



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA**

**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°**

**T E S I S**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN INGENIERÍA**

**ENERGÍA- SOLAR FOTOTÉRMICA**

**P R E S E N T A:**

**M.C. ARMANDO ROJAS MORÍN**

**TUTOR:**

**DR. CLAUDIO ALEJANDRO ESTRADA GASCA**



2006



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. JAIME GONZALO CERVANTES DE GORTARI.  
Secretario: DR. CLAUDIO ALEJANDRO ESTRADA GASCA.  
1<sup>er</sup>. Vocal: DR. ROBERTO BEST Y BROWN.  
2<sup>do</sup>. Vocal: DR. WILFRIDO RIVERA GÓMEZ-FRANCO.  
3<sup>er</sup>. Vocal: DRA. GABRIELA ÁLVAREZ GARCÍA.  
1<sup>er</sup>. Suplente: DR. ALFONSO GARCÍA GUTIÉRREZ.  
2<sup>do</sup>. Suplente: DR. CAMILO ARANCIBIA BULNES.

Lugar donde se realizó la tesis:

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA DE LA UNAM,  
TEMIXCO, MORELOS.**

**TUTOR DE TESIS**

DR. CLAUDIO ALEJANDRO ESTRADA GASCA

---

**FIRMA**

# Dedicatorias

## **A Dios**

Gracias señor Dios mío, por permitirme llegar y culminar esta importante meta de mi vida, para tí no hay imposibles. Gracias señor, porque siempre me has acompañado y protegido: en la carretera, en el CIE, en la casa, en todas partes. Te bendigo, te alabo y te doy gracias, eres y serás siempre lo más maravilloso que hay en el universo.

## **A mis padres: Octavio y Victorina**

Porque siempre pienso en ustedes, porque siempre oran por nosotros, porque para nosotros siempre han sido un ejemplo de honestidad, lucha, trabajo, sacrificio, amor. Porque simple y sencillamente me dieron la vida, la educación, la oportunidad de ser útil a mi país. Los amo.

## **A mi adorada esposa: Yodudú**

Porque eres el amor de mi vida, porque siempre me das ánimo, porque siempre me honras, porque tú sabes todo este sacrificio mutuo para seguir adelante con nuestro proyecto familiar. Porque siempre me das lo mejor de tu vida sin pedirme nada a cambio. Yodudú lo hemos logrado, te amo por siempre.

**A mis hermanos:  
Octavio y Adolfo**

Por todo su ejemplo, amistad sincera y hermandad. Porque siempre han estado dispuestos a ayudarnos y estar con nosotros en las buenas y en las malas. Porque siempre sigamos unidos para enfrentar lo que la vida nos depare.

**A una bonita y gran familia:  
Vanessa (Vane), Victoria y Alfredo**

Porque también son un gran ejemplo a seguir para nosotros, porque tienen una beba a la cual queremos mucho y eso nos anima a seguir adelante, porque confían en nosotros, porque siempre nos ayudan cuando se los pedimos, porque somos familia. Porque siempre nos ayudemos mutuamente.

**A mis suegros:  
Yolanda y Margarito**

Porque me han dado la confianza y la oportunidad de ser parte de sus familias, los respeto, admiro y quiero.

## **Agradecimientos**

**A mi director de tesis:**

**Dr. Claudio A. Estrada Gasca**

Gracias por su apoyo, enseñanza, paciencia, ejemplo, regaños y tiempo. Por brindarme la oportunidad de ser un nuevo investigador en nuestro país, al que tanta falta le hace.

**A mi Comité Tutorial:**

**Dr. Claudio A. Estrada Gasca,**

**Dra. Gabriela Álvarez García,**

**Dr. Jaime Cervantes de Gortari**

**Dr. Roberto Best y Brown,**

**Dr. Wilifrido Rivera Gómez-Franco,**

**Dr. Alfonso García Gutiérrez y**

**Dr. Camilo Arancibia Bulnes**

Gracias por ayudarme, apoyarme e impulsarme en esta meta, los admiro.

**Al Dr. Rubén Dorantes Rodríguez**

Por todo su apoyo, ayuda, asesoría, consejos y demás, en la planeación y realización de las pruebas experimentales al COSPAA-90-I, así como en el ánimo para seguir adelante.

**Al Coordinador del Posgrado en Ingeniería:  
Dr. Wilifrido Rivera Gómez-Franco  
Al Coordinador de Docencia del CIE:  
Dr. Edgar Santoyo Gutiérrez**

Gracias por todo el apoyo y la atención que siempre me dieron, son excelentes coordinadores.

**A la Coordinación de Concentración Solar del CIE:  
Dr. Claudio A. Estrada Gasca,  
Dr. Camilo Arancibia Bulnes,  
Dr. Oscar Jaramillo Salgado,  
Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar**

Gracias por ayudarme siempre en el desarrollo del trabajo doctoral.

**A mi colega y amigo:  
Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar**

Gracias por todo tu apoyo y ayuda para poder realizar la adquisición de los materiales, por tus aportaciones en el diseño y el armado del COSPAA-90-II. También en la realización de la instrumentación del COSPAA-90-I y de las pruebas experimentales. Gracias por tu amistad.

**Al M.C. Gildardo Casarrubias Segura, del Departamento de Materiales Solares del CIE**

Por la ayuda en la realización de mi trabajo doctoral.

### **Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**

Por proporcionarme una importante beca y poder realizar así mis estudios de doctorado.

### **A la Facultad de Ingeniería de la UNAM**

Por apoyarme para tal propósito, esperando que este grado académico coadyuve en el gran y noble esfuerzo que la Facultad hace día con día en la formación de excelentes ingenieros.

### **A mis amigos y colegas:**

**Ing. Felix Núñez Orozco,**

**M.I. Felipe Muñoz Gutiérrez,**

**Ing. Agustín Hernández Quintero,**

**Ing. Genaro Muñoz Hernández**

Todos ellos de la Coordinación de Termodinámica de la F.I. UNAM, por toda su ayuda al respecto.

## Agradecimientos especiales

Al Dr. Jorge Hernández G. y al Ing. Víctor Hugo Gómez Espinoza del Departamento de Refrigeración y Bombas de Calor, por toda la ayuda proporcionada para calibrar los instrumentos de medición.

A las personas que hicieron posible la fabricación y la construcción del COSPAA-90-II: Ing. José Jaime Villalobos Gómez; Jefe del Taller Mecánico del CIE, Sr. Gregorio Hernández Uribe, Sr. Javier Ayala Flores, Sr. Esteban Luna Morales y Sr. Simón Ortiz Juárez.

A la Srita. Maribel Fernández Pérez y la Sra. Ma. de Lourdes Calderón Medina secretarias de la Dirección y del Departamento de Sistemas Energéticos, respectivamente. Por toda su gran e importante ayuda.

Al M.C. José Luis Gordillo Ruiz, Jefe del Departamento de Supercómputo de la DGSCA, UNAM, por todas las facilidades proporcionadas para la realización de esta tesis.

Al Ing. Héctor Yuen por su asesoría en la programación del modelo matemático.

A la Dra. Zenaida Peralta S. por su apoyo y comentarios en la traducción del resumen.

# Índice general

Índice general	I
Lista de figuras	III
Lista de tablas	VII
Nomenclatura	VIII
Resumen	XVI
Abstract	XVIII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Energía y problemas de contaminación por gases de efecto invernadero	1
1.2. Energía en México y necesidades de calor de proceso industrial . . . . .	4
1.3. Tecnologías solares que pueden satisfacer las necesidades de calor de proceso industrial . . . . .	7
1.4. Trabajos relacionados con la producción de calor de proceso por medio de concentradores solares de disco parabólico . . . . .	19
1.5. Objetivos del trabajo . . . . .	26
<b>2. Diseño mecánico de la estructura del COSPAA-90-II</b>	<b>28</b>
2.1. Tipos de monturas para concentradores solares de disco parabólico . .	28
2.2. Descripción de la Montura Ecuatorial Tipo Andamio Colgante (METAC) . . . . .	29
2.3. Metodología para el diseño mecánico . . . . .	32
2.4. Dimensionamiento de los elementos de la estructura . . . . .	58
2.5. Diseño mecánico de la estructura . . . . .	66

<b>3. Modelo matemático del receptor</b>	<b>86</b>
3.1. Descripción del problema . . . . .	86
3.2. Planteamiento del modelo matemático . . . . .	86
<b>4. Instrumentación, diseño y metodología experimental</b>	<b>93</b>
4.1. Instrumentación y descripción del circuito de circulación del sistema concentrador-receptor . . . . .	93
4.2. Instrumentación de los receptores cónicos . . . . .	100
4.3. Diseño de los experimentos . . . . .	109
4.4. Metodología experimental . . . . .	111
<b>5. Análisis de resultados</b>	<b>115</b>
5.1. Experimento 1. Determinación de la reflectancia del concentrador . .	115
5.2. Experimento 2. Pruebas de repetitividad en los procesos de calenta- miento y enfriamiento del sistema concentrador-receptor . . . . .	120
5.3. Experimento 3. Pruebas de variación de temperatura a la entrada del receptor . . . . .	143
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>151</b>
<b>Apéndice A</b>	<b>156</b>

