanque.
3. Se enciende el control de temperatura y se selecciona en la carátula la temperatura deseada.
4. Hasta que se alcanza la temperatura deseada se abren parcialmente las válvulas V9 y V10 y se cierra completamente la válvula V7, de tal forma que se llegue un equilibrio entre el agua que entra y sale del equipo. Se sigue calentando el agua del termotanque y el agua caliente que sale del sistema se sustituye con agua fresca que se mezcla en el termotanque para mantener una temperatura estable en la salida (ver Figura 2.8).

Se colocaron tres termopares a diferentes profundidades a partir del nivel de agua para verificar que la estrategia de mezclar agua fría dentro del tanque es suficiente para obtener una temperatura homogénea en el tanque. Las profundidades son: 7.5cm para el termopar etiquetado con TW1, 31.5cm para el termopar TW2 y 54.5cm para el termopar TW3. Adicionalmente se colocó un termopar TW4 en la salida de agua caliente del tanque, como puede observarse en la figura 2.13. Los termopares se calibraron usando como referencia un termopozo Hart Scientific Mod. 9100S, en la tabla 2.1 se pueden ver las funciones de calibración de los termopares usados, en el apéndice E se presenta el procediendo de calibración de los termopares.

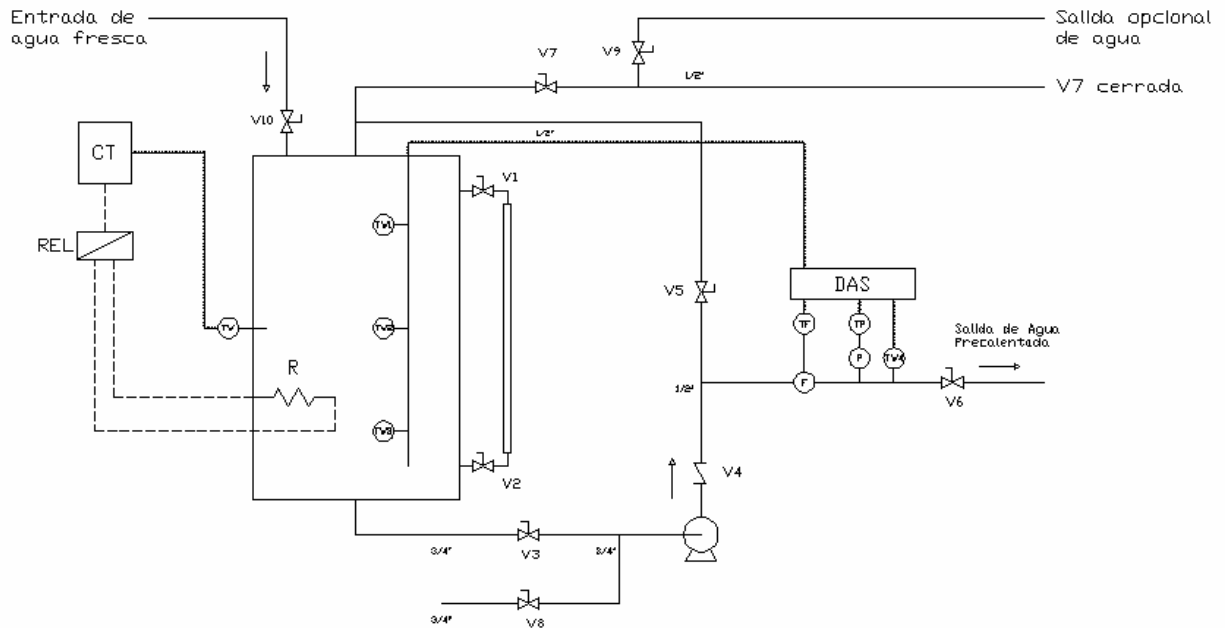


Figura 2.13. Diagrama del experimento de caracterización del termostanque.

Tabla 2.1. Funciones de calibración de termopares (°C).

TW1	$y = 1.0042x + 0.7095$
TW2	$y = 1.0011x + 0.8482$
TW3	$y = 1.0025x + 0.7894$
TW4	$y = 0.9968x + 1.0494$

Los siguientes puntos describen de manera secuencial el procedimiento realizado para llevar a cabo las pruebas a diferentes temperaturas:

- 1) Se llena el termostanque hasta la marca superior que se encuentra en el tubo de nivel, conectando la manguera de suministro del agua a la boquilla de 3/4 NPT y abriendo las válvulas V8 y V5.
- 2) Una vez alcanzado al nivel marcado se cierra la válvula V8 y se abren V3 y V7. Se abren ligeramente las válvulas de aguja V6 y V9. Se enciende la bomba y se ajusta la válvula V6 a 1 lt/min, se ajusta V9 para que entre el agua fría a la misma velocidad, esto se puede verificar con la marca del nivel.
- 3) Se ajusta el controlador de temperatura a la temperatura deseada y se deja funcionar el sistema hasta que haya llegado la temperatura a un valor estable.

### 2.5.1 Prueba para 40°C

Para esta prueba se obtuvieron los siguientes valores de operación:

Temperatura estable:  $38.8 \pm 0.1^\circ\text{C}$ .

Cte. de tiempo: 13.33min (cuando T alcanzó 63.2% de su valor estable)

Tasa de incremento de temperatura:  $0.63^\circ\text{C}$  por min

Tasa de decremento de temperatura:  $0.32^\circ\text{C}$  por hr

Tiempo de estabilización: 1hr 19min

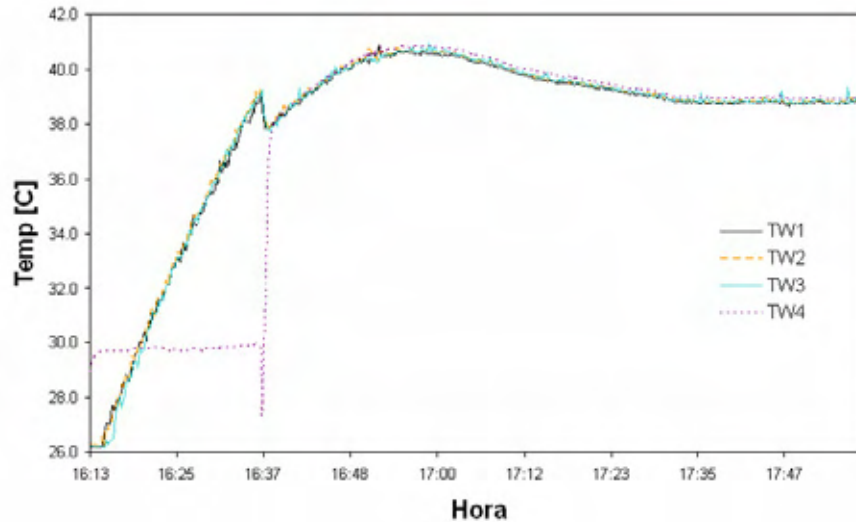


Figura 2.14. Transitorio del termotanque a 40°C.

En la Figura 2.14 se observa que cuando la temperatura del agua es cercana a los 40 °C se permite el flujo de agua fría dentro del termotanque y la vez fluye agua caliente fuera del tanque (cuando la temperatura de TW4 aumenta súbitamente). Además se observa como la temperatura del tanque se estabiliza en 1 hr 19 min.

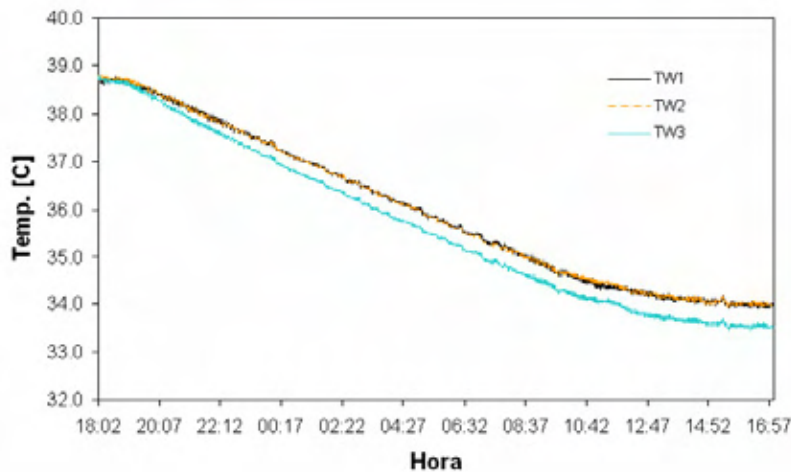


Figura 2.15. Decremento de temperatura en el termotanque a partir de 40°C.

En la Figura 2.15 se observa la estratificación con una diferencia de temperatura de  $0.4^{\circ}\text{C}$  entre TW3 y los otros puntos. Se observa también una estabilización en el decremento de temperatura que coincide con el aumento de la temperatura ambiente. La temperatura decae prácticamente de forma exponencial hasta que aumenta la temperatura ambiente.

### 2.5.2 Prueba para $50^{\circ}\text{C}$

Para esta prueba se obtuvieron los siguientes valores de operación:

Temperatura estable:  $49.52 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ .

Cte. de tiempo: 21.16min.

Tasa de incremento de temperatura:  $0.59^{\circ}\text{C}$  por min.

Tasa de decremento de temperatura:  $0.36^{\circ}\text{C}$  por hr

Tiempo de estabilización: 1hr 14min

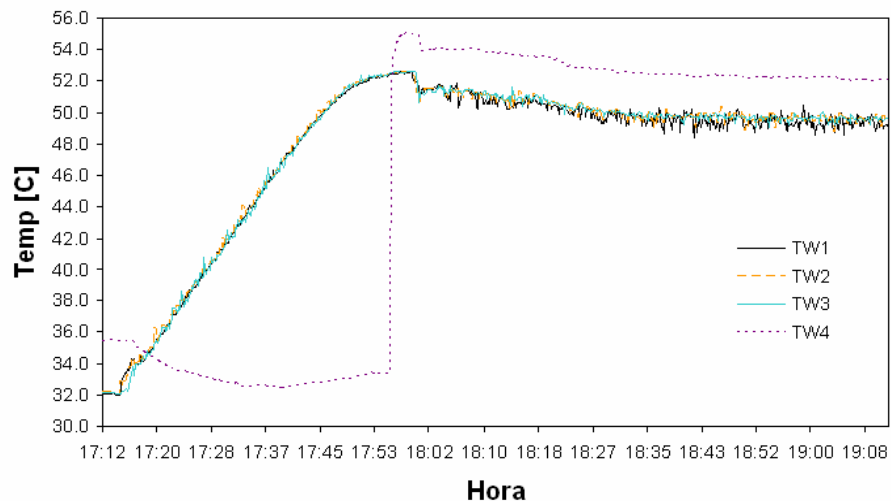


Figura 2.16. Transitorio del termostato a  $50^{\circ}\text{C}$ .

En la Figura 2.16 se observa que cuando la temperatura del agua es cercana a los  $50^{\circ}\text{C}$  se permite el flujo de agua fría dentro del termostato y a la vez fluye agua caliente fuera del tanque (cuando la temperatura de TW4 aumenta súbitamente). Se observa también que la temperatura de TW4 es  $2^{\circ}\text{C}$  mayor que la del tanque, esto puede deberse al calor añadido por la bomba. La temperatura del tanque se estabiliza después de 1hr 14min.

En la Figura 2.17 se observa la estratificación con una diferencia de temperatura de  $0.3^{\circ}\text{C}$  entre TW1 y TW2 y de  $0.4^{\circ}\text{C}$  entre TW2 y TW3. La temperatura decae prácticamente de forma exponencial hasta que aumenta la temperatura ambiente.

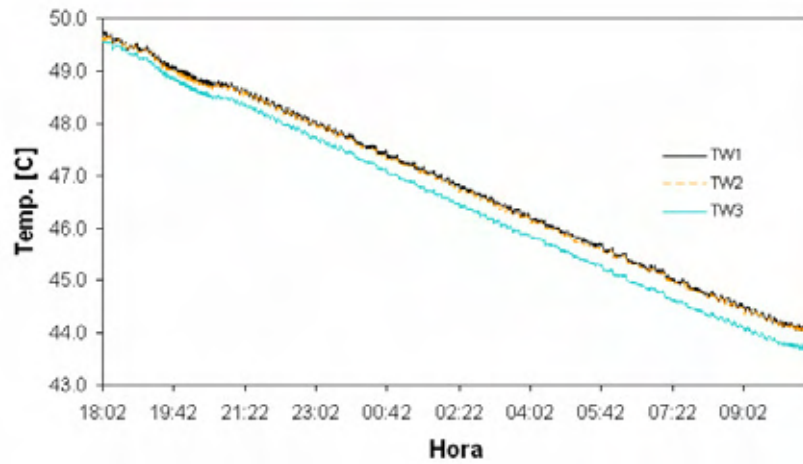


Figura 2.17. Decremento de temperatura en el termotanque a partir de 50°C.

### 2.5.3 Prueba para 60°C

Para esta prueba se obtuvieron los siguientes valores de operación:

Temperatura estable:  $59.8 \pm 0.1^\circ\text{C}$ .

Cte. de tiempo: 34.5min.

Tasa de incremento de temperatura:  $0.65^\circ\text{C}$  por min.

Tasa de decremento de temperatura:  $0.36^\circ\text{C}$  por hr.

Tiempo de estabilización: 1hr 58min.

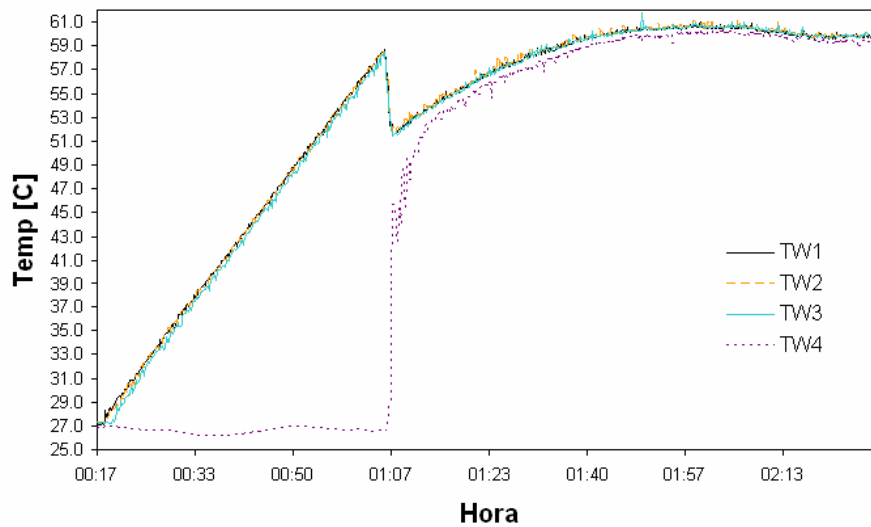


Figura 2.18. Transitorio del termotanque a 60°C.

En la Figura 2.18 se observa que cuando la temperatura del agua es cercana a los 60 °C se permite el flujo de agua fría dentro del termotanque y la vez fluye agua caliente fuera del tanque (cuando la temperatura de TW4 aumenta súbitamente). La temperatura del tanque se estabiliza después de 1 hr 58 min.

En la Figura 2.19 se observa la estratificación con una diferencia de temperatura de 0.1°C entre TW1 y TW2 y de 0.6°C entre TW2 y TW3.

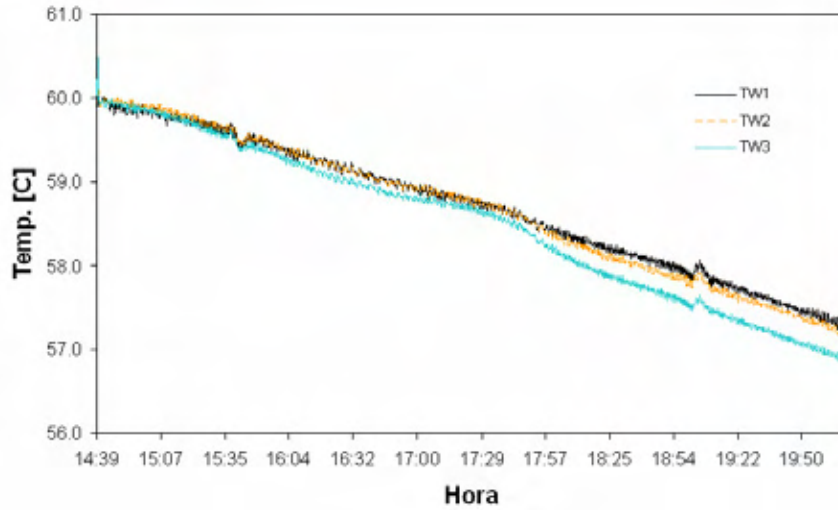


Figura 2.19. Decremento de temperatura en el termotanque a partir de 60°C.

#### 2.5.4 Coeficiente Global de Pérdidas

Para obtener el coeficiente global de pérdidas  $(UA)_s$  del termotanque se hizo una prueba donde se calentó el agua del tanque hasta 69°C y se dejó enfriar (ver figura 2.20), se monitoreó la temperatura del tanque durante 93 hrs para observar el decremento de temperatura y se usaron las ecuaciones propuestas en Duffie (1991) para obtener  $(UA)_s$ . El balance de energía dentro del tanque considerando que no se está agregando ni removiendo calor útil es:

$$Q_s = (UA)_s (T_s - T_a) \quad (2.2)$$

Donde  $Q_s$  es el calor almacenado en el tanque,  $T_s$  y  $T_a$  son las temperaturas del tanque y ambiente respectivamente. El calor almacenado en el intervalo de tiempo está dado por:

$$Q_s = (mC_p)_s \frac{dT_s}{dt} \quad (2.3)$$



Sabiendo que la masa de agua en el tanque es 120 kg con un  $C_p = 4,190 \text{ J/kgK}$ , usando las ecuaciones 2.2 y 2.3, integrando en el intervalo de tiempo y despejando  $(UA)_s$  se obtiene  $(UA)_s = 3.3 \text{ W/C}$ . En la gráfica de la Figura 2.15 se pueden ver los valores medidos (TW2 y TW3) y el valor calculado ( $T_{cal}$ ) para el decremento de temperatura en el tanque con un error de  $\pm 2 \%$ . También se observa un decaimiento exponencial de la temperatura perturbado por el aumento en la temperatura ambiente en cada día transcurrido.

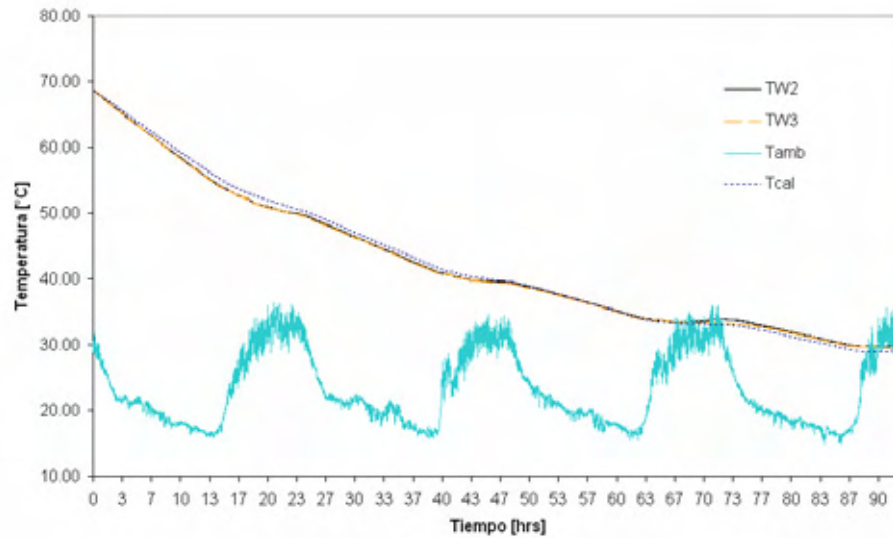


Figura 2.20. Decremento de temperatura en el termotanque.

Los resultados obtenidos en este capítulo son satisfactorios, ya que se logró la puesta a punto del COSPAA-90 con la construcción de las tarjetas electrónicas y la calibración del sistema de control de seguimiento del sol. Se obtuvo una resolución de 0.181 mrad para el cenit y 0.194 mrad para el azimut. Así también la construcción y caracterización del sistema de suministro de agua precalentada con un coeficiente global de pérdidas  $(UA)_s = 3.3 \text{ W/C}$ .

En el siguiente capítulo se lleva a cabo el desarrollo teórico para la evaluación térmica del sistema de concentración. Con base en un análisis por Primera Ley de la Termodinámica se establece el comportamiento térmico y eficiencia de conversión del sistema.



## CAPÍTULO 3

### MODELO TEÓRICO DEL RECEPTOR

#### 3.1 Modelo Teórico

Para entender los fenómenos de transferencia de energía del sistema concentrador-receptor hacia el fluido se establece un modelo termodinámico donde el sistema en estudio es el receptor del concentrador. Para el modelo que se ha desarrollado se usa la ecuación de Hotel-Whiller para colectores concentradores (Tiagy, 2006) que está basada en el balance de energía por la Primera Ley de la Termodinámica,

$$Q_u = F_R A_r [C(\rho\alpha)G_b - U_L(T - T_a) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_a^4)] \quad (3.1)$$

donde  $Q_u$  es el calor útil absorbido por el agua,  $A_r$  es el área del absorbedor,  $U_L$  es el coeficiente global de pérdidas en el receptor,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman,  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  y  $F_R$  son respectivamente la reflectividad, la absorptividad, la emisividad y el factor de remoción del colector,  $G_b$  es la radiación solar directa incidente,  $T$  es la temperatura media del colector y  $T_a$  es la temperatura ambiente. En la ecuación 3.1 la razón de concentración  $C$  está dada por

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (3.2)$$

donde  $A_r$  es el área del receptor y  $A_a$  es el área de apertura del concentrador.

Por otro lado el factor de remoción de calor del colector está dado por

$$F_R = \frac{mC_p}{A_r U_L} \left[ 1 - e^{-\left(\frac{A_r U_L F'}{mC_p}\right)} \right] \quad (3.3)$$

donde  $F'$  es el factor de eficiencia del receptor (Goswami, 2000).

Se debe tener en mente el trabajo reportado por Estrada et al. (2000) donde se determinó de manera experimental en la zona focal que la geometría óptima del receptor es una forma cónica para la correcta captación de la energía solar. De tal manera que para calcular el factor de eficiencia del colector  $F'$  se lleva a cabo un balance de energía que ocurre al considerar una geometría cónica.

Consideremos el área de un cono sólido de la forma

$$A_r = \pi r g_e + \pi r^2 \quad (3.4)$$

donde  $A_r$  es el área de recepción donde llega la energía radiativa compuesta por el área lateral descrita por el radio  $r$  del cono y su generatriz  $g_e$  más el área inferior que como aproximación se supone igual al área de un círculo como se puede ver en la Figura 3.1.

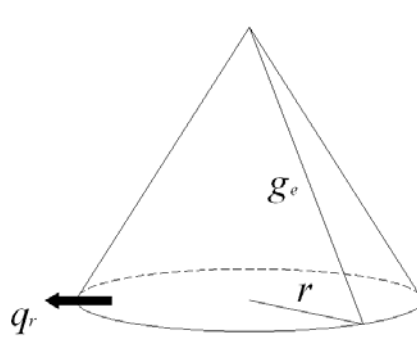


Figura 3.1. Consideraciones geométricas del receptor.

Suponiendo que la principal transferencia de calor ocurre en dirección de la coordenada radial hacia los alrededores se puede escribir

$$q_r = -kA_r \frac{dT}{dr} \quad (3.5)$$

de tal manera que al sustituir el área del receptor (3.4) en la ecuación (3.5) es entonces

$$q_r = -k(\pi r g_e + \pi r^2) \frac{dT}{dr} \quad (3.6)$$

y al separar variables para su integración podemos escribir

$$q_r \int_{R_i}^{R_e} \frac{dr}{(-ar - br^2)} = \int_{T_i}^{T_e} dT \quad (3.7)$$

donde consideramos la agrupación de variables de la siguiente manera  $a=k\pi g_e$  y  $b=k\pi$ . Por lo que la solución de la ecuación (3.7) es de la forma:

$$q_r = k\pi g_e \frac{(T_i - T_e)}{\ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right) + \ln\left(\frac{k\pi g_e + k\pi R_i}{k\pi g_e + k\pi R_e}\right)} \quad (3.8)$$

Con base en lo anterior se puede mostrar que la resistencia térmica que describe el comportamiento térmico en el receptor cónico se puede expresar mediante la siguiente relación:

$$R_{ter} = \frac{1}{k\pi g_e} \left( \ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right) + \ln\left(\frac{g_e + R_i}{g_e + R_e}\right) \right) \quad (3.9)$$

y por lo tanto se puede expresar el factor de eficiencia del colector  $F'$  mediante la siguiente relación

$$F' = \frac{1}{\frac{1}{U_L} + \frac{r_o(g_{e,o} + r_o)}{h_{fi}[r_i(g_{e,i} + r_i)]} + \frac{R_e}{kg_e} \left( \ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right) + \ln\left(\frac{g_e + R_i}{g_e + R_e}\right) \right)} \quad (3.10)$$

como se muestra posteriormente, esta aproximación es suficiente para reproducir los datos experimentales mediante el modelo teórico presentado.

Debido a las temperaturas y condiciones de operación, las pérdidas del sistema están dadas por las pérdidas convectivas que son predominantes y en menor grado las radiativas y

conductivas. Las pérdidas conductivas se pueden despreciar debido a que el área de contacto donde se sujeta el receptor es pequeña.

El coeficiente global de pérdidas queda definido por las pérdidas convectivas de la siguiente manera

$$U_L = \frac{h_w A_a}{A_r} \quad (3.11)$$

donde  $h_w$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección. Para calcular  $h_w$  se considera que interviene tanto la convección natural como la forzada. En la literatura se recomienda que se calculen ambos coeficientes y que se tome en cuenta el mayor. Como el receptor opera al medio ambiente se considera de mayor magnitud la convección forzada ya que se debe tomar en cuenta la velocidad del viento. Para condiciones de convección forzada sobre un cuerpo Mitchell propone la siguiente correlación y que es utilizada en Duffie (1991)

$$h_w = \frac{0.86V^{0.6}}{L^{0.4}} \quad (3.12)$$

donde  $V$  es la velocidad del viento en m/s y  $L$  es una longitud característica que es expresada como la raíz cúbica del volumen del cuerpo en metros.

El calor útil  $Q_u$  es igual que el calor removido por el fluido que pasa por el receptor y que debido a las condiciones de operación se puede relacionar como calor sensible, de tal manera que

$$Q_u = mc_p(T_s - T_e) \quad (3.13)$$

donde  $T_s$  y  $T_e$  son las temperaturas del agua a la salida y a la entrada del receptor respectivamente,  $m$  es el flujo másico y  $c_p$  es el calor específico del agua que se considera constante.

Los colectores concentradores tienen propiedades ópticas que varían de manera importante con la geometría del colector y los materiales empleados en su fabricación. La radiación absorbida por unidad de área iluminada  $S$  puede ser calculada por

$$S = G_b \rho (\gamma \tau \alpha)_n K_{\gamma \tau \alpha} \quad (3.14)$$

donde término  $G_b$  implica solo radiación directa para concentradores con razones de concentración mayores a 10, (Duffie, 1991). El término  $\rho$  es la reflectancia especular del

concentrador, los tres siguientes factores  $\gamma$ ,  $\tau$  y  $\alpha$  son respectivamente el factor de interceptación, la transmitancia y la absorptancia del receptor y son función del ángulo de incidencia de la radiación en la apertura,  $K_{\gamma\tau\alpha}$  es el modificador del ángulo de incidencia. En el caso del COSPAA-90 no se consideran la transmitancia y el modificador del ángulo de incidencia ya que no existe una cubierta transparente en el receptor y el seguimiento nos permite considerar que el modificador del ángulo de incidencia vale uno.

Por otro lado, se define la eficiencia instantánea del sistema mediante

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_a G_b} \quad (3.15)$$

donde  $Q_u$  es el calor útil absorbido por el agua,  $G_b$  es la radiación incidente y  $A_a$  es el área de apertura. Es decir, con base en la relación (3.9), se establece la razón que existe entre el calor útil obtenido del receptor y la energía recibida por el colector.

Las pérdidas radiativas en la ecuación 3.1 pueden ser despreciadas ya que la temperatura en la superficie del receptor (40-140 °C) no sobrepasa los 400°C Duffie (1991) y la ecuación se puede escribir de la siguiente forma.

$$Q_u = F_R A_a \left[ S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T - T_a) \right] \quad (3.16)$$

Sustituyendo la ecuación 3.16 en la ecuación 3.15 la eficiencia instantánea se escribe

$$\eta_i = \frac{F_R A_a \left[ G_b \rho(\gamma\tau\alpha) K_{\gamma\tau\alpha} - \frac{A_r}{A_a} U_L (T - T_a) \right]}{A_a G_b} \quad (3.17)$$

simplificando la ecuación 3.16 se escribe,

$$\eta_i = F_R \rho(\gamma\tau\alpha) K_{\gamma\tau\alpha} - \frac{F_R A_r U_L}{A_a} \left( \frac{T - T_a}{G_b} \right) \quad (3.18)$$

La ecuación 3.18 es de la forma  $y = ax + b$ , donde se puede identificar la pendiente como  $F_R A_r U_L / A_a$  y la ordenada al origen como  $F_R \rho(\gamma\tau\alpha) K_{\gamma\tau\alpha}$ , por lo que se puede obtener el factor de remoción  $F_R$  y el coeficiente global de pérdidas  $U_L$  a partir de una regresión lineal de los datos experimentales de la eficiencia, como se muestra en capítulos posteriores.

Los valores numéricos usados en la ecuación (3.8) son:  $\alpha = 0.95$ ,  $\rho = 0.64$  (Jiménez, 1997), y  $\gamma = 0.99$  (Estrada, 2000). Con  $G_b$  y los parámetros anteriores se espera obtener la

radiación absorbida por el receptor. En los experimentos se esperan obtener las temperaturas del agua a la entrada y salida del receptor, las temperaturas en la superficie del receptor, la radiación directa incidente por unidad de área, la temperatura y el flujo másico del agua suministrada por el termotanque.

El modelo del receptor está basado en un balance de energía por Primera Ley de la Termodinámica, con el cual se espera aproximar datos experimentales como la temperatura del agua en la salida del receptor. También se calculan las eficiencias del receptor con los datos experimentales y el modelo a diferentes temperaturas (30, 40, 50, 60 y 70 °C) con un flujo constante. Los flujos propuestos para los experimentos son 1, 2 y 3 lpm.

El modelo teórico desarrollado en este capítulo es muy sencillo y se implementa fácilmente. Como se muestra en capítulos posteriores reproduce con alta certidumbre los resultados experimentales.

A continuación en el capítulo 4 se describen los experimentos propuestos para obtener la caracterización del receptor y el comportamiento del sistema en flujo cerrado.



## **CAPÍTULO 4**

# **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **4.1 Requerimientos del Sistema**

La evaluación del sistema de generación de calor de proceso implica determinar el comportamiento térmico del sistema y la eficiencia de conversión de energía radiativa en calor útil. La Norma ANSI/ASHRAE 93-1986 proporciona lineamientos específicos para la caracterización de colectores solares planos e incluye un apartado para colectores concentradores. Como se ha mencionado, el colector tiene las siguientes características: es concentrador de disco parabólico, tiene una montura de tipo azimutal (con movimiento en dos ejes), el receptor cuenta con una configuración cónica por donde circula agua como fluido térmico para transportar de un punto a otro el calor ganado.

La metodología estándar de la norma antedicha establece requerimientos para la caracterización de colectores solares, en el caso específico del COSPAA-90 se enfatizaron los siguientes requerimientos:

- El módulo debe ser montado y aislado de tal forma que se encuentre en condiciones normales de operación para poder determinar las pérdidas bajo tales condiciones.
- Para pruebas realizadas en la intemperie y determinar la eficiencia térmica, el colector debe ser montado en un lugar donde no haya energía reflejada o re-irradiada en el colector desde edificios o en la vecindad del colector. Como este colector tiene una montura azimutal y sistema de seguimiento no se considera determinante esta condición.

- El flujo másico del fluido de trabajo debe ser el mismo durante la prueba usada para determinar la curva de eficiencia, la constante de tiempo y el modificador del ángulo de incidencia para un colector determinado. Debe quedar claro que en el caso del concentrador el modificador del ángulo de incidencia es igual con uno por que se tiene un sistema de seguimiento que apunta constantemente en dirección de del Sol.
- Para la evaluación específicamente de este sistema de generación de calor de proceso, fue necesario instrumentar con medidores de temperatura, de presión, de radiación directa y de flujo.
- El fluido de trabajo suministrado debe mantener una temperatura constante.