# Lista de figuras

1.1. Celda solar. . . . .	8
1.2. Clasificación de Colectores Solares. . . . .	11
1.3. Plataforma solar de Almería. . . . .	12
1.4. Concentrador solar de disco parabólico multifaceta. . . . .	13
1.5. Planta Solar II-UNAM. . . . .	14
1.6. Discos parabólicos. Plataforma Solar de Almería, España. . . . .	16
1.7. Gran disco Solar. Universidad Nacional Australiana. . . . .	16
1.8. Fotografía del COSPAA-90-I; los números corresponden a la tabla 1.6. . . . .	23
1.9. Fotografía del receptor cónico. . . . .	25
1.10. Descripción del receptor cónico. . . . .	25
2.1. Vistas ortogonales de la METAC. . . . .	30
2.2. Vista de lado de la METAC. . . . .	31
2.3. Fotografía de la maqueta de la estructura. . . . .	32
2.4. Posiciones que toma la METAC, con respecto al eje polar. . . . .	34
2.5. DCL en el disco y en las chumaceras de soporte, nodos $B_1$ y $B_2$ . . . . .	35
2.6. Diagrama de Cuerpo Libre de la METAC. . . . .	40
2.7. Coordenadas de cada nodo de la METAC. . . . .	42
2.8. Elementos de la METAC. . . . .	50
2.9. Diagrama de cuerpo libre en el elemento $\overline{EF}$ debido a las fuerzas del nodo $E$ , $D$ y punto $F$ . . . . .	61
2.10. DCL del acoplamiento del nodo $A$ a la chumacera de empuje. . . . .	62
2.11. DCL del acoplamiento del punto $F$ con la chumacera de giro. . . . .	63
2.12. Flecha que unirá y soportará el nodo $B_1$ al disco, mismo caso para $B_2$ al disco. . . . .	65
2.13. Calculo de los diámetros mínimos requeridos en cada elemento. . . . .	67
2.14. Cálculo de los esfuerzos normales en cada elemento de la METAC. . . . .	68

---

2.15. COSPAA-90-II. . . . .	71
2.16. Base de la estructura móvil. . . . .	72
2.17. Soporte $A$ . . . . .	73
2.18. Poste tensado. . . . .	74
2.19. Soporte $F$ . . . . .	75
2.20. Nudo $A$ . . . . .	76
2.21. Nodos $B_1$ y $B_2$ . . . . .	77
2.22. Nudo $C$ . . . . .	78
2.23. Nudo $D$ . . . . .	79
2.24. Nudo $E$ . . . . .	80
2.25. Tubos cuadrados. . . . .	81
2.26. Colocación de placas. . . . .	82
2.27. Colocación del soporte del nudo $A$ . . . . .	82
2.28. Poste tensado. . . . .	83
2.29. Ensamble del nudo $B_1$ . . . . .	83
2.30. Nodos ensamblados. . . . .	84
2.31. Soporte del concentrador ensamblado. . . . .	84
2.32. Vista frontal de la estructura. . . . .	85
2.33. Vista superior de la estructura. . . . .	85
3.1. Balance de energía en el receptor cónico con flujo de agua. . . . .	87
3.2. Curva característica del modelo matemático. . . . .	92
4.1. Diagrama de instrumentación del circuito hidráulico. . . . .	94
4.2. Fotografía de la Bomba y filtro. . . . .	96
4.3. Fotografía del Bypass. . . . .	96
4.4. Fotografía del Sistema Adquisidor de Datos (SAD). . . . .	98
4.5. Fotografía del precalentador. . . . .	98
4.6. Esquema descriptivo del precalentador. . . . .	99
4.7. Fotografía del pirheliómetro utilizado en la experimentación. . . . .	100
4.8. Fotografía del receptor cónico sin remoción de calor. . . . .	101
4.9. Dimensiones del receptor de cobre, acot. en $mm$ . . . . .	102
4.10. Fotografía del proceso de calibración de los termopares. . . . .	103
4.11. Distribución de los termopares en el receptor de cobre. . . . .	103
4.12. Fotografía del equipo utilizado en la calibración de los transductores de presión. . . . .	105
4.13. Fotografía del sistema de calibración de los transductores de presión. . . . .	105
4.14. Seccionamiento del área del receptor. . . . .	107

---

---

4.15. Fotografía del acercamiento de la vista de instrumentación del receptor.	108
4.16. Fotografía de la vista de la instrumentación del receptor montado en el concentrador. . . . .	108
5.1. Prueba 1. Evolución de la temperatura de los termopares en la superficie del receptor. . . . .	116
5.2. Prueba 1. Evolución de la temperatura promedio en la superficie del receptor. . . . .	116
5.3. Prueba 2. Evolución de la temperatura de los termopares en la superficie del receptor. . . . .	117
5.4. Prueba 2. Evolución de la temperatura promedio en la superficie del receptor. . . . .	118
5.5. Prueba 3. Evolución de la temperatura de los termopares en la superficie del receptor. . . . .	118
5.6. Prueba 3. Evolución de la temperatura promedio en la superficie del receptor. . . . .	119
5.7. Temperaturas en la superficie del receptor, $\dot{V} = 4$ [l/min]. . . . .	121
5.8. Temperatura promedio en la superficie del receptor, $\dot{V} = 4$ [l/min]. . . . .	122
5.9. Temperatura de entrada y salida en el receptor, $\dot{V} = 4$ [l/min]. . . . .	123
5.10. Presión de entrada y salida en el receptor, $\dot{V} = 4$ [l/min]. . . . .	123
5.11. Temperatura promedio experimental y temperatura teórica en la superficie del receptor, $\dot{V} = 4$ [l/min]. . . . .	125
5.12. Temperaturas en la superficie del receptor $\dot{V} = 3$ [l/min]. . . . .	125
5.13. Temperatura promedio en la superficie del receptor $\dot{V} = 3$ [l/min]. . . . .	126
5.14. Temperatura de entrada y de salida en el receptor, $\dot{V} = 3$ [l/min]. . . . .	127
5.15. Presión de entrada y salida en el receptor, $\dot{V} = 3$ [l/min]. . . . .	127
5.16. Ajuste lineal de la temperatura de salida con respecto a la temperatura promedio en la superficie del receptor, $\dot{V} = 3$ [l/min]. . . . .	128
5.17. Temperatura promedio experimental y temperatura teórica en la superficie del receptor, $\dot{V} = 3$ [l/min]. . . . .	129
5.18. Temperaturas en la superficie del receptor, $\dot{V} = 2$ [l/min]. . . . .	130
5.19. Temperatura promedio en la superficie del receptor, $\dot{V} = 2$ [l/min]. . . . .	131
5.20. Temperatura de entrada y salida en el receptor, $\dot{V} = 2$ [l/min]. . . . .	131
5.21. Presión de entrada y salida en el receptor, $\dot{V} = 2$ [l/min]. . . . .	132
5.22. Temperatura promedio experimental y temperatura teórica en la superficie del receptor, $\dot{V} = 2$ [l/min]. . . . .	133
5.23. Temperaturas en la superficie del receptor, $\dot{V} = 1$ [l/min]. . . . .	134

---

5.24. Temperatura promedio en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 1$  [l/min]. . . 135

5.25. Temperatura de entrada y salida en el receptor,  $\dot{V} = 1$  [l/min]. . . . . 135

5.26. Presión de entrada y salida en el receptor,  $\dot{V} = 1$  [l/min]. . . . . 136

5.27. Temperatura promedio experimental y temperatura teórica en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 1$  [l/min]. . . . . 137

5.28. Temperaturas de termopares en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min]. . . . . 138

5.29. Temperaturas promedio en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min]. 139

5.30. Temperatura de entrada y de salida en el receptor,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min]. . . 139

5.31. Presión a la entrada y a la salida del receptor,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min]. . . . 140

5.32. Producción de vapor, secuencia 1,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min]. . . . . 141

5.33. Producción de vapor, secuencia 2,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min]. . . . . 141

5.34. Producción de vapor, secuencia 3,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min]. . . . . 141

5.35. Producción de vapor, secuencia 4,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min]. . . . . 142

5.36. Temperaturas en la superficie del receptor. . . . . 143

5.37. Temperatura promedio en la superficie del receptor. . . . . 144

5.38. Temperatura ambiente, de entrada y salida en el receptor. . . . . 145

5.39. Curvas de eficiencia térmica para los flujos volumétricos estudiados, estado permanente. . . . . 148

5.40. Coeficiente global de pérdidas de calor, estado permanente. . . . . 149

# Lista de tablas

1.1.	Características de los generadores de vapor convencionales. . . . .	5
1.2.	Consumo de energía en México (petajoules) por actividad industrial, 2000 a 2003. . . . .	6
1.3.	Características de los principales sistemas de disco parabólico. . . . .	17
1.4.	Características del concentrador. . . . .	18
1.5.	Características del receptor. . . . .	18
1.6.	Componentes del sistema COSPAA-90-I. . . . .	22
1.7.	Características del concentrador solar. . . . .	24
1.8.	Características del receptor cónico. . . . .	24
2.1.	Dimensiones del COSPAA-90-II. . . . .	32
2.2.	Esfuerzo de deformación plástica de aceros estructurales. . . . .	60
2.3.	Material: Tubo industrial calibre 16 ( $\varepsilon = 1.65 \text{ mm}$ ) Cold rolled. . . . .	69
2.4.	Material: Tubo mecánico cédula 30. Acero AISI 1518. . . . .	69
2.5.	Material: PTR calibre 14 ( $\varepsilon = 1.89 \text{ mm}$ ) acero al carbón 1018. . . . .	70
4.1.	Lista de componentes del diagrama de instrumentación del circuito hidráulico. . . . .	95
5.1.	Resultados de la reflectancia del concentrador. . . . .	119
5.2.	Resultados obtenidos del ajuste del modelo matemático para los diferentes flujos estudiados. . . . .	142
5.3.	Puntos seleccionados, $\dot{V} = 5 \text{ l/min.}$ . . . . .	146
5.4.	Puntos seleccionados, $\dot{V} = 4 \text{ l/min.}$ . . . . .	146
5.5.	Puntos seleccionados, $\dot{V} = 3 \text{ l/min.}$ . . . . .	146
5.6.	Puntos seleccionados, $\dot{V} = 1 \text{ l/min.}$ . . . . .	147
5.7.	Ecuaciones de eficiencia térmica del receptor. . . . .	147