## 4.2 Instrumentación del Receptor

En la evaluación del receptor se necesitan medir las temperaturas en diferentes puntos estratégicos de la superficie del receptor, las temperaturas y presiones del agua a la entrada y a la salida del receptor, así como el flujo de agua. Para medir temperatura se usaron termopares tipo K con un límite de error de  $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ . Los medidores de presión tienen una exactitud de  $\pm 0.1\%$  sobre la escala total. Se calibraron los transductores de presión y los termopares, las funciones de calibración para cada sensor aparecen en la tabla 4.1. Es importante indicar que para medir el flujo de agua hacia el receptor por medio del flujometro se conectó la salida de dicho flujometro un filtro activo para acondicionar la señal que llega al adquirente de datos con el propósito de reducir el ruido eléctrico en la medición.

Tabla 4.1. Funciones de calibración de los medidores de temperatura y presión.

T1 [°C]	$y = 1.0036x + 0.6390$
T2 [°C]	$y = 1.0030x + 0.7947$
T3 [°C]	$y = 1.0015x + 0.8469$
T4 [°C]	$y = 1.0006x + 0.9032$
T5 [°C]	$y = 1.0005x + 0.9800$
T6 [°C]	$y = 0.9989x + 1.0663$
Te [°C]	$y = 0.9994x + 1.1427$
Ts [°C]	$y = 0.9974x + 1.1613$
Pe [bar]	$y = 6.6246x + 1.8053$
Ps [bar]	$y = 1.3407x + 1.8053$

Se colocaron tres termopares en la pared interna y otros tres en la pared externa del receptor, los termopares están separados 5cm entre sí. Los termopares se envolvieron con una capa de venda de yeso y otra de aluminio para poder guiarlos y fijarlos los termopares. También se colocaron transductores de presión y termopares en la entrada y en la salida del receptor como se indica en la figura 4.1.

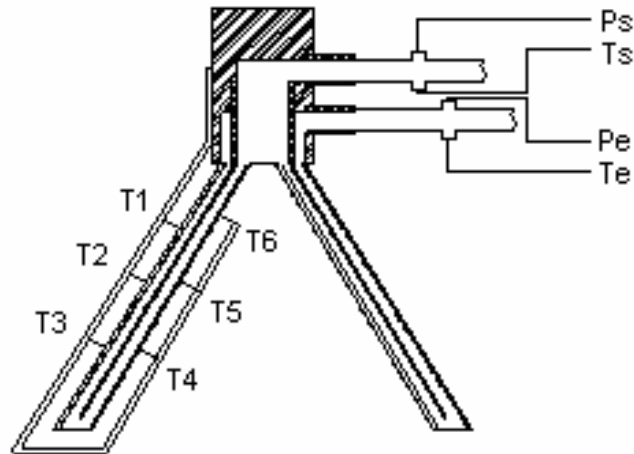


Figura 4.1. Instrumentación del receptor.

### 4.3 Instrumentación para Medición de Flujo

Para determinar el flujo volumétrico de agua se usó el flujómetro de la marca Headland modelo HB1100. El principio de funcionamiento de este medidor está basado en una pequeña turbina que gira cuando hay un flujo, junto a la turbina hay una pequeña bobina que genera un voltaje de AC proporcional al flujo. Para poder medir directamente el flujo desde el adquisidor de datos fue necesario implementar un circuito de acondicionamiento de la señal de AC proveniente del medidor. Un dispositivo útil para acondicionar la señal es un filtro activo pasa-bajas, ya que no solamente permite filtrar el ruido sino también amplificar la señal lo que permite tener un umbral de detección mayor que con el simple flujómetro.

Los parámetros usados para el cálculo de los componentes del filtro son la ganancia  $A_v$  y la frecuencia de corte  $f_{OH}$  dados por las siguientes ecuaciones:

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_G} \quad (4.1)$$

y

$$f_{OH} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (4.2)$$

donde  $R_I$ ,  $R_G$  y  $R_f$  son resistencias y  $C_I$  es un capacitor. En el diagrama de la figura 4.2 se puede observar el circuito correspondiente al filtro pasa-bajas y los componentes que aparecen en las ecuaciones (4.1) y (4.2).

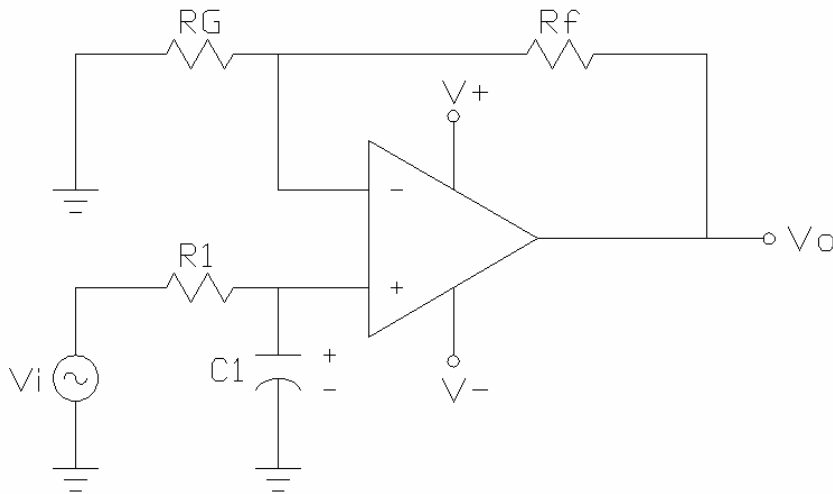


Figura 4.2. Filtro paso-bajas para la medición del flujo.

Usando las ecuaciones (4.1) y (4.2) se determinaron los siguientes valores para los componentes del filtro:  $R_I = 1.5 \Omega$ ,  $R_G = 1.2 \text{ K}$ ,  $R_f = 3.3 \text{ K}$  y  $C_I = 10 \mu\text{F}$  que aseguran una adecuada operación del flujometro.

#### 4.4 Acoplamiento de los Subsistemas

Una vez hecha la calibración de los medidores de presión, temperatura y flujo se acoplaron al sistema de adquisición de datos y se programaron las curvas de calibración en el programa de adquisición. Posteriormente se colocó el receptor en la región focal del concentrador de disco parabólico COSPAA-90. Después se acoplaron el receptor y el termotanque por medio de mangueras de alta temperatura disponibles para conformar el sistema de generación de calor de proceso.

Cabe mencionar que la operación del sistema consiste en orientar el plano frontal del COSPAA-90 en dirección normal al Sol, de manera que la luz concentrada del Sol incida

en el receptor. Una vez que la energía es concentrada en el receptor el flujo de agua recoge el calor del receptor y permite su transporte.

En la Figura 4.3 se puede observar el circuito del sistema de generación de calor de proceso donde el agua es alimentada hacia el receptor por la bomba abriendo la válvula V6 y retorna al termostanque manteniendo abierta la válvula V7 o en caso contrario para mantener un circuito abierto abriendo la válvula V9 y cerrando V6. Este arreglo de válvulas permite llegar más rápido a la temperatura de suministro deseada ya que se retroalimenta el agua del receptor para contribuir junto con las resistencias al incremento de temperatura dentro del termostanque. En la fotografía de la Figura 4.4 puede observarse el sistema completo junto con el sistema de adquisición de datos.

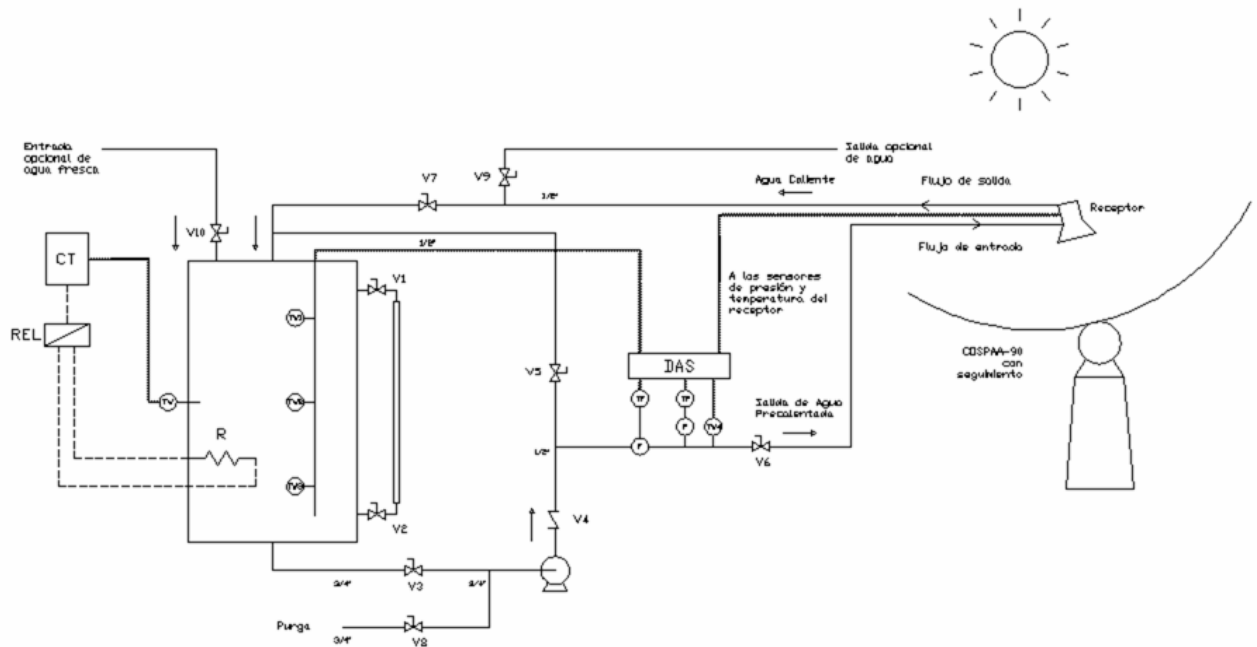


Figura 4.3. Diagrama esquemático del sistema de generación y almacenamiento de calor de proceso.



Figura 4.4 Sistema acoplado y en funcionamiento.

### 4.3 Diseño de los Experimentos

Es práctica común que el desempeño térmico de los colectores sea determinado al obtener los valores instantáneos de eficiencia a partir de valores de radiación incidente sobre el colector, temperatura ambiente y temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo bajo condiciones muy próximas al estado estable. La prueba también sirve para determinar la constante de tiempo del colector. Retomando dicha metodología se llevó a cabo lo propio para la caracterización del COSPAA 90

#### 4.3.1 Eficiencia térmica

La eficiencia térmica para un colector concentrador está dada por

$$\eta_g = \dot{m}c_p(T_{f,e} - T_{f,i}) / A_d G_b \quad (4.3)$$

donde  $T_{f,e}$  y  $T_{f,i}$  son las temperatura de entrada y de salida del agua en el receptor respectivamente,  $A_a$  es el área de apertura del colector,  $G_{bp}$  es la radiación directa incidente,  $G$  es el flujo másico y  $c_p$  es el calor específico del agua.

### 4.3.2 Constante de Tiempo del Colector

Es necesario determinar la respuesta temporal del colector solar para evaluar su comportamiento transitorio y para seleccionar los intervalos de tiempo apropiados para las pruebas de estado estable. La prueba para determinar la constante de tiempo del colector puede ser realizada con el siguiente método.

La temperatura de entrada del fluido de trabajo  $T_{f,i}$ , es ajustada tan cercana como sea posible a la temperatura ambiente (de preferencia  $\pm 1^\circ\text{C}$ ) y es controlada dentro de un rango de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , mientras circula un flujo por unidad de área de apertura del colector de  $0.01\text{m}^3/\text{sm}^2$  en condiciones estacionarias o cuasi-estacionarias con una radiación solar incidente mayor que  $790\text{W}/\text{m}^2$ . La energía solar incidente es abruptamente reducida a cero orientando el colector hacia el Norte. El aire del ambiente debe tener libertad de circular por el colector antes de iniciar la prueba del transitorio. Las temperaturas del fluido de transferencia a la entrada  $T_{f,i}$  y a la salida  $T_{f,e}$  son continuamente monitoreadas hasta que

$$\frac{T_{f,e,t} - T_{f,i}}{T_{f,e,\text{inicial}} - T_{f,i}} < 0.30 \quad (4.4)$$

donde  $T_{f,e,t}$  es en el tiempo  $t$ .

Para la caracterización del sistema se proponen tres tipos de experimentos: en circuito cerrado, en circuito abierto y para obtener la constante de tiempo. En el primer tipo se circula agua a través del receptor, la temperatura del agua tiene que ser cercana a la temperatura ambiente, posteriormente se enfoca el concentrador hasta que alcanza condiciones estables y se desenfoca. En el segundo tipo se recircula hacia el termotanque el agua que pasa a través del receptor con el fin de que vaya aumentando la temperatura dentro del termotanque (en este caso funciona como sistema de almacenamiento).

Cuando el sistema funciona en circuito abierto primero se recircula el agua y se pone a funcionar el sistema eléctrico y de control para calentar el agua en un tiempo menor que si solo se usa el sistema eléctrico. Una vez que se alcanzó la temperatura deseada se abre V9 y se cierra V7 con el fin de detener la recirculación y mandar el agua que pasa por el receptor a un circuito externo. Inmediatamente después se abre V10 regulando el flujo de entrada de tal forma que se mantenga constante el nivel de agua dentro del termotanque. Este procedimiento permite sustituir el flujo de agua que se esta mandando al circuito exterior y estabiliza la temperatura del agua que suministra el termotanque al receptor.

### 4.3.3 Experimento en Circuito Cerrado

Este experimento se propone para medir la energía que es almacenada en el termotanque así como el comportamiento térmico del sistema en su conjunto. Para llevar a cabo el experimento se siguen los pasos del diagrama de flujo de la figura 4.5.

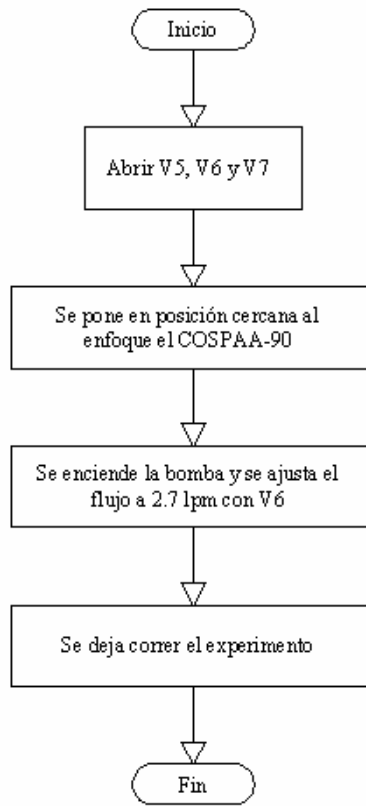


Figura 4.5. Procedimiento para el experimento en circuito cerrado.

### 4.3.4 Experimento con Diferentes Temperaturas y Flujo Constante (Circuito Abierto)

El objetivo de este experimento es obtener las eficiencias con diferentes flujos y temperaturas para determinar los valores más adecuados a la entrada del receptor, así como el coeficiente global de pérdidas del receptor para cada flujo. Se propone realizar el experimento con flujo constante con cinco temperaturas diferentes: 30, 40, 50, 60 y 70°C en el modo de sistema abierto para flujos de 1, 2, 3 y 4 lpm. En el diagrama de flujo de la Figura 4.6 se muestra la metodología.



Se repite este experimento para cada flujo establecido. En todos los experimentos debe estar funcionando el sistema de seguimiento y de adquisición de datos.

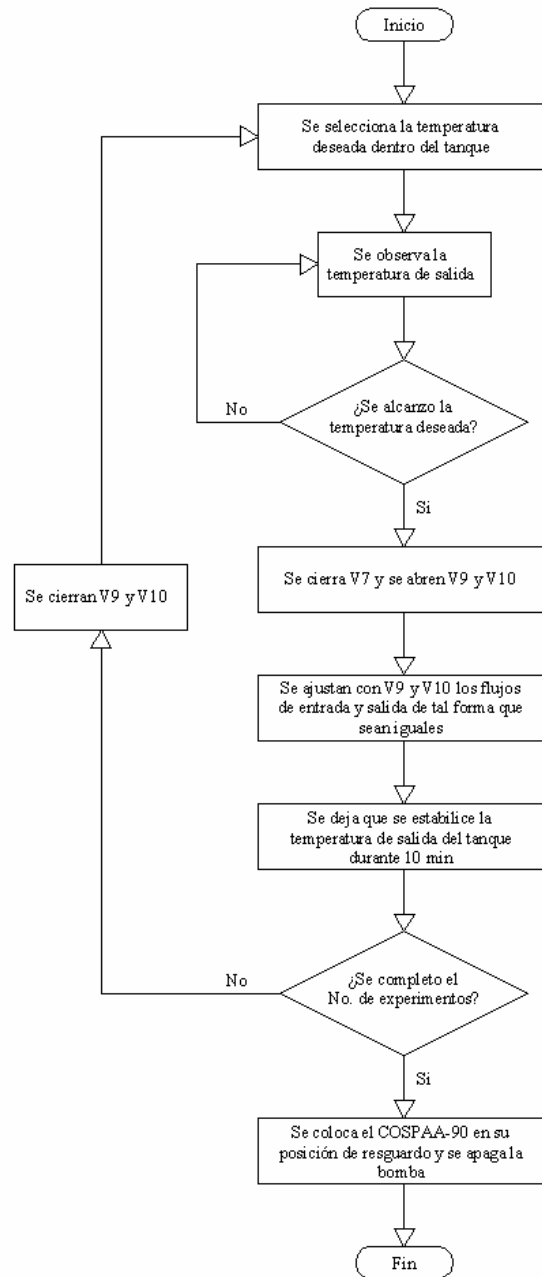


Figura 4.6. Procedimiento para el experimento a diferentes temperaturas y flujos.

### 4.3.5 Experimento para Obtener la Constante de Tiempo

Este experimento se propone con el fin de obtener la constante de tiempo para conocer el comportamiento transitorio del colector. La metodología propuesta para llevar a cabo el experimento se puede ver en el diagrama de flujo de la figura.

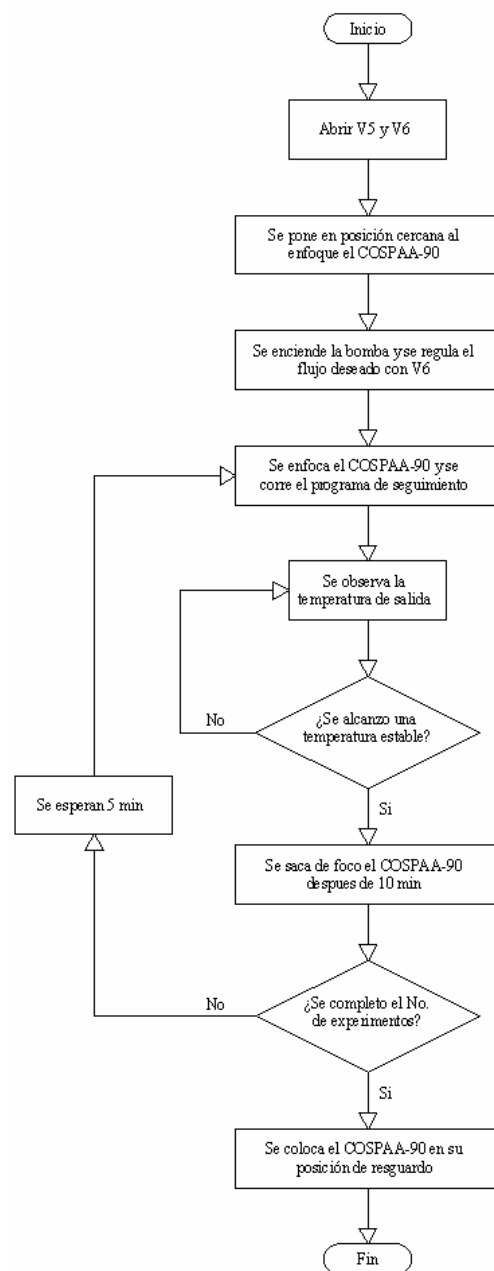


Figura 4.7. Diagrama de flujo del experimento a circuito abierto.

Con los experimentos se espera obtener la caracterización del receptor. En el experimento en circuito cerrado se espera conocer la tasa de incremento de temperatura, la variación en la eficiencia del receptor conforme se incrementa la temperatura y el coeficiente global de pérdidas (promedio). Con los experimentos en circuito abierto se espera obtener las eficiencias para diversos flujos y temperaturas, y de esta forma determinar el flujo y temperatura a los cuales se obtiene la mayor eficiencia térmica. También se espera encontrar la constante de tiempo del receptor para conocer su comportamiento transitorio.

Se implementaron de manera exitosa metodologías y estrategias para llevar a cabo los experimentos de caracterización del receptor. Se encontró por ejemplo que para obtener una tasa de incremento de temperatura mayor se podía recircular el agua a la vez que se usan las resistencias eléctricas. En un principio se usaba la boquilla de V8 para llenar el tanque y posteriormente se implementó V10 para realizar esta tarea y se implementaron las válvulas V7 y V9, que permiten cambiar del modo de operación en circuito cerrado al de circuito abierto y viceversa sin necesidad de desconectar la manguera de alimentación de agua.

En la parte de adquisición de datos se implementó de manera exitosa un filtro activo pasa bajas para poder conectar de manera directa el sensor de flujo al adquisidor de datos y poder así almacenar los valores de flujo másico.

Un punto muy importante en la caracterización de colectores solares es mantener la temperatura y el flujo de suministro estable para que se pueda evaluar la eficiencia de colector adecuadamente. La radiación también debe ser lo más estable posible por lo que la experimentación se debe llevar a cabo en días claros y en horas cercanas al medio día solar. Con las metodologías propuestas se logró asegurar un suministro de agua con temperaturas y flujos constantes.

El siguiente capítulo es consecuencia directa de este capítulo, donde usando las metodologías propuestas se lograron obtener los parámetros de operación del sistema para su caracterización.



## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS DE RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan y analizan los resultados teóricos y experimentales obtenidos en este trabajo, como resultado de las metodologías propuestas en los capítulos 3 y 4. Con los valores medidos se pudo obtener la constante de tiempo y la eficiencia térmica del receptor para diferentes flujos y temperaturas. También se pudieron calcular las eficiencias instantáneas y por consiguiente  $F_R$  y  $U_L$  para cada flujo usando la ecuación 3.18.

#### 5.1 Resultados en Circuito Cerrado

En este experimento el sistema se operó en el modo de recirculación con un flujo constante de 2.7 lpm. La tasa de incremento de temperatura fue de  $0.96^\circ\text{C}$  por min como se muestra en la figura 5.2.

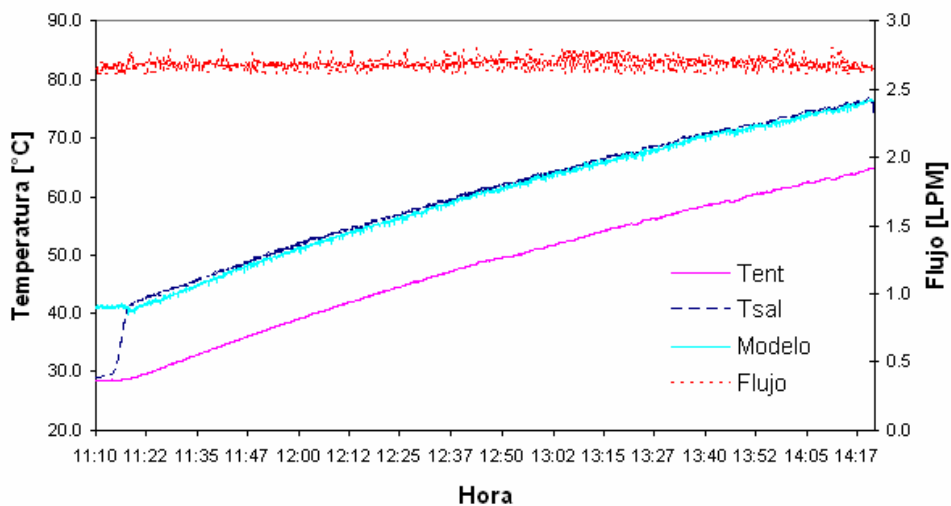


Figura 5.2. Flujo en el receptor y sus temperaturas de entrada y salida.

En el extremo izquierdo de la Figura 5.2 se puede observar que la temperatura del agua es prácticamente igual en la entrada y en la salida del receptor hasta que este es enfocado y se observa el incremento de temperatura por la energía solar concentrada que llega al receptor.

Igualando las ecuaciones (3.1) y (3.13) y despejando la temperatura de salida del agua se obtiene la siguiente ecuación,

$$T_s = T_e + \frac{F_R A_r [C(\rho\alpha)I_s - U_L(T - T_a)]}{\dot{m}c_p} \quad (5.1)$$

la ecuación (5.1) se implemento en una hoja de Excel para la simulación .

La clara discontinua es la correspondiente al modelo, se observa que empata muy bien con el valor medido con un error relativo promedio de  $2.0 \pm 1.2 \%$ . El factor de remoción es  $F_R = 0.5$  y el coeficiente global de pérdidas en el receptor es  $U_L = 25.0 \text{ W/m}^2\text{°C}$  para el flujo de 2.7 lpm.

En la Figura 5.3 se pueden ver las temperaturas en los diferentes puntos de la superficie del receptor y la radiación directa. El aumento en la temperatura en la superficie del receptor se debe al aumento en la temperatura de suministro causado por la capacitancia térmica del tanque. También se observa la disminución abrupta de las temperaturas en el receptor cuando se desenfoca el COSPAA-90. La temperatura promedio en la superficie del receptor para este experimento fue de  $64.4 \pm 5.3 \text{ °C}$ .

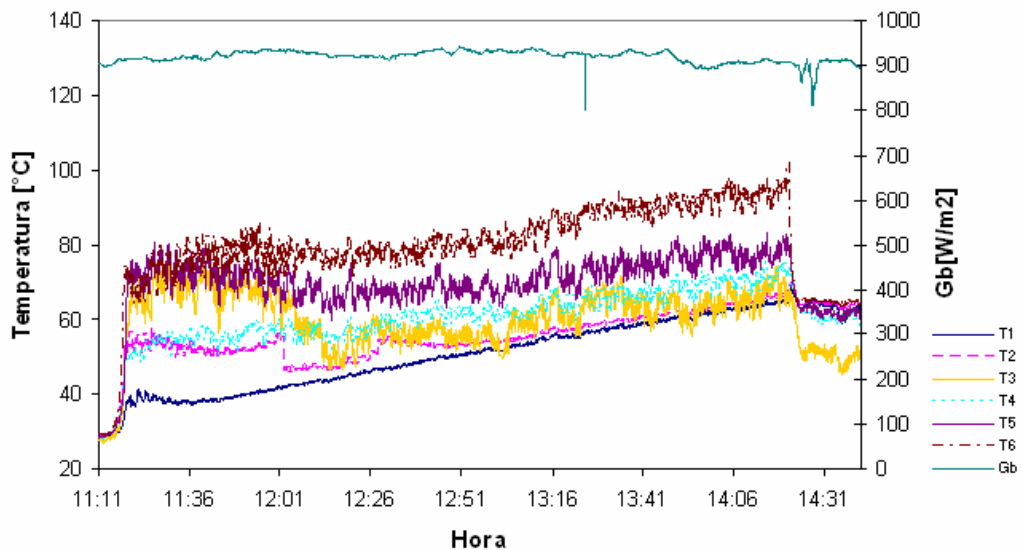


Figura 5.3. Temperaturas en la superficie del receptor y radiación solar directa.

En la Figura 5.4 se observa el incremento de temperatura durante el tiempo que duró la prueba, el cual fue de 36 °C . Se observa que la temperatura dentro del tanque fue homogénea. Cuando se desenfoca el receptor se observa como decrece rápidamente de manera exponencial la temperatura en la salida del termotanque a diferencia de las temperaturas dentro del tanque, esto es debido a la baja inercia térmica de la tubería en comparación con la masa de agua dentro del tanque.

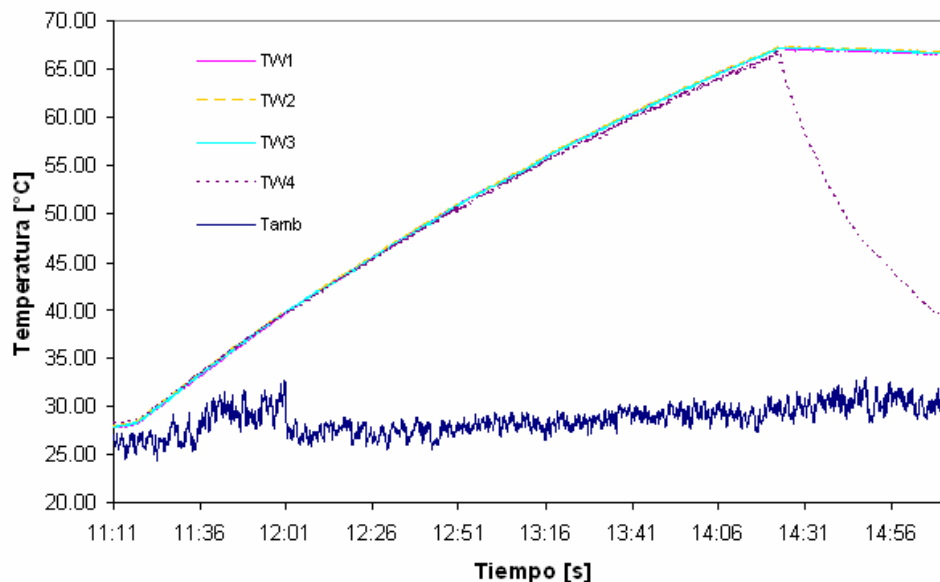


Figura 5.4. Temperaturas en el termotanque y temperatura ambiente.

En la Figura 5.5 se observan los valores calculados de la eficiencia a partir de los datos experimentales y la regresión lineal de la cual se obtuvieron los valores de  $F_R$  y  $U_L$  para el flujo de 2.7 lpm (ver tabla 5.1).

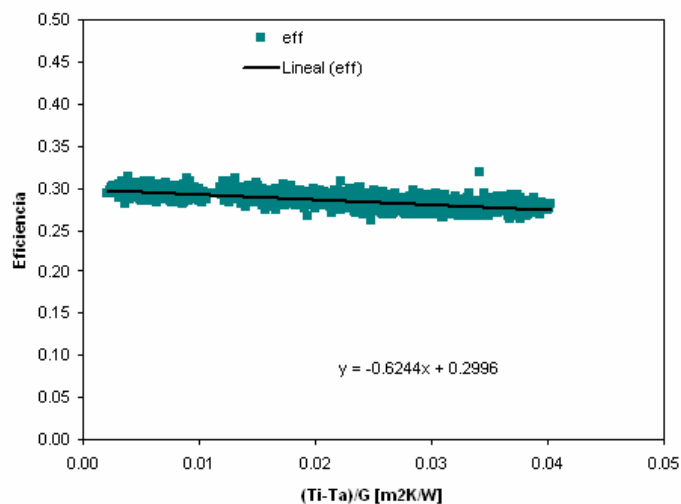


Figura 5.5. Eficiencia e incremento de temperatura.

## 5.2 Resultados del Experimento de Circuito Abierto

En este experimento se hicieron pruebas en el modo de sistema abierto con tres flujos diferentes: 1, 2 y 3 lpm a las temperaturas de entrada de: 30, 40, 50, 60 y 70 °C, para cada incremento de temperatura se puso a trabajar en modo de recirculación.

### 5.2.1 Resultados para 1 lpm

En este experimento se mantuvo un flujo de 1 lpm y se probó el sistema con temperaturas de entrada de agua de a 30, 40, 50, 60 y 70 °C, a pesar de que no todas las temperaturas fueron alcanzadas como en los casos de 60 y 70 °C. La eficiencia fue decreciendo a partir de 0.21 como puede verse en la figura 5.6. Las variaciones que se observan en la figura se deben a que los cambios en las temperaturas a la entrada del receptor se realizaron de forma escalonada. En la figura también se observa la regresión lineal que se obtuvo a partir de la eficiencia calculada con datos experimentales. Los valores obtenidos de  $F_R$  y  $U_L$  se pueden ver en la Tabla 5.1.