# Nomenclatura

$A$	Parámetro libre de ajuste, $[s^{-1}]$
$a$	Pendiente de la recta de ajuste
$A_c$	Area del concentrador, $[m^2]$
$A_r$	Superficie de calentamiento en el receptor $[m^2]$
$B$	Parámetro libre de ajuste, $[^{\circ}C]$
$b$	Ordenada al origen de la recta de ajuste, $[^{\circ}C]$
$b_0$	Ordenada al origen de la ecuación de calibración del medidor de flujo, $[\frac{l}{\text{mín}}]$
$C_{pH_2O}$	Calor específico a presión constante del agua, $[\frac{kJ}{kg^{\circ}C}]$
$C_{pr}$	Calor específico a presión constante del receptor, $[\frac{kJ}{kg^{\circ}C}]$
$C_1$	Constante de integración
$G_b$	Radiación directa, $[\frac{W}{m^2}]$
$m$	Pendiente de la ecuación de calibración del medidor de flujo, $[\frac{l}{\text{mín Volts}}]$
$m_r$	Masa del receptor $[kg]$
$m_{H_2O}$	Gasto másico del agua que fluye a través del receptor $[\frac{kg}{s}]$
$P$	Presión convertida en los transductores de presión, $[Psi]$
$Q_{abs}$	Potencia térmica absorbida por el receptor, $[kW]$
$Q_p$	Pérdidas de calor al ambiente, $[kW]$
$Q_{sal}$	Potencia térmica que sale y que se almacena en el receptor, $[kW]$
$Q_u$	Calor útil, $[kW]$
$T$	Temperatura promedio en la superficie del receptor, $[^{\circ}C]$
$T_a$	Temperatura ambiente, $[^{\circ}C]$
$T_e$	Temperatura del agua a la entrada del receptor, $[^{\circ}C]$
$T_i$	Temperatura promedio inicial en la superficie del receptor de cobre, $[^{\circ}C]$

$T_f$	Temperatura promedio en la superficie del receptor de cobre después de un intervalo de tiempo, [ $^{\circ}C$ ]
$T_r$	Temperatura promedio en la superficie del receptor de cobre, [ $^{\circ}C$ ]
$T_s$	Temperatura del agua en la salida del receptor, [ $^{\circ}C$ ]
$t$	Tiempo, [ $s$ ]
$t_i$	Tiempo inicial del experimento 1, [ $s$ ]
$t_f$	Tiempo después de un intervalo de tiempo, [ $s$ ]
$T_0$	Temperatura inicial en el receptor, [ $^{\circ}C$ ]
$U_g$	Coeficiente global de pérdidas de calor en el receptor, [ $\frac{kW}{m^2^{\circ}C}$ ]
$V$	Gasto volumétrico, [ $\frac{l}{\text{mín}}$ ]
$V_f$	Voltaje registrado en el medidor de flujo, [ $Volts$ ]
$V_{TP}$	Voltaje registrado en los transductores de presión, [ $Volts$ ]
$\frac{dT}{dt}$	Variación de la temperatura promedio en el receptor con respecto al tiempo, [ $\frac{^{\circ}C}{s}$ ]
$\alpha_r$	Absortancia de la pintura de recubrimiento del receptor
$\delta P_1$	Incertidumbre del transductor de presión de entrada, [ $psi$ ]
$\delta P_2$	Incertidumbre del transductor de presión de salida, [ $psi$ ]
$\delta \dot{V}$	Incertidumbre del flujo volumétrico, [ $l \text{ mín}$ ]
$\rho_c$	Reflectancia del concentrador
$\overline{\rho_c}$	Reflectancia promedio del concentrador

### Coordenadas de los nodos

$B_{1x}$	Coordenada $x$ del nodo $B_1$ , [ $m$ ]
$B_{1z}$	Coordenada $z$ del nodo $B_1$ , [ $m$ ]
$B_{2x}$	Coordenada $x$ del nodo $B_2$ , [ $m$ ]
$B_{2z}$	Coordenada $z$ del nodo $B_2$ , [ $m$ ]
$C_x$	Coordenada $x$ del nodo $C$ , [ $m$ ]
$C_y$	Coordenada $y$ del nodo $C$ , [ $m$ ]
$D_x$	Coordenada $x$ del nodo $D$ , [ $m$ ]
$D_y$	Coordenada $y$ del nodo $D$ , [ $m$ ]
$E_x$	Coordenada $x$ del nodo $E$ , [ $m$ ]
$E_y$	Coordenada $y$ del nodo $E$ , [ $m$ ]

---

**Dimensiones**

$AC$	Longitud del elemento $AC$ , $[m]$
$AB$	Longitud de los elementos $AB$ , $[m]$
$ACH$	Longitud de la flecha, $[m]$
$A_a$	Area de la sección transversal del elemento $EF$ , $[m^2]$
$A_P$	Area de la sección transversal del perno de sujeción, $[m^2]$
$A_T$	Area de la sección transversal, $[m^2]$
$BD$	Longitud de los elementos $BD$ , $[m]$
$BE$	Longitud de los elementos $BE$ , $[m]$
$B_1B_2$	Longitud de las flechas de los nodos $B_1$ y $B_2$ , $[m]$
$B_1Disco$	Longitud del elemento $B_1B_2$ , $[m]$
$c$	Radio de flecha, $[m]$
$c_{B_1D}$	Radio de las flechas en los nodos $B_1$ y $B_2$ , $[m]$
$CB$	Longitud de los elementos $CB$ , $[m]$
$CD$	Longitud del elemento $CD$ , $[m]$
$\overline{DF}$	Distancia desde el nodo $D$ hasta el punto $F$ , $[m]$
$\overline{EF}$	Distancia desde el nodo $E$ hasta el punto $F$ , $[m]$
$FCH$	Longitud de la flecha $F$ , $[m]$
$FR$	Relación del porcentaje del espesor de la pared del tubo con respecto al diámetro medio del tubo
$I$	Momento de inercia, $[m^4]$
$I_{fa}$	Momento de inercia de la flecha en el nodo $A$ , $[m^4]$
$I_{B_1D}$	Momento de inercia de la flecha en el nodo $B_1$ , $[m^4]$
$L$	Longitud de cada elemento, $[m]$
$m_t$	Masa de cada elemento de la estructura, $[kg]$
$S_s$	Módulo de sección mínimo requerido en el elemento $DF$ , $[m^3]$
$x_{Acd}$	Distancia desde el eje de declinación al nodo $A$ , $[m]$
$x_{Fcd}$	Distancia desde el eje de declinación al punto $F$ , $[m]$
$z'_{cd}$	Distancia desde el eje polar al nodo $B_1$ o $B_2$ , $[m]$
$\epsilon$	Espesor de pared del tubo, $[mm]$
$\theta'$	Angulo complementario de rotación
$\phi_{B_1Disco}$	Diámetro propuesto para las flechas en los nodos $B_1$ y $B_2$ , $[m]$
$\phi_e$	Diámetro seleccionado para cada elemento de la estructura, $[m]$
$\phi_m$	Diámetro medio del tubo, $[m]$

## Vectores de posición

$\overrightarrow{AB_1}$	Vector de posición del nodo $A$ al nodo $B_1$
$\overrightarrow{AB_2}$	Vector de posición del nodo $A$ al nodo $B_2$
$\overrightarrow{AC}$	Vector de posición del nodo $A$ al nodo $C$
$\overrightarrow{B_1A}$	Vector de posición del nodo $B_1$ al nodo $A$
$\overrightarrow{B_1B_2}$	Vector de posición del nodo $B_1$ al nodo $B_2$
$\overrightarrow{B_1C}$	Vector de posición del nodo $B_1$ al nodo $C$
$\overrightarrow{B_1D}$	Vector de posición del nodo $B_1$ al nodo $D$
$\overrightarrow{B_1E}$	Vector de posición del nodo $B_1$ al nodo $E$
$\overrightarrow{B_2A}$	Vector de posición del nodo $B_2$ al nodo $A$
$\overrightarrow{B_2B_1}$	Vector de posición del nodo $B_2$ al nodo $B_1$
$\overrightarrow{B_2C}$	Vector de posición del nodo $B_2$ al nodo $C$
$\overrightarrow{B_2D}$	Vector de posición del nodo $B_2$ al nodo $D$
$\overrightarrow{B_2E}$	Vector de posición del nodo $B_2$ al nodo $E$
$\overrightarrow{CA}$	Vector de posición del nodo $C$ al nodo $A$
$\overrightarrow{CB_1}$	Vector de posición del nodo $C$ al nodo $B_1$
$\overrightarrow{CB_2}$	Vector de posición del nodo $C$ al nodo $B_2$
$\overrightarrow{CD}$	Vector de posición del nodo $C$ al nodo $D$

## Componentes de los vectores

$AB_{1,x}$	Componente $\hat{i}$ del vector de posición $\overrightarrow{AB_1}$
$AB_{1,z}$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{AB_1}$
$AB_{2,x}$	Componente $\hat{i}$ del vector de posición $\overrightarrow{AB_2}$
$AB_{2,z}$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{AB_2}$
$AC,x$	Componente $\hat{i}$ del vector de posición $\overrightarrow{AC}$
$AC,y$	Componente $\hat{j}$ del vector de posición $\overrightarrow{AC}$
$B_1A,x$	Componente $\hat{i}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_1A}$
$B_1A,z$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_1A}$
$B_1C,y$	Componente $\hat{j}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_1C}$
$B_1C,z$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_1C}$