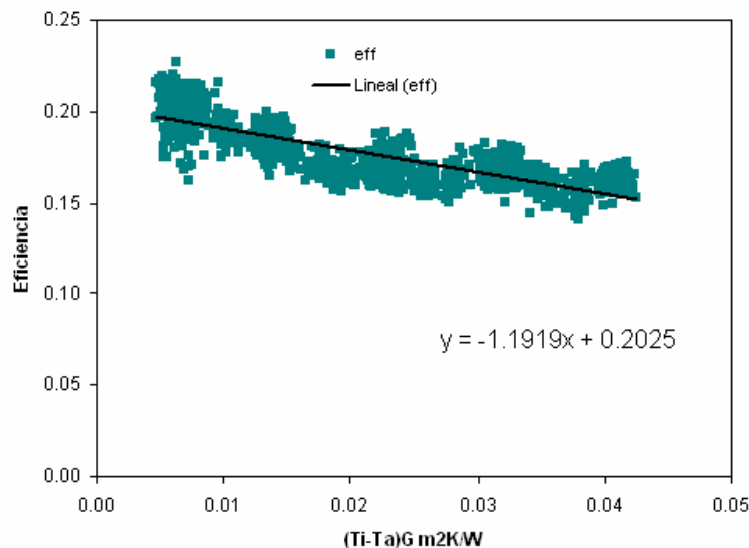


Figura 5.6. Eficiencia e incremento de temperatura.



En la Figura 5.7 se observan los valores medidos de temperatura del agua en la salida del receptor Vs. los valores obtenidos por el modelo en una simulación en Excel. El error relativo promedio de la simulación con respecto a los valores medidos es de  $6.17 \pm 0.06 \%$ .

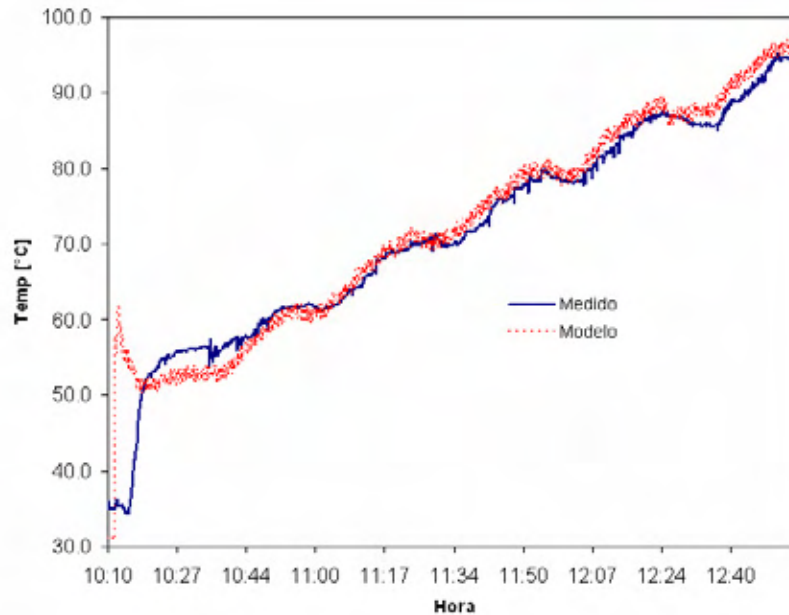


Figura 5.7. Temperatura de salida del agua del receptor Medición Vs Modelo para 1 lpm.

### 5.2.2 Resultados para 2 lpm

En este experimento se mantuvo un flujo de 2 lpm y se probó el sistema con temperaturas de entrada de agua de a 30, 40, 50, 60 y 70 °C. Las variaciones que se observan en la Figura 5.8 se deben a que el cambio en las temperaturas a la entrada del receptor se realizaron de forma escalonada. En la figura también se observa la regresión lineal que se obtuvo a partir de la eficiencia calculada con datos experimentales y como fue decreciendo la eficiencia a partir de 0.29. Los valores correspondientes de  $F_R$  y  $U_L$  se pueden ver en la Tabla 5.1.

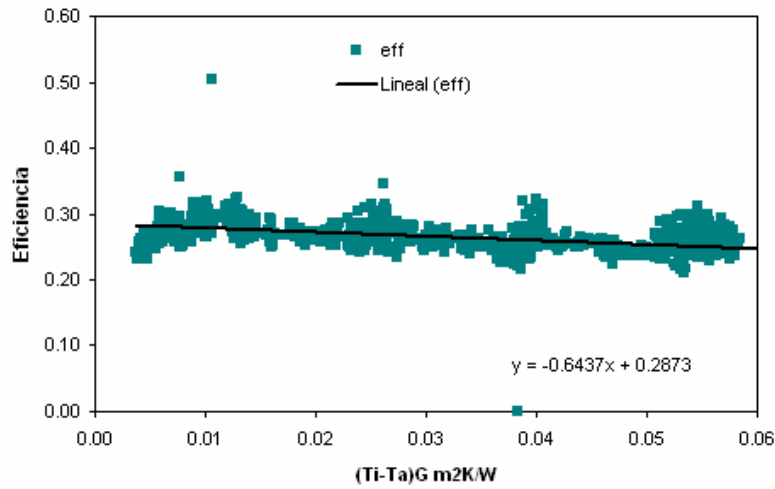


Figura 5.8. Eficiencia e incremento de temperatura.

En la Figura 5.9 se observan los valores medidos de temperatura del agua en la salida del receptor Vs. los valores obtenidos por el modelo en una simulación en Excel. El error relativo promedio de la simulación con respecto a los valores medidos es de  $2.30 \pm 0.05 \%$ .

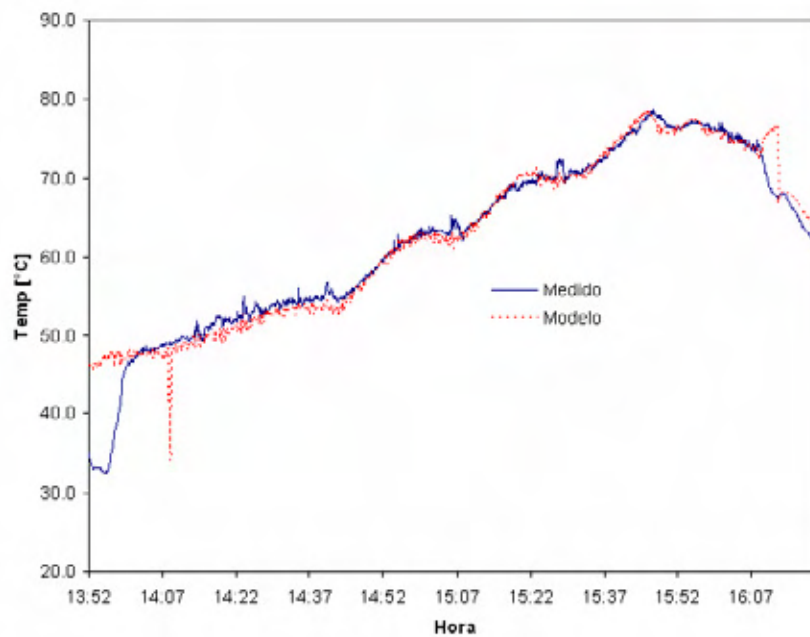


Figura 5.9. Temperatura de salida del agua del receptor Medición Vs Modelo para 2 lpm.

### 5.2.3 Resultados para 3 lpm

En este experimento se mantuvo un flujo de 3 lpm y se probó el sistema con temperaturas de entrada de agua de a 30, 40, 50, 60 y 70 °C. En la Figura 5.10 se observan los valores calculados de la eficiencia y la regresión lineal. Las variaciones que se observan en la figura se deben a que los cambios en las temperaturas en la entrada del receptor se realizaron de forma escalonada. Los valores correspondientes de  $F_R$  y  $U_L$  se pueden ver en la Tabla 5.1.

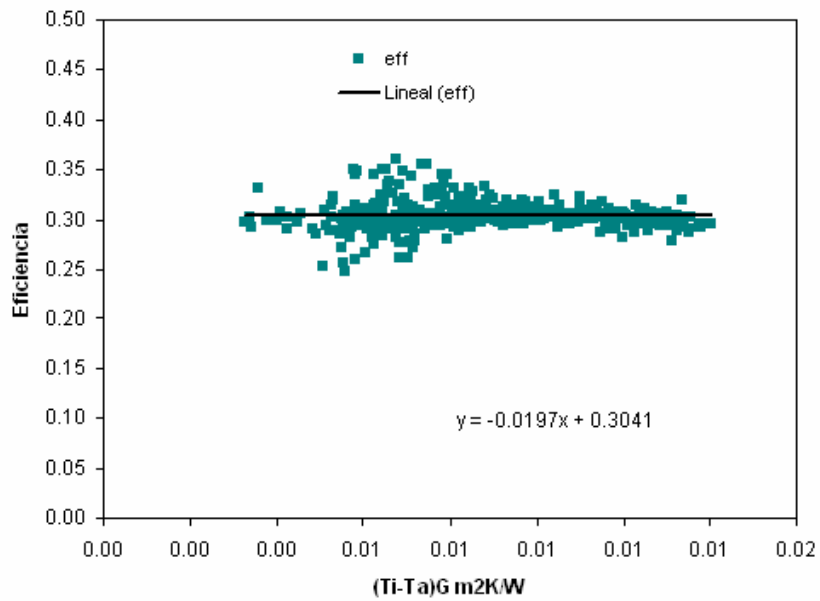


Figura 5.10. Eficiencia e incremento de temperatura.

En la Figura 5.11 se observan los valores medidos de temperatura del agua en la salida del receptor y los valores obtenidos por el modelo en una simulación en Excel. El error relativo promedio de la simulación con respecto a los valores medidos es de  $3.87 \pm 0.03 \%$ .

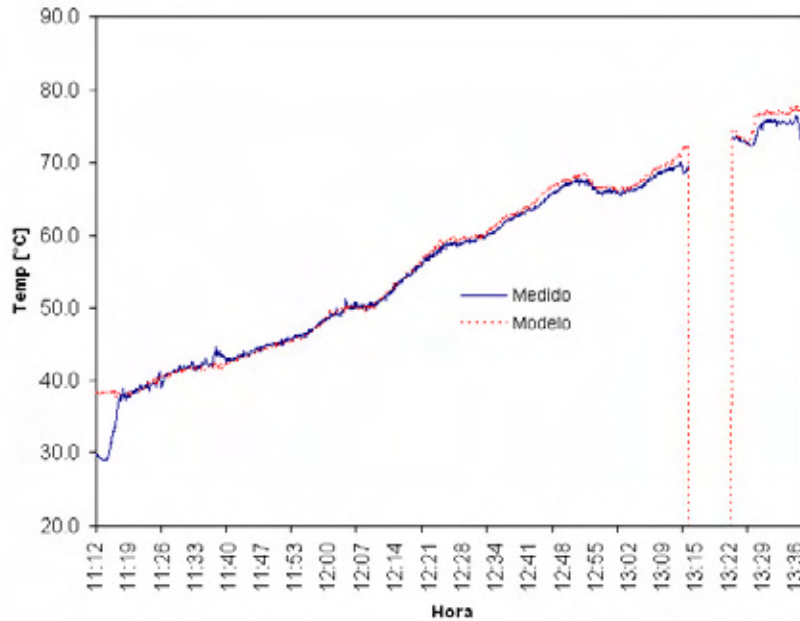


Figura 5.11. Temperatura de salida del agua del receptor Medición Vs Modelo para 3 lpm.

En la Tabla 5.1 se observan los valores obtenidos de  $F_R$  y  $U_L$  para los distintos flujos, tanto los valores obtenidos a partir de las regresiones lineales como los valores de  $U_L$  obtenidos en la simulación de manera iterativa hasta ajustarse lo más posible al valor medido de la temperatura del agua a la salida del receptor. Si bien existe una gran diferencia entre los valores calculados y los obtenidos de manera iterativa para  $U_L$ , estos son consistentes en el aspecto de que fue mayor para flujos pequeños y se fue reduciendo para flujos mayores. En el caso de 2.7 lpm el coeficiente global de pérdidas fue mayor debido a que en  $U_L$  van incluidas las pérdidas a través de las mangueras y conexiones del circuito hidráulico.

Tabla 5.1. Valores de  $F_R$  y  $U_L$  para diferentes flujos.

Flujo lpm	$F_R$ Regresión	$U_L$ Regresión W/m <sup>2</sup> °C	$U_L$ Simulación W/m <sup>2</sup> °C
1	0.348	161.9	60.0
2	0.463	60.8	30.0
3	0.501	13.4	13.4
2.7 (Recirculación)	0.500	53.4	25.0

### 5.3 Eficiencias para Distintos Flujos

Las eficiencias para los distintos flujos y con temperaturas de 30, 40, 50, 60 y 70 °C se presentan en la gráfica de la Figura 5.12. Se observa que se alcanzaron mejores eficiencias conforme se incrementó la velocidad del flujo másico de agua. En el caso del incremento en la temperatura de entrada del agua se obtuvieron los resultados esperados, ya que la eficiencia fue bajando conforme la temperatura del agua en la entrada del receptor fue aumentando.

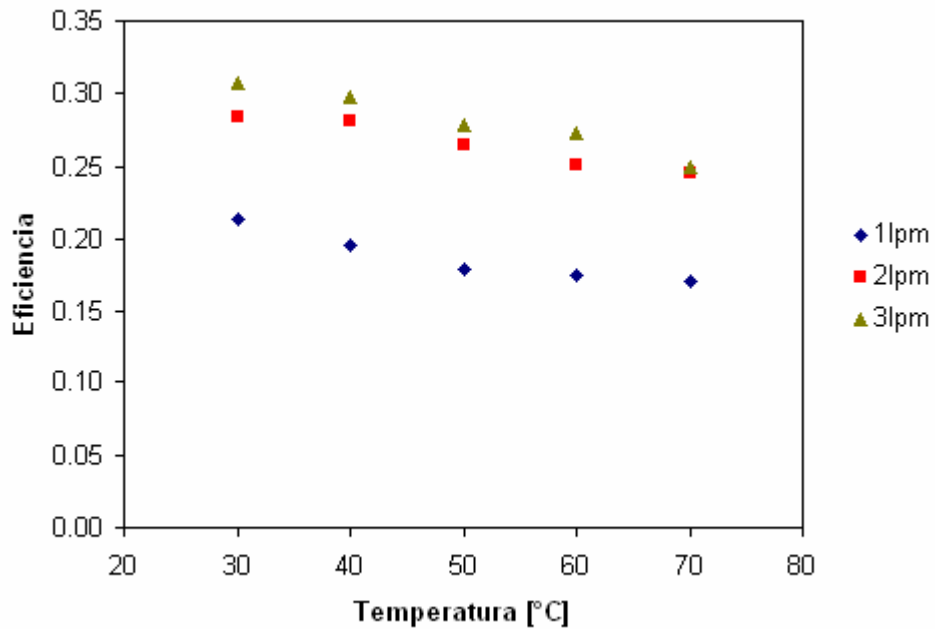


Figura 5.12. Eficiencias para 1, 2 y 3 lpm a diferentes temperaturas.

## 5.4 Resultados de la Constante de Tiempo

Para esta prueba se enfoco y saco fuera de foco al receptor para verificar su respuesta para 3 y 4 lpm, dos veces para cada flujo. La constante de tiempo para el receptor fue de 1 min 50 seg para un flujo de 3 lpm y de 2 min 20 seg para un flujo de 4 lpm (ver Figura 5.1).

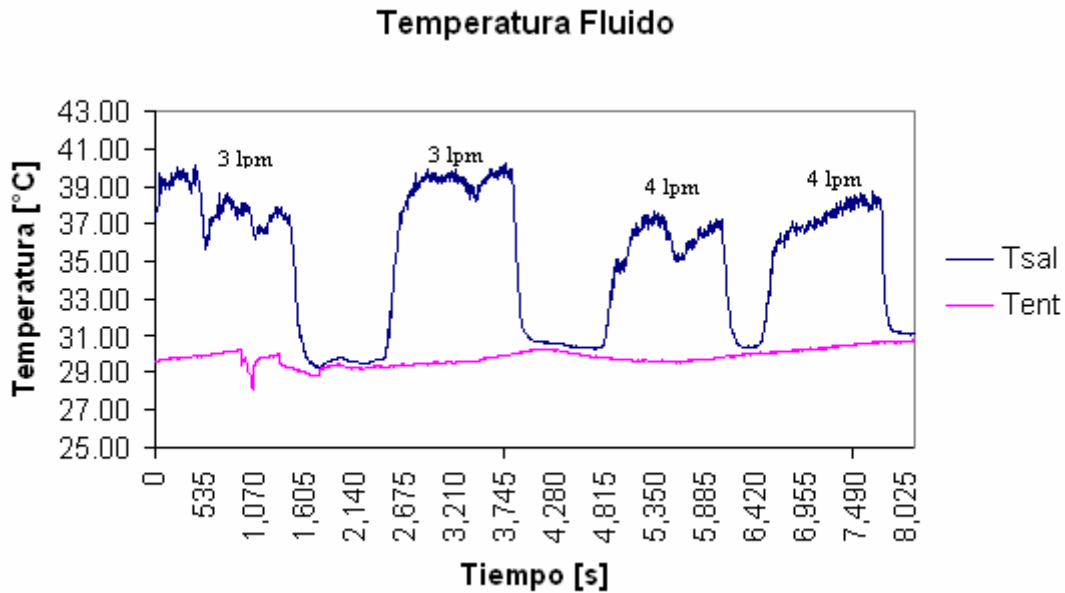


Figura 5.1. Respuesta del receptor para 3 y 4 lpm.

En este capítulo se obtuvieron las eficiencias para diferentes flujos y temperaturas. Con un flujo mayor se obtuvieron mejores eficiencias térmicas, para 3 lpm y una temperatura de entrada en el receptor de 30 °C la eficiencia del receptor fue de 0.32. La eficiencia mas baja que se registro fue de 0.17 para 1 lpm y una temperatura en la entrada del receptor de 70°C.

Por otro lado el modelo matemático propuesto se aproximó bastante bien al valor experimental con un error relativo promedio de  $0.95 \pm 0.68$  % para el experimento en circuito cerrado.

En el siguiente capítulo se exponen las conclusiones a las que se llegó con los resultados teóricos y experimentales de este trabajo.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En los capítulos anteriores se expusieron las necesidades y las acciones para poner a punto el COSPAA-90, el modelo teórico propuesto, la metodología experimental y los resultados experimentales. Se muestran logros importantes en este trabajo de tesis de maestría que fueron desde la implementación exitosa del sistema de seguimiento y el sistema de suministro y almacenamiento de agua caliente, hasta el modelo teórico que reproduce con buena exactitud los valores experimentales. A continuación se exponen las principales conclusiones de este trabajo.

El primer logro importante en el capítulo 1 fue identificar la problemática que se enfrentaba en la puesta a punto del COSPAA-90 para ser usado como sistema de generación de calor de proceso. Uno de los problemas importantes fue que el sistema de seguimiento no era robusto, los componentes de la tarjeta de prueba fallaban con frecuencia. Otro problema importante era que no se contaba con un sistema de suministro de agua precalentada para la caracterización del receptor.

La propuesta en el capítulo 2 para solucionar el problema de robustez fue el diseño y construcción de los circuitos de control en tarjetas impresas, esto mejoró bastante la confiabilidad del sistema. La resolución que se logró con este sistema fue bastante buena, la cual fue de 2 mrad. El error de seguimiento fue pequeño, se tuvo un error relativo promedio de  $1.1 \pm 0.9 \%$  para el cenit y de  $0.76 \pm 0.06 \%$  para el azimut. Además contar con un sistema automático de seguimiento del sol facilitó mucho la experimentación. Se construyó y se caracterizó el sistema de suministro y almacenamiento de agua caliente. Este sistema permitió suministrar agua precalentada al receptor en un rango que fue de la temperatura de suministro del agua hasta  $70 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , ya que se implementó un sistema de control de temperatura usando resistencias eléctricas. También se implementó un sistema hidráulico que permitió que el sistema operara en los modos de recirculación y circuito abierto sin

tener que desconectar ninguna manguera. Se lograron implementar de manera exitosa una estrategia para llegar de manera más rápida a la temperatura de suministro deseada. Esta estrategia consistió en recircular el agua a través del receptor (recibiendo radiación concentrada) a la vez que funcionaban las resistencias eléctricas para calentar el agua de manera más rápida, de tal forma que se logro mejorar la tasa de incremento de temperatura de  $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  a  $0.96\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Con las mediciones de decremento de temperatura se calculó un coeficiente global de pérdidas para el termotanque que resulto ser  $U_L = 3.3\text{ W}/^{\circ}\text{C}$ . Los trabajos realizados en el capítulo 2 permitieron adecuar el COSPAA-90 como sistema de generación de calor de proceso.

En el capitulo 3 se propuso el modelo teórico basado en un balance de energía de Primera Ley de la termodinámica. A partir de la eficiencia y del modelo, se dedujo la ecuación para obtener los valores del coeficiente global de pérdidas  $U_L$  y del factor de remoción  $F_R$ .

En el capítulo 4 se propuso la metodología experimental basada en la norma ANSI/ASHRAE 93-1986 para llevar a cabo la caracterización del receptor. Se implementó la instrumentación del receptor, se acopló el sistema y se probó de manera exitosa. Dentro de los logros también está la implementación de un filtro activo para la adquisición de datos de flujo volumétrico. También se implementaron diagramas de flujo para llevar a cabo los experimentos de manera clara.

En el capítulo 5 se obtuvieron los resultados experimentales. En el caso del experimento en circuito cerrado, se logró aproximar bastante bien el modelo teórico con los datos experimentales con un error relativo promedio de  $2.0 \pm 1.2\%$ . El factor de remoción fue  $F_R = 0.5$  y el coeficiente global de pérdidas en el receptor fue  $U_L = 11.1\text{ W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$  para un flujo de 2.7 lpm. Para los experimentos en circuito abierto se lograron calcular las eficiencias a partir de los datos experimentales y se pudieron calcular los valores de del coeficiente global de pérdidas  $U_L$  y del factor de remoción  $F_R$ . También en el modelo se pudieron obtener los valores de  $U_L$  mediante un método iterativo. Las simulaciones se lograron aproximar a los valores experimentales en la temperatura de salida del agua del receptor, el error relativo promedio de la simulación para 1 lpm con respecto a los valores medidos fue de  $6.17 \pm 0.06\%$ . Para el caso de 2 lpm el error fue de  $2.30 \pm 0.05\%$ , y  $3.87 \pm 0.03\%$  para 3 lpm. Se lograron obtener las constantes de tiempo del receptor para 3 y 4 lpm, estas fueron 1 min 50 seg para un flujo de 3 lpm y de 2 min 20 seg para un flujo de 4 lpm.

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta tesis fueron satisfactorios, ya que se lograron caracterizar tanto el sistema de suministro de agua caliente como el receptor. Se encontró que el factor de remoción en el receptor fue bajo, de 0.34 a 0.50 para los flujos que se experimentaron.

Se detectaron diversos puntos de mejora para el sistema. En lo que respecta al sistema de control de seguimiento se tiene todavía el inconveniente de que se debe enfocar el colector antes de poner en marcha el programa de seguimiento. Además, durante las



pruebas se tuvieron desfases debidos a errores mecánicos y a la falta de un sistema de retroalimentación del enfoque que tampoco está contemplado en el programa de seguimiento. Durante ciertos días del año la velocidad de los motores no fue suficiente para seguir la trayectoria aparente del sol.

Con respecto al sistema de generación de calor de proceso se observó que gran parte de las pérdidas de calor ocurrieron a través de las mangueras que interconectan el termotanque con el receptor. Tampoco se pudo generar vapor con un flujo constante.

Con base en los puntos expuestos anteriormente se hacen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- Mejorar el sistema de seguimiento implementando un circuito de retroalimentación del enfoque del sol con respecto al plano de apertura del colector.
- Rediseñar la tarjeta electrónica de control para que se pueda alimentar con un voltaje mayor y así la velocidad de los motores sea suficiente para seguir la trayectoria aparente del sol durante todos los días del año.
- Implementar en el programa de seguimiento las rutinas necesarias para que el enfoque del colector y el seguimiento de la trayectoria aparente del sol sean totalmente automatizados.
- Calcular las pérdidas a través de las mangueras que interconectan el receptor y el termotanque para seleccionar un aislamiento térmico adecuado.
- Rediseñar el receptor con la finalidad de mejorar el factor de remoción.

Con base en los resultados obtenidos se plantea la posibilidad de rediseñar el receptor del concentrador COSPAA-90, que si bien la geometría puede ser la más adecuada para la máxima captación de energía, se debe tener en mente los materiales empleados para su construcción así como un estudio más detallado en mecánica de fluidos que aseguren la máxima remoción de calor del receptor.



## APÉNDICE A

### CIRCUITOS IMPRESOS PARA EL CONTROL DE SEGUIMIENTO DEL SOL

A continuación se describe el proceso de construcción y ensamble de las tarjetas impresas para el circuito de control y el de radiofrecuencia:

1. A partir de los circuitos de prueba y de diagramas previos se generaron los diagramas esquemáticos de cada uno de los circuitos (ver diagramas de las figuras A.1 y A.2) y se genera una lista de componentes.
2. Usando los diagramas esquemáticos de los circuitos se generaron los diagramas impresos en PCB Wizard (ver diagramas de las figuras A.3 y A.4).
3. Los circuitos generados se imprimieron en un papel especial para fabricación de circuitos impresos.
4. Se uso una plancha para grabar cada circuito impreso en tarjetas fenólicas de cobre limpias. El planchado se hizo de manera que al retirarse el papel el circuito quedó impreso en la tarjeta de cobre.
5. Las tarjetas de cobre se sumergieron en una solución comercial de cloruro férrico el tiempo suficiente para disolver el cobre que no estaba protegido por la impresión.
6. Se lavaron las tarjetas y se lijaron con una lija fina para quitar la impresión y dejar expuesto el cobre.
7. Una vez limpia la tarjeta se hicieron las perforaciones correspondientes para la inserción de cada componente.
8. Con una plancha y un acetato se imprimió el lugar correspondiente de cada componente en las tarjetas.
9. Se probó y colocó cada componente en su lugar correspondiente usando los diagramas esquemáticos y la lista de componentes.
10. Se soldaron las terminales de los componentes y se cortaron los excedentes de alambre.
11. Se probó el funcionamiento de las tarjetas.

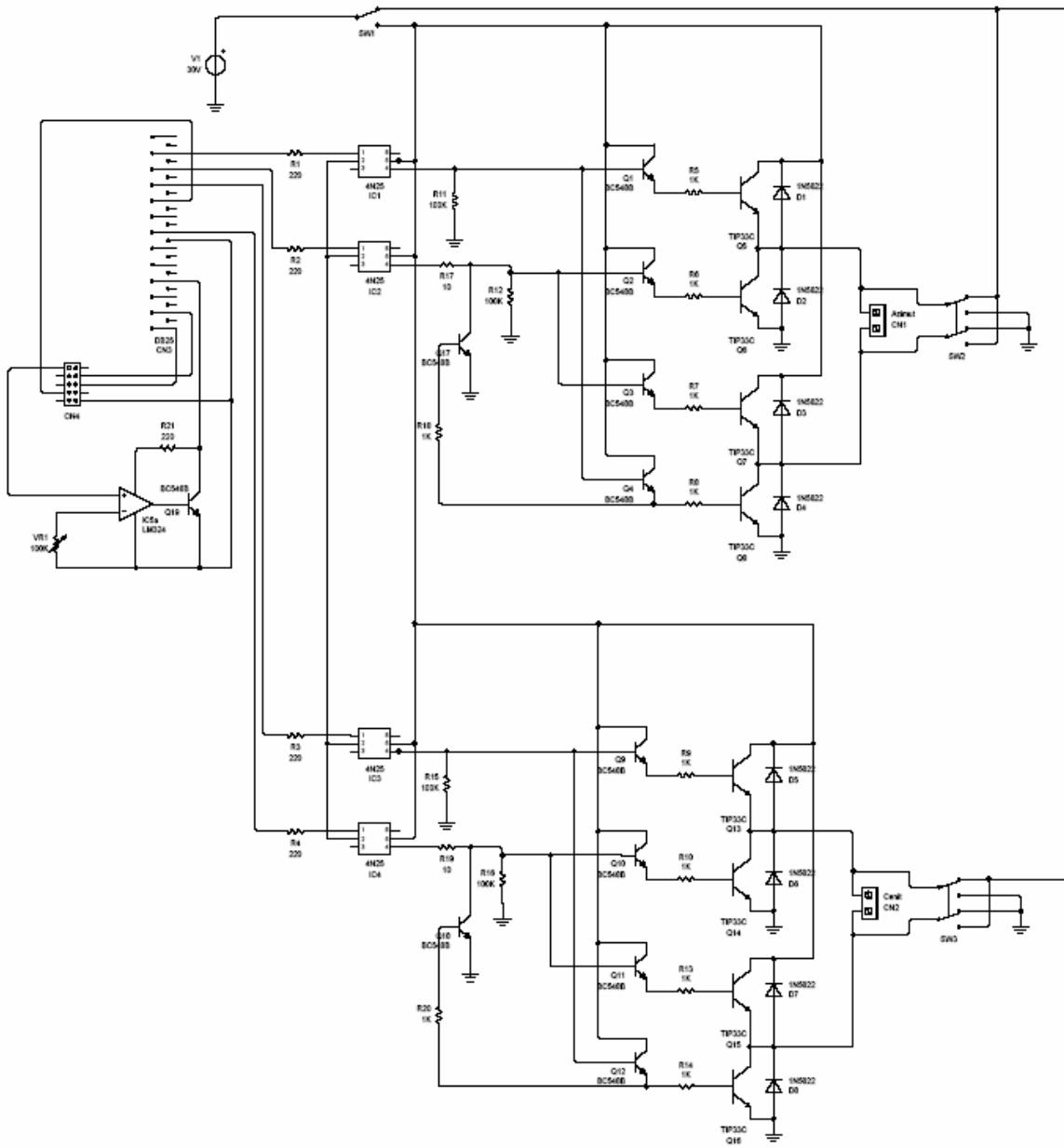


Figura A.1 Diagrama esquemático del circuito de control de seguimiento solar.

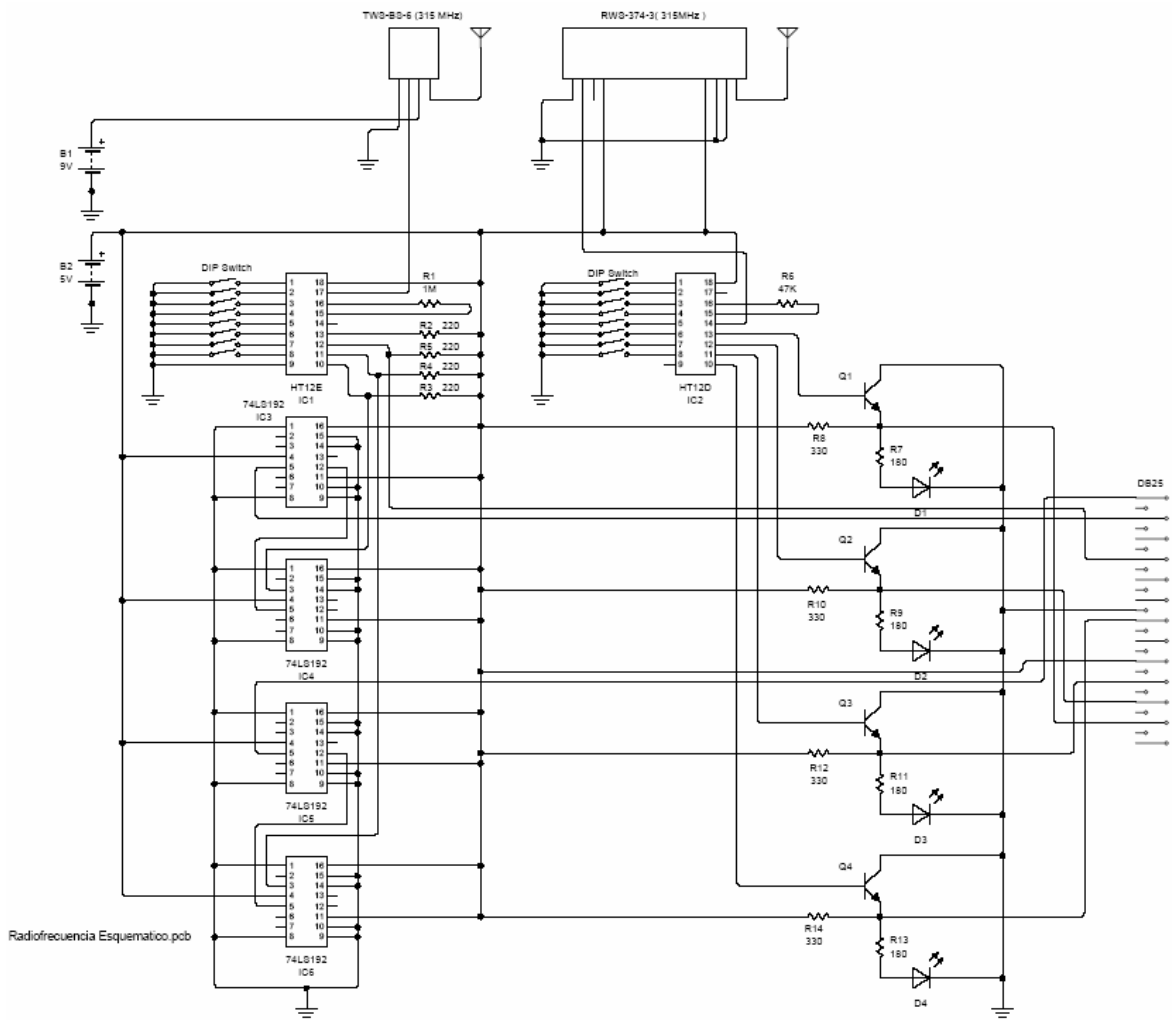


Figura A.2 Diagrama esquemático del circuito de radiofrecuencia.