---

$B_1D, x$	Componente $\hat{i}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_1D}$
$B_1D, y$	Componente $\hat{j}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_1D}$
$B_1D, z$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_1D}$
$B_1E, x$	Componente $\hat{i}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_1E}$
$B_1E, y$	Componente $\hat{j}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_1E}$
$B_1E, z$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_1E}$
$B_2A, x$	Componente $\hat{i}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_2A}$
$B_2A, z$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_2A}$
$B_2C, y$	Componente $\hat{j}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_2C}$
$B_2C, z$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_2C}$
$B_2D, x$	Componente $\hat{i}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_2D}$
$B_2D, y$	Componente $\hat{j}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_2D}$
$B_2D, z$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_2D}$
$B_2E, x$	Componente $\hat{i}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_2E}$
$B_2E, y$	Componente $\hat{j}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_2E}$
$B_2E, z$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{B_2E}$
$CA, x$	Componente $\hat{i}$ del vector de posición $\overrightarrow{CA}$
$CA, y$	Componente $\hat{j}$ del vector de posición $\overrightarrow{CA}$
$CB_1, y$	Componente $\hat{j}$ del vector de posición $\overrightarrow{CB_1}$
$CB_1, z$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{CB_1}$
$CB_2, y$	Componente $\hat{j}$ del vector de posición $\overrightarrow{CB_2}$
$CB_2, z$	Componente $\hat{k}$ del vector de posición $\overrightarrow{CB_2}$
$CD, x$	Componente $\hat{i}$ del vector de posición $\overrightarrow{CD}$
$CD, y$	Componente $\hat{j}$ del vector de posición $\overrightarrow{CD}$

---

## Fuerzas y reacciones

$A$	Fuerza de arrastre del viento, $[N]$
$A_{y'}$	Componente de la fuerza de arrastre en la dirección $y'$ , $[N]$
$A_{z'}$	Componente de la fuerza de arrastre en la dirección $z'$ , $[N]$
$A_x$	Reacción en la chumacera del nodo $A$ , dirección $x$ , $[N]$
$A_y$	Reacción en la chumacera del nodo $A$ , dirección $y$ , $[N]$
$A_z$	Reacción en la chumacera del nodo $A$ , dirección $z$ , $[N]$
$\overrightarrow{A_y}$	Vector de fuerza de la reacción $A_y$
$\overrightarrow{A_z}$	Vector de fuerza de la reacción $A_z$
$B_{1x}$	Módulo de la fuerza en la chumacera del nodo $B_1$ , dirección $x$ , $[N]$
$\overrightarrow{B_{1y}}$	Vector de fuerza de la reacción $B_{1y}$
$B_{1y}$	Módulo de la fuerza en la chumacera del nodo $B_1$ , dirección $y$ , $[N]$
$\overrightarrow{B_{1z}}$	Vector de fuerza de la reacción $B_{1z}$
$B_{1z}$	Módulo de la fuerza en la chumacera del nodo $B_1$ , dirección $z$ , $[N]$
$B_{2x}$	Módulo de la fuerza en la chumacera del nodo $B_2$ , dirección $x$ , $[N]$
$\overrightarrow{B_{2y}}$	Vector de fuerza de la reacción $B_{2y}$
$B_{2y}$	Módulo de la fuerza en la chumacera del nodo $B_2$ , dirección $y$
$\overrightarrow{B_{2z}}$	Vector de fuerza de la reacción $B_{2z}$
$B_{2z}$	Módulo de la fuerza en la chumacera del nodo $B_2$ , dirección $z$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{AB_1}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $A$ al nodo $B_1$
$F_{AB_1}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $AB_1$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{AB_2}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $A$ al nodo $B_2$
$F_{AB_2}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $AB_2$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{AC}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $A$ al nodo $C$
$F_{AC}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $AC$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{B_1A}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $B_1$ al nodo $A$
$\overrightarrow{F_{B_1B_2}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $B_1$ al nodo $B_2$
$F_{B_1B_2}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $B_1B_2$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{B_1C}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $B_1$ al nodo $C$
$\overrightarrow{F_{B_1D}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $B_1$ al nodo $D$
$F_{B_1D}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $B_1D$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{B_1E}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $B_1$ al nodo $E$
$F_{B_1E}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $B_1E$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{B_2A}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $B_2$ al nodo $A$

---

$\overrightarrow{F_{B_2B_1}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $B_2$ al nodo $B_1$
$F_{B_2B_1}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $B_2B_1$
$\overrightarrow{F_{B_2C}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $B_2$ al nodo $C$
$F_{B_2C}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $B_2C$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{B_2D}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $B_2$ al nodo $D$
$F_{B_2D}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $B_2D$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{B_2E}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $B_2$ al nodo $E$
$F_{B_2E}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $B_1E$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{CA}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $C$ al nodo $A$
$F_{CA}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $CA$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{CB_1}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $C$ al nodo $B_1$
$F_{CB_1}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $CB_1$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{CB_2}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $C$ al nodo $B_2$
$F_{CB_2}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $CB_2$
$\overrightarrow{F_{CD}}$	Vector de la fuerza axial del nodo $C$ al nodo $D$
$F_{CD}$	Módulo de la fuerza axial en el elemento $CD$ , $[N]$
$\overrightarrow{F_{RD}}$	Fuerza resultante en el nodo $D$
$ F_{RD} $	Módulo de la fuerza resultante en el nodo $D$ , $[N]$
$ F_{RE} $	Módulo de la fuerza resultante en el nodo $E$ , $[N]$
$F_{Pt}$	Módulo de la fuerza axial a la cual se somete cada elemento de la estructura
$F_y$	Reacción en la chumacera del punto $F$ , dirección $y$ , $[N]$
$F_{y'}$	Fuerzas en el eje $y'$ , $[N]$
$F_z$	Reacción en la chumacera del punto $F$ , dirección $z$ , $[N]$
$F_{z'}$	Fuerzas en el eje $z'$ , $[N]$
$P_{cr}$	Fuerza axial, $[N]$
$R_{A\text{máx}}$	Módulo de la fuerza resultante en el nodo $A$ , $[N]$
$R_{F\text{máx}}$	Módulo de la fuerza resultante en el punto $F$ , $[N]$
$S$	Fuerza de sustentación del viento, $[N]$
$ V_{\text{máx}} $	Fuerza cortante máxima, $[N]$
$W$	Peso total (del concentrador y de la estructura), $[N]$
$W_t$	Peso de cada elemento de la estructura, $[N]$
$W_{y'}$	Componente del peso total, dirección $y'$ , $[N]$
$W_{z'}$	Componente del peso total, dirección $z'$ , $[N]$

---

## Momentos

$M_{x'}$	Momento al rededor del eje $x'$
$M_{\overline{DF}}$	Momento de flexión en la sección $\overline{DF}$ , $[N - m]$
$M_{\overline{EF}}$	Momento de flexión en la sección $\overline{EF}$ , $[N - m]$
$M_{máx}$	Momento máximo de flexión, $[N - m]$
$ M_{máxA} $	Momento cortante máximo en la flecha $A$ , $[N - m]$
$ M_{máxB_1} $	Momento cortante máximo en las flechas de los nodos $B_1$ y $B_2$ , $[N - m]$
$ M_{máxF} $	Momento cortante máximo en la flecha $F$ , $[N - m]$

## Esfuerzos

$E$	Módulo de Young, $[MPa]$
$N$	Factor de ensamble de nodos
$FS$	Factor de seguridad
$\sigma_{AxialB_1Disco}$	Esfuerzo normal en las flechas de rotación $B_1$ y $B_2$ , $[MPa]$
$\sigma_N$	Esfuerzo normal, $[MPa]$
$\sigma_{MáxA}$	Esfuerzo normal en la flecha de rotación $A$ , $[MPa]$
$\sigma_{MáxB_1Disco}$	Esfuerzo normal en las flechas de rotación $B_1$ y $B_2$ , $[MPa]$
$\sigma_{MáxF}$	Esfuerzo normal en la flecha $F$ , $[MPa]$
$\sigma_{Máxper}$	Esfuerzo normal máximo permisible por el material, $[MPa]$
$\sigma_{TT}$	Esfuerzo normal en cada elemento con base en el diámetro propuesto, $[MPa]$
$\sigma_y$	Esfuerzo de deformación plástica del material, $[MPa]$
$\tau_{máx}$	Esfuerzo cortante máximo, $[MPa]$
$\tau_N$	Esfuerzo cortante en el elemento $EF$ , $[MPa]$
$\tau_p$	Esfuerzo cortante en el perno de sujeción, $[MPa]$
$\tau_y$	Esfuerzo cortante de fluencia del material, $[MPa]$

# Resumen

En este trabajo se presenta el diseño mecánico y la construcción de una montura ecuatorial tipo andamio colgante denominada COSPAA-90-II, así como la caracterización térmica de un sistema de concentración solar de disco parabólico para producción de calor de proceso construido a partir de una antena parabólica de telecomunicaciones de desecho.

Para la parte del diseño mecánico se describe la metodología seguida por medio de la cual se obtuvo el dimensionamiento, la selección de los materiales y la construcción de la nueva estructura.

En la parte de la caracterización térmica del concentrador-receptor se realizó un modelo matemático del proceso de calentamiento del receptor en el estado transitorio. Así mismo, se realizaron pruebas experimentales en tres etapas.

En la primera etapa se obtiene un valor de reflectancia para el concentrador de 0.81. En la segunda etapa se describen las pruebas de repetitividad realizadas al sistema de concentración solar COSPAA-90-I con flujos volumétricos de 4, 3, 2 y 1 l/min, comparando los resultados experimentales con el modelo matemático encontrando un excelente ajuste entre ambos. En esta misma etapa se demostró que al disminuir el flujo hasta 0.3 l/min, se obtiene producción de vapor a la salida del receptor. En la tercera etapa de la experimentación, se describe la prueba con variación de la temperatura del agua a la entrada del receptor, para lo cual se diseñó y contruyó un precalentador del flujo, obteniendo así la curva de la eficiencia térmica del receptor. Los flujos utilizados en este caso fueron de 5, 4, 3 y 1 l/min y se obtuvieron valores máximos de eficiencias de 40.19 %, 39.67 %, 39.07 % y 35.29 %, respectivamente. En esta última etapa experimental se encontraron también los valores del coeficiente global de pérdidas de calor del receptor para el estado estacionario del proceso de calentamiento. Estos valores fueron 0.16, 0.17, 0.18 y 0.21  $kW/m^2oC$  respectivamente para los flujos de 5, 4, 3 y 1 l/m.