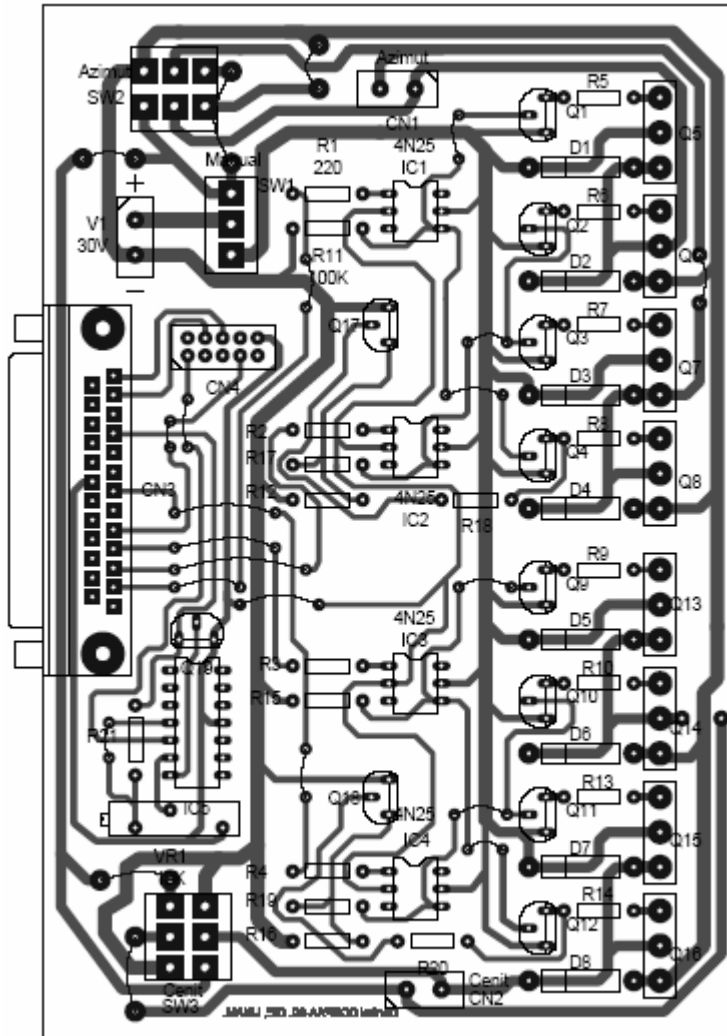


Figura A.3 Diagrama impreso del circuito de control.

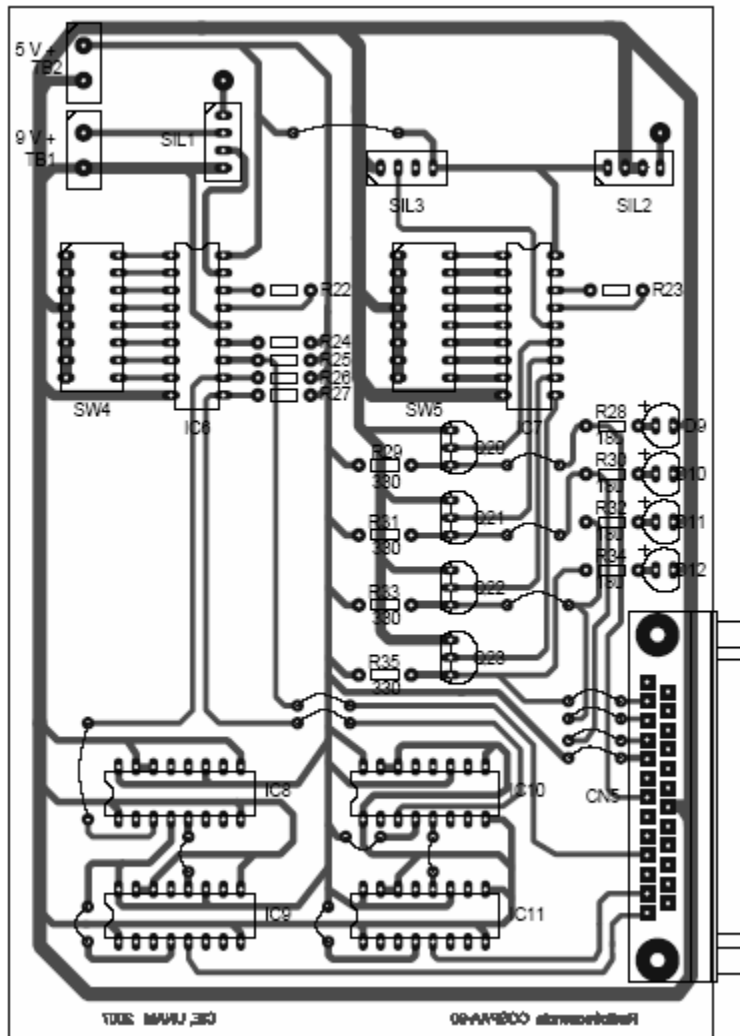


Figura A.4 Diagrama impreso del circuito de radiofrecuencia.

## APÉNDICE B

### SENSORES DE POSICIÓN DE EFECTO HALL

Los sensores de efecto Hall se suelen utilizar para detectar la velocidad angular de un dispositivo rotatorio. El sensor de efecto Hall se basa en la tensión transversal de un conductor que está sometido a un campo magnético. Colocando un voltímetro entre dos puntos transversales de un cable se puede medir esa tensión. Para ello hay que hacer circular por el cable una intensidad fija y acercar un imán. Los electrones que pasan por el cable se verán desplazados hacia un lado. Entonces aparece una diferencia de tensión entre los dos puntos transversales del cable. Al separar el imán del cable, la tensión transversal desaparece. Para poder utilizar la tensión transversal es necesario amplificarla, porque su valor es muy reducido. En la figura A.5 se muestra un sensor de posición de efecto Hall.

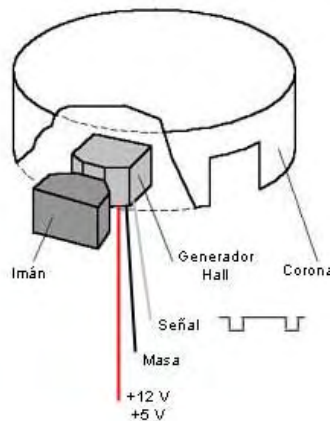


Figura A.5. Sensor de posición de efecto Hall.



Un sensor de efecto Hall se compone de:

- Un generador magnético que suele ser un imán fijo.
- Un pequeño módulo electrónico donde se encuentran los componentes que miden la tensión transversal.
- Una corona metálica con ventanas para interrumpir el campo magnético.

La corona metálica se intercala entre el imán fijo y el módulo electrónico y está unida a un eje con giro. Según la posición de la corona, el campo magnético del imán llega hasta el módulo electrónico. La tensión obtenida a la salida del módulo electrónico, una vez tratada y amplificada corresponde con un valor alto (de 5 a 12 voltios) cuando la corona tapa el campo magnético, y un nivel bajo (de 0 a 0,5 voltios) cuando la corona descubre el imán.

## APÉNDICE C

### CÓDIGO DE PROGRAMA DE SEGUIMIENTO DEL SOL.

A continuación se presenta el código de programa en PASCAL usado en el sistema de seguimiento del sol. El programa fue desarrollado por José Ortega y José Campos del área de sistemas fotovoltaicos del Centro de Investigación en Energía.

```
program segRF1; {j campos, 28 de Junio del 2005}
uses dos,crt,angusol;
type vector=array[1..2000] of real;
CONST
  glt=18; {Latitud en grados}
  mlt=50; {Latitud en minutos}
  gln=99; {Longitud en grados}
  mln=14; {Longitud en minutos}
  hv=1; {horario de verano: si=1 , no=0}
  {
  function azimutal(ano,mes,nd,hr,min,s,glt,mlt,gln,mln,hv:word):real;
  function zenital(ano,mes,nd,hr,min,s,glt,mlt,gln,mln,hv:word):real;
  function
azimutal2(ano,mes,nd:word;hr:real;glt,mlt,gln,mln,hv:word):real;
  function
zenital2(ano,mes,nd:word;hr:real;glt,mlt,gln,mln,hv:word):real;
  function timer:real; tiempo en segundos
  function timerh:real; tiempo en horas
  procedure espera(t0,t:real);

  }
var h,s,cs,n,k,ano,mes,dia,ds:word;
```

```

    dif,dif2,ci,zi,z,c,z0,c0,t0:real;
    ar1,ar2:text;
    n1,n2,n3,n4,mes_sig,dia_sig,m:word;
    n_regresa_azim,n_regresa_cenit:longint;
const
    p=888; p1=p+1;
    avance_azim=12;
    retroceso_azim=40;
    avance_cenit=9;
    retroceso_cenit=10;
    pulso_azim=16;
    pulso_cenit=32;
    resolucion_azim=0.00111; {grados/pulso}
    resolucion_cenit=0.00104; {grados/pulso}
    hmin=8.5; hmax=18.5; da=0.25; {incremento en grados para
seguimiento}
    n_azim=round(da/resolucion_azim);
n_cenit=round(da/resolucion_cenit);

procedure mover_motor(dir,pulso:byte;n:word);
var k:word; d0,d1:byte;
begin
    k:=0;
    d0:=port[p1] and pulso;
    port[p]:=dir;
    repeat
        d1:=port[p1] and pulso;
        if d1<>d0 then begin inc(k);
gotoxy(10,8);writeln(dir:3,k:5,n:6); d0:=d1; end;
    until k>=n;
    port[p]:=0;
end;

procedure dia_siguiente(a,m,d:word; var mes,dia:word);
begin
    mes:=m;
    dia:=d+1;
    case d of
    28 : if ((a mod 4 <> 0) and (m=2)) then begin mes:=3; dia:=1;
end;
    29 : if m=2 then begin mes:=3; dia:=1; end;
    30 : case m of
        4,6,9,11 : begin mes:=m+1; dia:=1; end;
        end; {case}
    31 : if m=12 then
        begin
            mes:=1;
            dia:=1;
        end
        else
        begin
            mes:=mes+1;
            dia:=1;
        end;
    end;
end;

```

```

        end;
    end; {case}
end; {dia_siguiete}

begin {principal}
    clrscr; n:=0; port[p]:=0;
    assign(ar1,'caraz3.dat');
    assign(ar2,'carce3.dat');
    rewrite(ar1); rewrite(ar2);
    getdate(ano,mes,dia,ds);
    writeln(ar1,dia,'/',mes,'/',ano);
    writeln(ar2,dia,'/',mes,'/',ano);
    write('Introducir posicion azimutal y cenital ( 0 0 si no se
conocen)');
    readln(z0,c0);
    if (z0=0) and (c0=0) then begin
        writeln(' Posicionar el seguidor de manera manual , tocar
una tecla cuando est, llisto');
        repeat
            gotoxy(10,19);          writeln('Azimut          =
',azimutal2(ano,mes,dia,timerh,glt,mlt,gln,mln,1):9:3);
            gotoxy(10,20);          writeln('Cenit           =
',zenital2(ano,mes,dia,timerh,glt,mlt,gln,mln,1):9:3);
        until keypressed;
    end;
    repeat
        getdate(ano,mes,dia,ds);
        writeln(ar1,dia,'/',mes,'/',ano);
        writeln(ar2,dia,'/',mes,'/',ano);
        repeat
            gettime(h,m,s,cs);
            gotoxy(10,10);          write('Esperando          la          hora          inicial          :
',int(hmin),':',round(hmin*60) mod 60,' Hora actual: ',h,':',m,':',s);
            until (timerh>hmin) and (timerh<hmax);
            gotoxy(10,10);          write('
');
            t0:=timerh;
            if (z0=0) and (c0=0) then begin
                c0:=zenital2(ano,mes,dia,t0,glt,mlt,gln,mln,hv);
                z0:=azimutal2(ano,mes,dia,t0,glt,mlt,gln,mln,hv);
            end;
            { z0 es la posicion azimutal del seguidor
              z es la posicion azimutal del sol
              c0 es la posicion cenital del seguidor
              c es la posicion cenital del sol }
            n1:=0; n2:=0; n3:=0; n4:=0;
            repeat
                z:=azimutal2(ano,mes,dia,timerh,glt,mlt,gln,mln,hv);

                {mas general podria ser dif:=360-abs(z0)-abs(z);}
                dif:=abs(z-z0);
                if (z*z0<0) and (dif>180) then dif:=360-abs(z0)-
abs(z);

```

```

        if dif>=da then
        begin
            if (z>z0) or ((z-z0)<-180) then begin
                inc(n1);
mover_motor(avance_azim,pulso_azim,2*n_azim);
                z0:=z0+2*da;
                if z0>180 then z0:=-180+(z0-180);
            end
            ELSE
            if (z<z0) or ((z-z0)>180) then begin
                inc(n2);
mover_motor(retroceso_azim,pulso_azim,2*n_azim);
                z0:=z0-2*da;
                if z0<-180 then z0:=180-(-180-
z0);
            end;

z:=azimutal2(ano,mes,dia,timerh,glt,mlt,gln,mln,hv);
writeln(ar1,n1:5,n2:5,timerh:9:4,dif:9:3,z0:9:4,z:9:4);
                gotoxy(10,19);
                if (n1+n2) mod 5 =0 then begin close(ar1); append(ar1); end;
write(n1:5,n2:5,timerh:9:4,dif:9:3,z0:9:4,z:9:4);
                end;

c:=zenital2(ano,mes,dia,timerh,glt,mlt,gln,mln,hv);
                dif:=abs(c-c0);
                if dif>=da then
                begin
                    if c>c0 then begin
                        inc(n3);
mover_motor(avance_cenit,pulso_cenit,2*n_cenit);
                            c0:=c0+2*da; end
                    else
                        begin
                            inc(n4);
mover_motor(retroceso_cenit,pulso_cenit,2*n_cenit);
                            c0:=c0-2*da; end;

c:=zenital2(ano,mes,dia,timerh,glt,mlt,gln,mln,hv);
writeln(ar2,n3:5,n4:5,timerh:9:4,dif:9:3,c0:9:4,c:9:4);
                if (n3+n4) mod 5 =0 then begin close(ar2); append(ar2);
end;
                    gotoxy(10,20);
write(n3:5,n4:5,timerh:9:4,dif:9:3,c0:9:4,c:9:4);
                    end;

```

```

                if      (n1+n2+n3+n4) mod 5 = 0 then begin
close(ar1); append(ar1); close(ar2); append(ar2); end;
                until timerh>=hmax;
                close(ar1); append(ar1); close(ar2); append(ar2);
                {regreso}

                dia_siguiente(ano,mes,dia,mes_sig,dia_sig);

zi:=azimutal2(ano,mes_sig,dia_sig,hmin,glt,mlt,gln,mln,hv);
                dif2:=abs(zi-z0);
                if dif2>180 then dif2:=360-abs(zi)-abs(z0);
                n_regresa_azim:=round(dif2/resolucion_azim);
                if n1>n2 then

mover_motor(retroceso_azim,pulso_azim,n_regresa_azim)
                else

mover_motor(avance_azim,pulso_azim,n_regresa_azim);

ci:=zenital2(ano,mes_sig,dia_sig,hmin,glt,mlt,gln,mln,hv);
                n_regresa_cenit:=round(abs(ci-c0)/resolucion_cenit);
                if ci>c0 then
mover_motor(avance_cenit,pulso_cenit,n_regresa_cenit)
                else
mover_motor(retroceso_cenit,pulso_cenit,n_regresa_cenit);

                until timerh<0;      {por siempre}

end.

```

## **APÉNDICE D**

### **DATOS TÉCNICOS DEL SISTEMA DE SUMINISTRO Y ALMACENAMIENTO DE AGUA CALIENTE**

A continuación se presentan los datos técnicos de los componentes del sistema de suministro y almacenamiento de agua caliente.

#### **Termotanque**

El termotanque está compuesto por: un tanque de lámina de acero inoxidable 304 2B calibre 18 con aislante de poliuretano de 50mm de espesor y revestimiento de lamina pinto calibre 26 cuyo espesor es de 0.45 mm.

Especificaciones:

- Dimensiones del termo tanque: 50 cm de diámetro y 110 cm de longitud
- Volumen: 0.204 m<sup>3</sup>
- Capacidad: 120 Lt
- Peso vacío: 27 kg
- Peso lleno (agua): 220 Kg
- Presión: 3.0kg/cm<sup>2</sup>
- Temperatura máxima de trabajo: 70 °C.

## **Sistema eléctrico**

El sistema eléctrico está conformado por los siguientes componentes:

- Resistencias eléctricas de 3 y 6 Kw ambas con tapón hexagonal NPT 3" c/3 elementos acero inox 7/16 220V
- Pirómetro Digital XMTG 818-200A 1600°
- Contactor trifásico 240V/30A

## **Sistema hidráulico.**

El sistema hidráulico está conformado por los siguientes componentes:

- Bomba Siemens de 1/2 Hp, 120V. 1 ¼" X 1" suc/des
- Tubería y accesorios de cobre, diámetros utilizados de ½" y ¾"
- Válvulas de nivel acero inoxidable T-316, ½ NPT
- Tubo para nivel de 5/8" de diámetro y 1/8" de espesor
- Aislamiento Armaflex en tubo de ½" X 1" y ¾" X ½"



## **APÉNDICE E**

### **CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA Y PRESIÓN.**

A continuación se presentan los procedimientos de calibración de los sensores de temperatura, presión y flujo y las curvas obtenidas.

#### **E.1 Calibración de termopares**

Para la medición de temperatura se seleccionaron termopares tipo K. El procedimiento consistió primero en hacer los termopares usando un autotransformador y mediante un corto circuito unir las terminales del termopar como puede observarse en la figura E.1.

Una vez hechos los termopares se calibraron usando el termopozo Hart Scientific 9100S con una exactitud de  $\pm 0.5$  °C a 375 °C. Los termopares del termotanque se calibraron en incrementos de 10 °C en un rango de 40 a 70 °C. Se van registrando las temperaturas tanto del termopozo (referencia) como de los termopares en todos los incrementos. Se promedian los intervalos de temperatura que permanecen constantes a lo largo del tiempo y se grafican. Se obtiene la curva de calibración mediante una aproximación lineal. En la figura E.1 se muestran las curvas de calibración de los termopares Tamb, TW1, TW2 Y TW3.

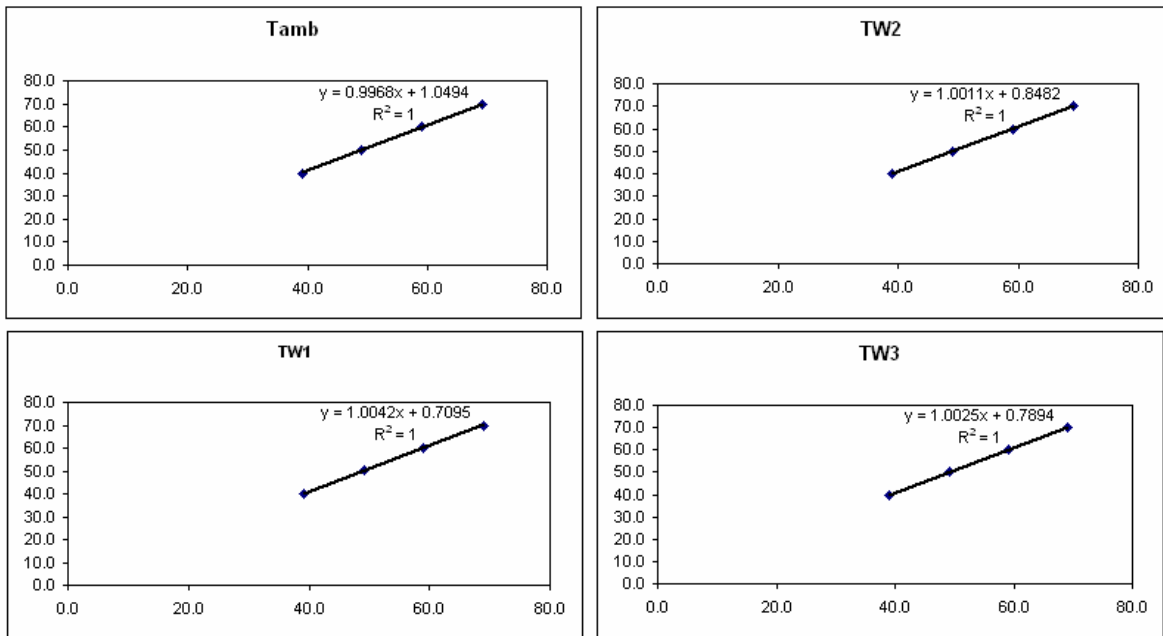


Figura E.1 Curvas de calibración de Tamb, TW1, TW2 Y TW3.

Para el termopar de salida del termostato TW4 se usó el mismo procedimiento, en la figura E.2 se puede ver su curva de calibración.

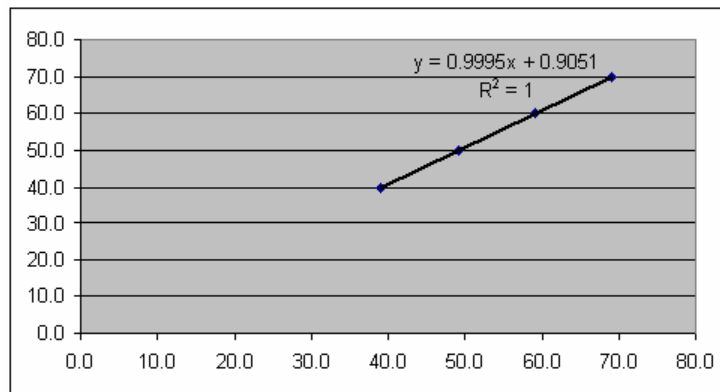


Figura E.2 Curva de calibración de TW4 (salida del termostato).

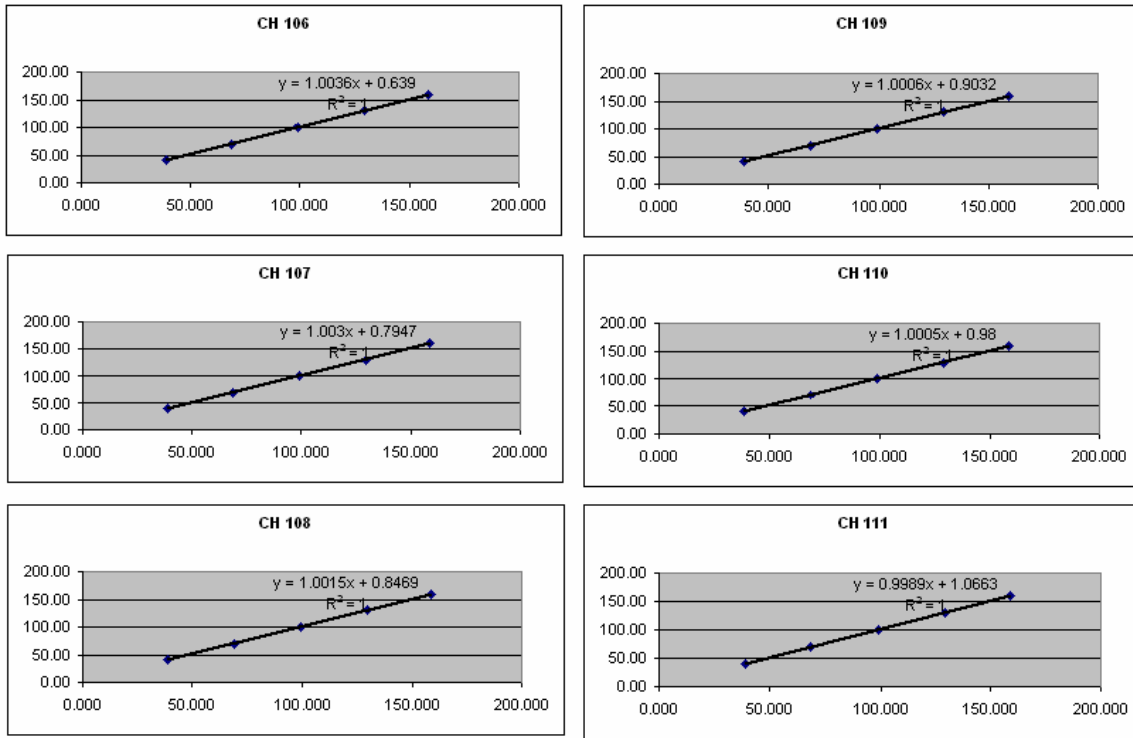


Figura E.3 Curvas de Calibración de los termopares del receptor.

En la figura E.3 se pueden observar las curvas de calibración de los seis termopares colocados en la superficie del receptor. En la figura E.4 se encuentran las curvas de calibración para los termopares que miden la temperatura del agua a la entrada (canal 113) y a la salida (canal 112) del receptor.

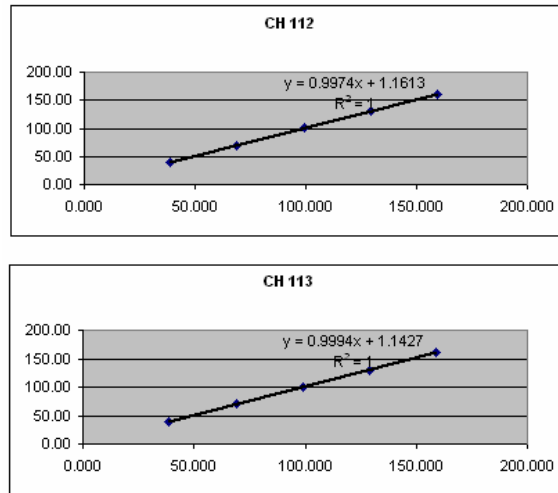


Figura E.4 Curvas de calibración de los termopares en la entrada y la salida de agua del receptor.

## E.2 Calibración de los Sensores de Presión.

En la calibración de los sensores de presión se usó como patrón de referencia otro sensor de presión (calibrado). El equipo de calibración fue prestado por el laboratorio de refrigeración solar. El procedimiento se describe en los pasos siguientes.

1. Primero se colocaron los sensores a ser calibrados en los conectores de la tubería.
2. Se hicieron las conexiones de los sensores de presión al adquisidor de datos y de este hacia la computadora.
3. Una vez listo el sistema adquisidor de datos se inicio con una presión de 0 bars y se tomó un numero de 35 lecturas, después se incremento la presión a 1 bar abriendo una válvula conectada a un tanque presurizado conteniendo nitrógeno y se repitió el procedimiento. Así se repitieron las lecturas en incrementos de 1 bar hasta llegar a 6 bars.

En la figura E.5 se pueden observar las curvas de calibración de los sensores de presión. La gráfica de la parte superior corresponde al sensor de 0 a 100 psi que fue asignado para medir la presión en la entrada del receptor. La gráfica inferior corresponde al sensor de 0 a 500 psi asignado para medir la presión en la salida del receptor.

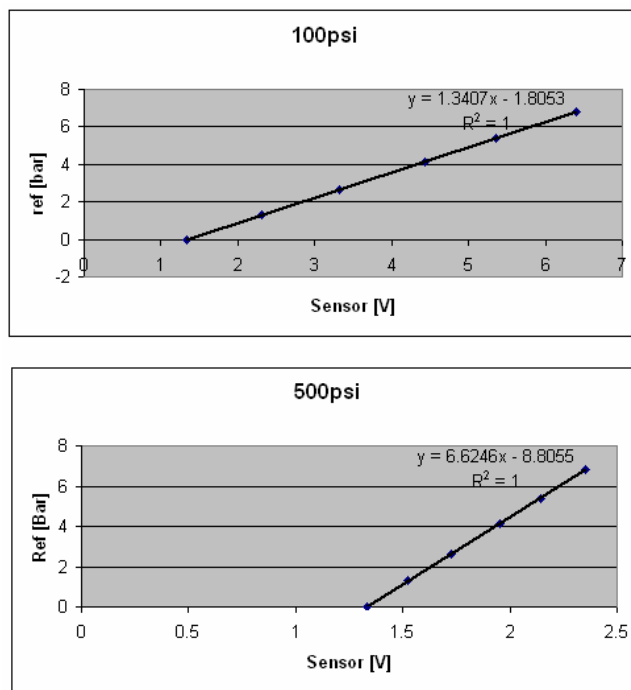


Figura E.5. Curvas de calibración de los sensores de presión.

## REFERENCIAS

- Ashrae Standard (1997), Methods of testing to determine thermal performance of solar collectors, Two phase flow, ANSI ASHRAE, 93-1986.
- Duffie J. A., Beckman W. A., (1991), Solar Engineering of Thermal Processes. USA: John Wiley & Sons, pp. 13 -21.
- Gordon Jeffrey, (2001), Solar Energy The State of the Art ISES Position Papers. International Solar Energy Society, United Kingdom.
- Goswami D. Y., Kreith F., Kreider J. F., (2000), Principles of Solar Engineering. Philadelphia: Taylor and Francis, pp. 102-105.
- Jiménez M. R., Hernández F. Dorantes R., (1997), Construcción de un Concentrador Solar a Partir de Una Antena Parabólica. Memorias de la XXI Semana Nacional de Energía Solar, pp 433-438. Gobierno de Chihuahua-ANES, Chihuahua, México.
- Kalogirou S. A., (2004), Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science 30, pp. 231–295.
- Kaushika N. D., and Reddy K. S. (2000), Performance of a low cost solar paraboloidal dish steam generating system, Energy Conversion and Management 41, pp. 713-726.
- Kreith F, Kreider JF, (1978), Principles of solar engineering. New York: McGraw-Hill.
- Estrada C. A., Arancibia C. A. y Hernandez N., (2000), Determinación de la Geometría y Dimensiones Óptimas de un Receptor para un Concentrador Solar Paraboloidal con Ángulo de Apertura de 90°. Proceedings of the ISES Millennium Solar Forum 2000, Cd. de Mexico, Mexico, pp. 227-231.
- Quiñones J. J., Ortega J., Campos J. y Estrada C. A., (2005), Sistema de Control para una Montura de Tipo Azimutal, XXIX Semana Nacional de Energía Solar, Chiapas, México.
- Rojas A. (2006) Diseño Mecánico de una Estructura Tipo Ecuatorial y Caracterización Térmica del Receptor de un Concentrador Solar de Foco Puntual con Ángulo de apertura de 90°. Tesis Doctoral, Centro de Investigación en Energía UNAM, Temixco, Morelos.
- Tecpoyotl M., Campos J., Téllez F., Sánchez J., (2006), Parabolic Solar Concentrator. SPIE Vol. 6330, 63300H, Nonlinear Optical Transmission and Multiphoton Processes in Organics IV; A. Todd Yeates, Kevin D. Belfield, Francois Kajzar; Eds.
- Tyagi S. K., Wang S., Shingal M.K., Kaushik S. C., Park S. R., (2006), Exergy Analysis and Parametric Study of Concentrating Type Solar Collectors, International Journal of Thermal Sciences 46, pp 1304–1310.
- [http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA\\_630\\_termosolar](http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_630_termosolar)