Finalmente el trabajo presentado en esta tesis ha demostrado que es posible construir una estructura con montura ecuatorial para disco parabólico más simple en su operación y más barata en su construcción que la montura tradicional tipo azimutal de un solo poste. También se ha demostrado que es posible obtener calor de proceso industrial utilizando una antena parabólica de desecho como concentrador solar.

# Abstract

In this work it is described a mechanical design and construction of an equatorial structure type cradle, which we call COSPAA-90-II. It is also described the thermal characterization of a parabolic dish solar concentrator system from a telecommunication antenna for industrial heat production.

For the mechanical design, it is included the methodology used to obtain the dimensionality, select the materials, and build the new structure.

For the thermal characterization of the concentrator and receptor system, it was developed a mathematical model of the heating process of the receptor in the transition state. Then some experimental tests in three stages were carried out.

In the first stage, a value of the reflectance of the concentrator was found to be of 0.81. In the second stage are described the repetition tests, which were performed in the solar concentrator system COSPA-90-I with volumetric flows of 4, 3, 2 and 1 *l/min*. The experimental data was checked against the values in the mathematical model. An excellent agreement was found between both the experimental data and the mathematical modeling. In this same stage, it was showed that the system is capable to produce steam at the outlet of the receptor with a very low volumetric flow of 0.3 *l/min*.

In the third stage of the experimentation is described the test which was performed with water at various temperatures applied at the inlet of the receptor. A pre-heater was designed and built exclusively for this purpose. From these experiments, the efficiency curve for the receptor at flows 5, 4, 3, and 1 *l/min* was obtained. The maximum efficiency values were found to be 40.19 %, 39.67 %, 39.07 %, and 35.29 % respectively. In this last experimental stage, the values of the global coefficient of heat loss of the receptor for the stationary stage of the preheating process were found to be 0.16, 0.17, 0.18 and 0.21  $kW/m^2 \text{ } ^\circ C$  at flows 5, 4, 3 and 1 *l/min* respectively.

Finally, the research made in this thesis has showed that it is possible to built an equatorial structure type cradle for a parabolic dish, easier to operate and cheaper than the traditional structures. So far, the results indicate that it is possible to produce industrial heat from a telecommunication antenna used as a solar concentrator.

# 1

## Introducción

### 1.1. Energía y problemas de contaminación por gases de efecto invernadero

A lo largo de la historia de la humanidad, el hombre ha utilizado distintas fuentes de energía para realizar una amplia gama de actividades.

Fue a partir de finales del siglo XVIII, con el comienzo de la Revolución Industrial, cuando se produjo el gran cambio en la forma del consumo energético mundial.

Se crearon las máquinas térmicas que permitían manufacturar diversos productos industriales. También se utilizaron las máquinas de vapor en el transporte las cuales consumían grandes cantidades de energía.

A finales del siglo XIX, aparecen la energía eléctrica, los automóviles, los aviones, los motores de combustión interna, la industria química y la industria metalúrgica, entre otras. Se da lugar así a la segunda fase de la revolución industrial, donde los combustibles fósiles, especialmente el carbón, aportan la energía primaria, sin sospechar el grave daño que mas adelante ocasionarían cuando a partir de la Primera Guerra Mundial se comienza a utilizar en forma común el petróleo.

En la actualidad para mantener el confort de la vida moderna se necesitan grandes cantidades de energía para usos como son: agricultura, industria, transporte, comunicaciones y otros servicios. Es por eso que el consumo de combustibles fósiles, especialmente el petróleo y gas natural, se ha incrementado espectacularmente en los últimos tiempos. Esta energía se puede obtener de diversas fuentes, las cuales se pueden clasificar de la siguiente forma:

## **Fuentes convencionales, renovables y no renovables**

Se les llama fuentes de energía convencionales a las que se utilizan en gran escala actualmente. En este caso su desarrollo tecnológico es considerable. Las fuentes renovables son aquellas que tienen la capacidad de regenerarse por sí solas. Debido a esta situación se consideran prácticamente inagotables. Dentro de las fuentes convencionales renovables se encuentra la energía hidráulica. Por el contrario, las fuentes no renovables no poseen la capacidad de autoregeneración, por lo que sus reservas son finitas y algún día se agotarán, las más comunes son el petróleo, carbón, gas natural y la energía nuclear.

## **Fuentes de energía no convencionales, renovables**

Las fuentes no convencionales son las que se utilizan en pequeña escala, su desarrollo tecnológico es todavía incipiente y poco desarrollado en comparación con el de las fuentes convencionales. Las más importantes son: la energía solar, eólica, maremotriz, geotérmica y biogas.

Según datos del Consejo Mundial de Energía, las energías convencionales no renovables representan el 79.6 % del total: los hidrocarburos (petróleo y gas) forman el 56.4 %, el carbón el 23.2 %, la energía nuclear y la energía hidroeléctrica que si es renovable, representan el 8.7 % del total (con 6.5 y 2.2 %, respectivamente).

Las energías renovables no convencionales cuentan con una participación del 11.7 %, de las cuales el consumo de leña y la biomasa tradicional, que pese a su baja eficiencia y alta contaminación forma la fuente más importante de energía para casi un tercio de la población mundial, representa alrededor del 90 % (9.5 % del total de la oferta producida). Este último dato es indicativo de la distribución de energía en el mundo actual. Los países industrializados tienden a concentrar su producción y consumo. Si se consideran indicadores de participación y eficiencia, los países industrializados tienen una participación sustantivamente mayor en el consumo de energía mundial, aunado a una mayor eficiencia en su uso. Los países en vías de desarrollo se encuentran en el caso inverso[1].

Hoy en día, a nivel mundial, se están realizando importantes investigaciones en el uso eficiente de las energías renovables no convencionales. La energía solar es una de las más importantes aunque su uso es limitado debido a que en la actualidad no compete económicamente con los energéticos convencionales, en particular con los hidrocarburos.

El problema asociado al uso indiscriminado de los hidrocarburos es que son finitos, esto es, eventualmente se acabarán y además afectan gravemente el medio ambiente.

Los impactos asociados al calentamiento global son enormes e irreversibles y ponen en riesgo la biodiversidad natural, los ecosistemas productivos y a la población humana. Existen ya muchas evidencias de impactos asociados a este fenómeno, tales como mayores eventos meteorológicos extremos como huracanes, inundaciones y sequías, expansión de enfermedades como la malaria y el dengue.

Se considera que el uso de los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) es el principal responsable de este problema de escala global.

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA en Inglés) la producción anual de  $CO_2$  por la quema de combustibles fósiles, ha variado de 15 millones de toneladas en 1971 a 22.7 millones en 1996[2]. Por otro lado, la cantidad de gases de efecto invernadero (denominados ghg, Green House Gas) ha aumentado en 30 % desde la aparición de la revolución industrial hasta nuestros días. Lo cual se estima ha sido el causante principal de este llamado cambio climático en la tierra y es un problema que se agudizará con el paso del tiempo si no existe una fuerte política de reducción de emisiones de ghg.

El único mecanismo internacional para empezar a hacer frente al cambio climático y minimizar sus impactos es el Protocolo de Kioto acordado en 1997 dentro del Convenio Marco sobre Cambio Climático de la ONU.

El objetivo del Protocolo de Kioto es reducir un 5.2 % las emisiones de gases de efecto invernadero globales sobre los niveles de 1990 para el periodo 2008-2012. Para ello contiene objetivos legalmente obligatorios para que los países industrializados reduzcan las emisiones de los 6 gases de efecto invernadero de origen humano como dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ) y óxido nitroso ( $N_2O$ ), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos ( $HFC$ ), perfluorocarbonos ( $PFC$ ) y hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ).

Esto requiere de un gran compromiso por parte de la comunidad internacional para respetar el Protocolo de Kioto, procurando fortalecer sus mecanismos de aplicación y evitar que diversos intereses vinculados a los combustibles fósiles debiliten este acuerdo[3].

Ante esta situación la alternativa de suplir la energía proveniente de combustibles fósiles con energías renovables, que no son emisores de ghg, toma especial importancia.

La energía solar es una de las energías renovables que presenta mayor posibilidad de aplicación en el futuro próximo. Baste decir que la cantidad de energía que alcanza

la superficie de la tierra procedente del Sol durante 10 días, iguala al total de las reservas mundiales conocidas actualmente de gas, carbón y petróleo.

## 1.2. Energía en México y necesidades de calor de proceso industrial

Al igual que en el contexto internacional, en México la energía juega un papel central en el desarrollo sustentable, debido al impacto sobre la economía y el medio ambiente del país.

El sector energético es una de las actividades económicas más importantes del país. Representa el 3 % del PIB, siendo sus exportaciones petroleras cerca del 8.4 % del total de las exportaciones nacionales. Los impuestos a los hidrocarburos constituyen el 37 % de los ingresos fiscales del gobierno, mientras que el 40 % del total de las inversiones públicas está dedicado a proyectos energéticos. La producción de energía está basada en los hidrocarburos que México exporta de manera significativa.

De la oferta total de energía en el año 2000, el 82 % proviene de hidrocarburos (64.4 % del petróleo y 17.6 % del gas natural) con 10.2 % provenientes de fuentes primarias de electricidad, carbón y biomasa. De ese total, poco más del 37 % se exporta; el porcentaje restante satisface la demanda nacional, siendo el transporte, la industria y el uso habitacional, comercial y público los principales destinos del consumo interno (con 15.4, 11.8 y 8 % del consumo total, respectivamente).

En los últimos años, México ha seguido una política que busca simultáneamente el crecimiento económico y disminuir el impacto sobre el ambiente. Sus componentes actúan tanto sobre la demanda (eficiencia energética y ahorro de energía) como sobre la oferta (diversificación de fuentes de energía, desarrollo de energías limpias, programas de gestión ambiental).

Todo esto dentro de un esfuerzo por garantizar la seguridad del abasto energético de largo plazo en el país e incrementar el acceso de servicios energéticos de quienes aún no los tienen. Estas acciones han contribuido a disminuir el consumo de recursos no renovables, aminorar la tasa de crecimiento de las emisiones globales, reducir el impacto ambiental de la generación de energía y facilitar el acceso a quienes carecen de energía.

Las reformas estructurales en la economía ocurridas desde finales de la década de los 80 s, aunadas a los mayores niveles de competencia que se han generado desde entonces, han llevado a mejorar la eficiencia energética del país.

Adicionalmente, el sector ha venido acompañando estos cambios con políticas

específicas de ahorro de energía, implementadas a través de instituciones tales como la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) y el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), y el desarrollo y aplicación de energías renovables a través de las universidades, centros e institutos de investigación.

## Necesidades de calor de proceso industrial

El calor de proceso industrial se utiliza para proporcionar los requerimientos térmicos de las máquinas y procesos industriales dedicados a la transformación de productos para el confort humano. Para obtener este calor de proceso se utilizan generadores de vapor convencionales los cuales se clasifican de la siguiente forma:

- Piro tubulares

En este tipo de sistema, los gases calientes de la combustión son conducidos por el interior de tubos sumergidos en una masa de agua líquida en circulación natural y esta masa está contenida en un recipiente a presión.

- Acuotubulares

En este tipo de sistema, los gases calientes de la combustión circulan por el exterior de los tubos conductores de agua y que están sometidos a presión interior.

En la tabla 1.1, se presentan las características de operación de los dos tipos de sistemas convencionales de generación de vapor.

Tabla 1.1: Características de los generadores de vapor convencionales.

Características	Piro tubulares	Acuotubulares
Eficiencia térmica	85 %	80 %
Producción de vapor	hasta 35 $[T/h]$	hasta 1600 $[T/h]$
Presión de trabajo	de 1 hasta 25 $[kg_f/cm^2]$	de 10 hasta 170 $[kg_f/cm^2]$
Flujo medio de vapor por hora por $m^2$ de superficie de calentamiento	de 40 $kg$	mayor a 25 $kg$
Combustible	diesel o gas natural	diesel o gas natural

En México, algunas de las aplicaciones más importantes en el uso del calor de proceso industrial generado a través de medios convencionales son las siguientes: Siderurgia, Petroquímica, Química, Azúcar, Celulosa y papel, Vidrio, Fertilizantes, Cerveza y malta, Aguas envasadas, Automotriz, etc.

En la tabla 1.2 se presentan los diversos consumos de energía total para las industrias mencionadas anteriormente entre los años 2000 a 2003[3]. En esta tabla se observa que las necesidades industriales que requieren un gran consumo de energía en México son muy diversas y van desde el ramo alimenticio hasta la industria de la transformación.

Tabla 1.2: Consumo de energía en México (petajoules) por actividad industrial, 2000 a 2003.

Actividad industrial	2000	2001	2002	2003
Total	1274.0	1206.5	1238.2	1143.1
Siderurgia	265.6	221.3	199.6	199.2
Petroquímica PEMEX	102.3	86.8	82.3	24.2
Química	150.8	127.1	118.6	109.6
Azúcar	110.3	115.5	109.9	112.4
Cemento	115.7	110.5	107.6	110.7
Minería	76.4	67.6	65.8	58.2
Celulosa y papel	42.1	37.6	35.2	34.9
Vidrio	30.7	28.4	34.8	30.0
Fertilizantes	4.4	3.6	3.8	3.4
Cerveza y malta	16.1	16.3	15.5	16.3
Aguas envasadas	10.5	10.3	10.1	10.5
Automotriz	9.8	10.1	9.8	9.1
Construcción	7.7	7.4	7.3	7.6
Hule	6.0	6.2	5.6	6.1
Aluminio	5.6	4.7	4.5	4.2
Tabaco	0.4	0.4	0.5	0.4
Otras	319.8	352.7	427.3	406.3

En la mayoría de estas industrias, los procesos industriales requieren utilizar agua caliente con temperaturas cercanas a los  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  o vapor húmedo con presiones de 1 a  $25\text{ kg}_f/\text{cm}^2$ .

Los rangos de presión y temperatura alcanzados mediante generadores de vapor convencionales que utilizan diesel o gas natural como combustible se pueden obtener también utilizando tecnologías no convencionales las cuales son limpias ya que no producen gases de efecto invernadero.

Con la tecnología solar se podría cubrir gran parte de esta necesidad de calor de proceso industrial.

### 1.3. Tecnologías solares que pueden satisfacer las necesidades de calor de proceso industrial

El Sol es la fuente de vida en la Tierra y es el origen de la mayor parte de la energía que el hombre ha utilizado en su historia.

La captación natural de energía solar se produce en la atmósfera, los océanos y las plantas de la Tierra.

El viento por ejemplo, es debido a las diferencias de presión generadas por un calentamiento no uniforme de la atmósfera terrestre desplazando grandes masas de aire de las zonas de alta presión a las de baja. El viento se ha utilizado durante siglos para hacer girar los molinos y en la actualidad para producir energía eléctrica.

Casi el 30 % de la energía solar que alcanza el borde exterior de la atmósfera se consume en el ciclo del agua, el cual produce la lluvia y la energía potencial de las corrientes de montaña y de los ríos[4].

Gracias al proceso de fotosíntesis, la energía solar contribuye al crecimiento de la vida vegetal (biomasa) la cual junto con la madera y los combustibles fósiles que desde el punto de vista geológico derivan de plantas antiguas, pueden ser utilizados como combustibles. Otros combustibles como el alcohol y el metano también pueden extraerse de la biomasa.

México recibe energía solar a una tasa promedio de  $0.6 \frac{kW}{m^2}$  que, en un periodo de insolación medio de  $8 \frac{h}{día}$ , significan  $9.6 PWh$  diariamente, lo que permitiría satisfacer la demanda energética del país actual y futura[5].

No es irracional entonces, aprovechar por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética. No obstante, debemos considerar que uno de los obstáculos principales para la utilización adecuada de la energía solar es el alto costo de inversión específico relativamente alto, así como la disponibilidad restringida debido a las fluctuaciones naturales de la fuente de energía. Así se vuelve de vital importancia el desarrollo y perfeccionamiento de las tecnologías disponibles para captación, acumulación y distribución de energía solar.

Existen diversas formas de aprovechar la energía proveniente del Sol. Esto puede ser por medio de un proceso de conversión fotovoltaica o fototérmica.

## Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos, constan de un conjunto de celdas solares, como se muestra en la figura 1.1, fabricadas principalmente de silicio en estado cristalino. Dentro de ellas, una delgada rejilla semiconductor es especialmente tratada para formar un campo eléctrico, positivo en un lado y negativo en el otro. Cuando la energía luminosa llega hasta la celda solar, los electrones son golpeados y sacados de los átomos del material semiconductor. Si se ponen conductores eléctricos tanto del lado positivo como del negativo de la rejilla, formando un circuito eléctrico, los electrones pueden ser capturados en forma de una corriente eléctrica, es decir, en electricidad. La electricidad puede entonces ser usada para suministrar potencia a una carga, por ejemplo para encender una luz o energizar una herramienta.

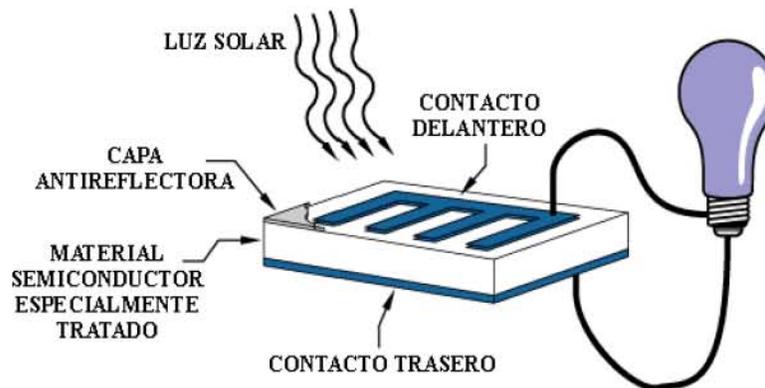


Figura 1.1: Celda solar.

Estos sistemas tienen la ventaja de no tener partes móviles y poseer una larga vida de operación.

Sin embargo, aun cuando la eficiencia de operación en general es baja, alrededor del 15% (30% en las de más reciente desarrollo) hasta el momento son demasiado costosas, por lo que no pueden competir con otras fuentes de energía como el petróleo y el gas. Son una adecuada solución en aquellos lugares en los cuales no hay acceso al uso de energías convencionales.

En la vida cotidiana, muchas instalaciones fotovoltaicas son pequeñas y se utilizan para: apoyar el suministro eléctrico de una casa, o para señalizaciones de carre-

tera, abastecimiento eléctrico en las áreas rurales que cuentan con un recurso solar abundante.

Así mismo, la electricidad obtenida mediante los sistemas fotovoltaicos puede utilizarse en forma directa, o bien ser almacenada en baterías para utilizarla durante la noche.

## Sistemas fototérmicos

Existen varias formas y sistemas para la captación y concentración de la radiación solar, pero la parte común de los sistemas solares fototérmicos es que todos necesitan orientación respecto al ángulo de incidencia solar. Además se debe destacar que el acabado de las superficies que constituyen el sistema óptico, debe ser de buena calidad y debe mantener sus propiedades por largos periodos de tiempo sin ser deterioradas por el polvo, lluvia y medio ambiente.

Dentro de estos sistemas fototérmicos se tiene una clasificación, la cual depende de la temperatura de operación.

- Colectores solares de baja temperatura. Proveen calor útil a temperaturas menores de  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  mediante absorbedores metálicos o no metálicos para aplicaciones tales como calentamiento de piscinas, calentamiento doméstico de agua para baño y, en general, para todas aquellas actividades industriales en las que el calor de proceso no es mayor a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por ejemplo la pasteurización, el lavado textil, etc.

Para estas aplicaciones se utiliza el sistema denominado colector solar plano. Los colectores solares planos, son dispositivos que se calientan al ser expuestos a la radiación solar y que transmiten el calor a un fluido. Funcionan a bajas temperaturas y se utilizan principalmente para calentar o enfriar agua y aire en las casas, pero también para secar granos, obtener agua potable, en albercas, lavanderías, baños públicos, embotelladoras, etc. Los sistemas típicos para casa-habitación emplean colectores fijos, montados sobre el tejado. En el hemisferio norte se orientan hacia el Sur y en el Sur hacia el Norte. El ángulo de inclinación óptimo depende de la latitud.

Cuando se desea calentar a temperaturas elevadas un líquido, sólido o un gas se emplean los llamados concentradores solares. Funcionan concentrando la radiación solar directa en un área focal, pudiéndose ubicar ésta, alrededor de un punto o a lo largo de una línea[6].

Se utilizan en diversas aplicaciones entre las que se encuentran las estufas o cocinas solares, los hornos solares que permiten fundir materiales o adaptarse a un motor Stirling para bombeo de agua o en la ventilación. En regiones con insolación intensa pueden emplearse para la generación de energía eléctrica.

- Concentradores solares de temperatura media. Son los dispositivos que concentran la radiación solar para entregar calor útil a mayor temperatura, usualmente entre los 100 y 300 °C. Tienen el inconveniente de trabajar solamente con radiación solar directa por lo que su utilización queda restringida a zonas de alta insolación.
- Concentradores de alta temperatura. Operan a temperaturas mayores a los 500 °C y su uso más común es para generar electricidad y transmitirla a la red eléctrica; en algunos países estos sistemas son operados por productores independientes y se instalan en regiones donde las posibilidades de días nublados son remotas.

## **Tecnologías de concentración solar para producción de potencia térmica y eléctrica**

Los concentradores solares para producción de potencia térmica y eléctrica constan fundamentalmente de tres partes:

- Concentrador o sistema óptico
- Receptor o absorbedor
- mecanismo de seguimiento para el movimiento aparente del Sol

Aunque cabe mencionar que algunos carecen del tercer elemento y son estáticos y por ende concentran menos.

Se tiene una variedad en los concentradores, receptores y mecanismos de seguimiento. De acuerdo con su configuración, los concentradores solares son reflectores cuando reciben los rayos solares y concentran los rayos incidentes en un foco y son refractores cuando el colector esta formado por una lente que recibe los rayos solares paralelos y los refracta, concentrándolos en un punto donde se encuentra el elemento receptor que contiene el fluido a calentar[7].

De acuerdo a la geometría del concentrador (figura 1.2), y a la temperatura que se puede alcanzar en el receptor, los concentradores solares se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Sistemas de enfoque en línea (cilíndrico-parabólicos).
- Sistemas de torre central.
- Sistemas de disco parabólico.

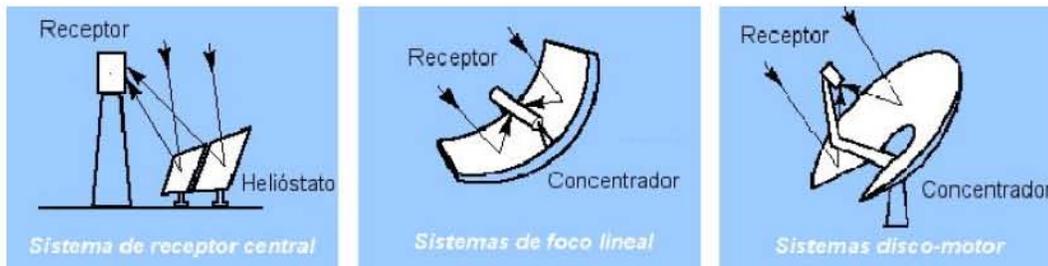


Figura 1.2: Clasificación de Colectores Solares.

## Sistemas de enfoque en línea

Este arreglo es relativamente sencillo. Consta de un concentrador cilíndrico-parabólico y un tubo absorbedor como receptor del sistema[8]. Para su correcto funcionamiento se debe enfocar la luz del sol en el receptor que funciona a lo largo de la línea focal del colector.

El fluido caliente que sale del tubo absorbedor es a su vez la fuente de energía en un ciclo productor de energía como el Rankine.

## Sistemas de torre central

El arreglo de torre central consiste de un sistema de espejos planos llamados helióstatos que concentran la energía en un banco de tubos por los cuales circula un fluido térmico, mismo que se suministra a un ciclo productor de energía. Con este tipo de sistema se consiguen temperaturas muy elevadas y pueden utilizarse para generar energía eléctrica[9].

Un ejemplo de ello se encuentra en la Plataforma Solar de Almería (figura 1.3) ubicada en el desierto de Tabernas, España. Esta plataforma constituye el más importante Centro Europeo de desarrollo y aplicaciones de la energía solar fototérmica.



Figura 1.3: Plataforma solar de Almería.

## Sistemas de disco parabólico

El concentrador está formado por una o varias superficies reflectoras (espejo, aluminio anodizado, etc.) de forma paraboidal o esférica, que reciben los rayos solares y los concentran en la zona focal del sistema, dichos rayos inciden en un elemento receptor ubicado en el foco, que contiene el fluido a calentar[10].

En este tipo de concentradores solares de tipo puntual (discos paraboloides), se destaca el uso de receptores solares en forma de cavidades que permiten la entrada de los rayos solares concentrados por el lado abierto de la cavidad para ser absorbidos en sus paredes internas y transferir la energía térmica a algún fluido térmico. Se trata de reducir al máximo las pérdidas de calor y poder maximizar la eficiencia térmica del sistema. En el diseño de estos receptores se requiere de un conocimiento adecuado de los procesos de transferencia de calor que ocurren en los mismos.

Este tipo de concentradores solares, sirven para calentar fluidos a altas temperaturas y para generar electricidad, actualmente se consideran motores Stirling o turbinas Brayton conectados directamente al sistema (figura 1.4).



Figura 1.4: Concentrador solar de disco parabólico multifaceta.

## **Tecnologías de concentración solar para producción de calor de proceso industrial**

Una de las aplicaciones de la energía solar en el mundo, con mayor potencial de desarrollo, es la generación fototérmica a través de sistemas que concentran la energía solar.

Como se mencionó anteriormente existen tres arquitecturas principales para sistemas de concentración solar (CSP por sus siglas en inglés), el canal parabólico, torre central y disco parabólico.

Dada la naturaleza de cada una de éstas tecnologías, la implementación de plantas solares en lugares de alta insolación es una opción promisoría para aprovechar la captación de energía solar, sin embargo el alto costo de inversión y la disponibilidad del sol, restringido por las fluctuaciones naturales, limitan la posibilidad de obtener energía a bajo costo.

Es por ello que una solución consiste en la "hibridización" de las plantas solares con sistemas de respaldo convencionales basados en combustibles fósiles que permitan compensar las fluctuaciones de energía solar, incrementando la disponibilidad,

decrementando el costo de inversión y reduciendo el riesgo tecnológico. Así mismo, la integración de sistemas de almacenamiento de energía puede incrementar el tiempo de operación de las mismas[11].

Las tecnologías de concentración solar para producción de calor de proceso industrial más viables son los sistemas de enfoque en línea y los sistemas de disco parabólico.

Los sistemas solares generadores de energía (SEGS) de canal parabólico representan la tecnología más madura para concentración solar en la actualidad.

En el caso de México, desde 1976 el Instituto de Ingeniería de la UNAM inició un programa para estudiar el comportamiento de un concentrador solar y construyó para ello un prototipo con geometría de canal parabólico[12]. Sin embargo, fue hasta los años 80 que se construyó la "Planta Solar" del IIUNAM con  $550 m^2$  de concentradores. Esta planta en su primera etapa operó con aceite térmico como fluido de transferencia de calor. Contaba con 16 módulos de concentradores de canal parabólico con orientación este-oeste, además de una torre de almacenamiento de aceite, un evaporador y equipo auxiliar.

Desde 1994 la planta solar se acondicionó por una línea de concentradores de canal parabólico (figura 1.5) con un área de captación de  $220 m^2$ , un motor de vapor de doble pistón, un generador eléctrico, equipo de control, e instrumentación diseñada para operar bajo el proceso de generación directa de vapor[13]. Como equipo auxiliar para las investigaciones, la planta cuenta con una caldera de  $3 kW$  como fuente de energía auxiliar, una estación meteorológica que registra las variables de velocidad del viento, temperatura ambiente y radiación solar, un sistema de adquisición de datos de temperaturas y medidor de flujo en dos fases[14].



Figura 1.5: Planta Solar II-UNAM.

Las pruebas que se realizan en esta planta, se refieren al comportamiento de los absorbedores de acuerdo con los materiales de que están contruidos, como aceros y compuestos cobre-acero. También se estudia el incremento de la cantidad de vapor en los concentradores, utilizando flujos análogos a las salmueras provenientes de pozos geotérmicos, con la finalidad de incrementar la potencia de generación en sistemas geotermoeléctricos en zonas de alta insolación[15].

Para la producción de vapor utilizando concentradores cilíndrico-parabólico se pueden encontrar tres configuraciones: sistemas de circuito dual, de conversión instantánea y de generación directa.

En el sistema de circuito dual, el fluido que se utiliza en los concentradores es aceite térmico y por medio del cual se pueden alcanzar temperaturas cercanas a los  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , después se acopla el circuito del aceite térmico a un intercambiador de calor por medio del cual circula agua y de esta forma se produce vapor a  $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16].

En el sistema de conversión instantánea se hace circular agua a presión a través del concentrador, la cual se calienta entre  $180$  y  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A la salida del concentrador, el agua se conduce a un tanque de evaporación instantánea produciendo de esta forma el vapor[17].

En el sistema de generación directa de vapor, se alimenta agua a presión en los tubos absorbedores y a medida que el flujo circula por éstos, se convierte en flujo bifásico (líquido-gas). Este proceso representa un gran potencial para incrementar la eficiencia y disminuir los costos de los sistemas solares de generación de vapor[18].

A diferencia de los sistemas de circuito dual y de conversión instantánea, los sistemas de generación directa de vapor no se han puesto en uso, debido a que se encuentran todavía como trabajo experimental de laboratorio.

En lo que respecta a los sistemas de disco parabólico y debido a que presentan una óptica parabólica ideal de enfoque en un punto, así como su control de trayectoria de doble eje, estos concentradores consiguen máxima concentración de flujo solar y por tanto el mejor rendimiento de todos los tipos de concentradores.

Aun cuando la mayoría de estos sistemas se han construido para producción de potencia eléctrica, por sus características y las altas temperaturas alcanzadas en el receptor, son ideales también para la producción de calor de proceso. Por citar algunos ejemplos de esto, en la Planta Solar de Almería en España (figura 1.6), se tienen instaladas seis unidades de entre  $9$  y  $10\text{ }kW_e$  que utilizan un motor Stirling para producir energía eléctrica. Lo interesante de esto es que trabajan a una temperatura de operación de  $620\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la eficiencia promedio de conversión alcanza un máximo de  $20.3\%$ [19].



Figura 1.6: Discos parabólicos. Plataforma Solar de Almería, España.

Otro ejemplo importante es el sistema Vanguard en Rancho Mirage, California, EUA, cuyo concentrador mide aproximadamente 11 metros de diámetro formado por 336 espejos montados en su estructura. Proporciona 25  $kWe$  de salida con una eficiencia de 29.4% a una temperatura de 760  $^{\circ}C$  y utiliza como fluido de trabajo hidrógeno[20].

En el caso de Australia, gracias a la participación de diversos organismos de investigación, se ha desarrollado el proyecto piloto denominado "gran disco" de 400  $m^2$  con una capacidad de hasta 150  $kWe$  el cual está siendo probado por la Universidad Nacional Australiana en Canberra desde 1994 (figura 1.7).



Figura 1.7: Gran disco Solar. Universidad Nacional Australiana.

Este proyecto constituye una alternativa a la filosofía de pequeña unidad, siendo diseñado para la generación eléctrica utilizando un motor de vapor de 50  $kWe$  o para aplicaciones de cogeneración con producción de vapor solar[21].

De la recopilación encontrada de los sistemas más importantes de disco parabólico en el mundo, se presentan en las tablas 1.3, 1.4, y 1.5 algunas de sus características incluyendo las características del concentrador y receptor.

En la tabla 1.3 se presenta el nombre de los sistemas, año en que fue puesto en marcha, la potencia eléctrica neta que produce así como su eficiencia de conversión, el número de unidades construidas, ubicación y el estado actual del sistema.

Tabla 1.3: Características de los principales sistemas de disco parabólico.

<b>SISTEMA</b>						
<b>Nombre</b>	<b>Vanguard</b>	<b>MDAC</b>	<b>German/ Saudi</b>	<b>SBP 7.5- m</b>	<b>CPG 7.5-kW</b>	<b>Aisin/ Miyako</b>
<b>Año</b>	1984	1984-88	1984-88	1991-	1992-	1992-
<b>Potencia eléctrica Neta*</b>	25 kW	25 kW	52.5 kW	9 kW	7.5 kW @ 950 W/m <sup>2</sup>	8.5 kW @ 900 W/m <sup>2</sup>
<b>Eficiencia *</b>	29.4% @ 760 °C	29% - 30%	23.1%	20.3%	19% @ 950 W/m <sup>2</sup>	16% @ 900 W/m <sup>2</sup>
<b>Número</b>	1	6	2	5	3 construidas, 14 planeadas	3 planeadas
<b>Ubicación</b>	EUA	EUA	Arabia Saudita	España (3) Alemania (2)	EUA	Japón
<b>Estado Actual</b>	Pruebas completadas	Pruebas completadas	Operación ocasional	En pruebas	Pruebas iniciales de un prototipo de 5 kW	En fabricación

En la tabla 1.4 se describen las características del concentrador utilizado en cada sistema como son su diámetro, tipo de fabricación del concentrador, número de facetas, material de la superficie, reflectancia, relación de concentración, tipo de mecanismo de seguimiento y la eficiencia óptica.

Dentro de la tabla 1.5, se presentan las características del receptor utilizado en cada sistema, como son el tipo de receptor, diámetro de apertura, flujo radiativo pico, temperatura máxima en el receptor, así como la eficiencia del receptor.

Tabla 1.4: Características del concentrador.

CONCENTRADOR						
Nombre	Vanguard	MDAC	German/Saudi	SBP 7.5-m	CPG 7.5-kW	Aisin/Miyako
<b>Fabricante</b>	Advanco	MDAC	SBP	SBP	CPG	CPG
<b>Diámetro**</b>	10.57 m	10.57 m	17 m	7.5 m	7.3 m	7.5 m
<b>Tipo</b>	Espejos de vidrio	Espejos de vidrio	Membrana tensionada	Membrana tensionada	Membrana tensionada	Membrana tensionada
<b>No. de Facetas</b>	336	82	1	1	24	24***
<b>Tamaño de las Facetas</b>	0.451x0.603 m	0.91x1.22 m	17 m dia.	7.5 m dia.	1.524 m dia.	1.524 m dia.
<b>Superficie</b>	Vidrio/Plata	Vidrio/Plata	Vidrio/Plata en acero inoxidable	Vidrio/Plata en acero inoxidable	Película plástica aluminizada	Película plástica aluminizada
<b>Reflectancia inicial</b>	93.5%	91%	92%	94%	85% to 78%	85% to 78%
<b>Concentración+</b>	2750	2800	600	4000	1670	1540
<b>Seguimiento</b>	Cardán	Az-el	Az-el	Polar	Polar	Polar
<b>Eficiencia</b>	89%	88.1%	78.7%	82%	78%	78%

Tabla 1.5: Características del receptor.

RECEPTOR						
Nombre	Vanguard	MDAC	German/Saudi	SBP 7.5-m	CPG 7.5-kW	Aisin/Miyako
<b>Tipo</b>	Irradiación directa del tubo	Tubo de calor de sodio	Irradiación directa del tubo			
<b>Diámetro de Apertura</b>	20 cm	20 cm	70 cm	12 cm	18 cm	18.5 cm
<b>Flujo pico</b>	75 W/cm <sup>2</sup>	78 W/cm <sup>2</sup>	50 W/cm <sup>2</sup>	80 W/cm <sup>2</sup>	30 W/cm <sup>2</sup>	30 W/cm <sup>2</sup>
<b>Temp. en el tubo (max.)</b>	810 °C	--	800 °C	850 °C	675°C++++	780 °C
<b>Eficiencia</b>	90%	90%	80%	86%	86%	65%

\* A 1000 W/m<sup>2</sup> A menos que se especifique algo más

\*\* Disco equivalente

\*\*\* 32 para alta potencia temporal de salida

+ Relación de concentración geométrica

++++ Temperatura interna del tubo de calor (Vapor de sodio)

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la configuración de disco parabólico tiene ventajas sobre otros sistemas. Además por su mecanismo de seguimiento de dos ejes, mantiene siempre en una posición normal la apertura del disco con respecto a la radiación solar incidente, teniendo como resultado una captación más alta y por consiguiente una mayor producción de energía útil a través del año.

Es por todo esto que se considera a los sistemas de disco parabólico como una de las forma factible para la producción de calor de proceso industrial.

## 1.4. Trabajos relacionados con la producción de calor de proceso por medio de concentradores solares de disco parabólico

Durante la última década, algunas inovaciones en el diseño y los materiales para la fabricación de los discos parabólicos, así como un mayor uso de los mismos, han sido reportadas.

Debido a que la configuración óptica ideal para un concentrador de disco es un espejo parabólico, cuyo costo es elevado y aumenta con relación al área de apertura, en la práctica se fabrican concentradores de disco parabólico a partir de espejos pequeños, componentes elementales conocidos como facetas.

Hasta hace algunos años los discos parabólicos se fabricaban utilizando facetas de vidrio-metal[22][23][24][25], también se utilizan superficies con películas de aluminio[26][27], plata-polímeros[28][29], plata-acero, superficies de membrana tensionada y sistemas de moldes y material denominado "composite"[30][31].

Como es sabido también, en los concentradores de disco parabólico al reducir el peso de la estructura del concentrador, se reduce significativamente el costo de fabricación del sistema completo[32].

En un trabajo previo, Schmidt, G., et al. [33] presentan el estudio de una planta de 10 kW en desarrollo en Kuwait, la cual utiliza concentradores de disco parabólico con ángulo de apertura de 90°. Ellos auguran que para maximizar la cantidad de energía reflejada por el concentrador se requieren valores de 90° y hasta 110° para el ángulo de apertura. Para estos concentradores se utilizaron receptores esféricos fabricados en cobre y derivados de la tecnología utilizada en la propulsión de cohetes espaciales. Así mismo, ellos realizan una comparación de dos configuraciones de la planta solar, una para agua y otra para tolueno como fluidos de trabajo.

Kaushika, N.D. [34] presenta los aspectos de viabilidad en sistemas de disco

parabólico, en este trabajo se establece un balance entre algunos factores como son el costo, la confiabilidad y la vida útil del sistema. También se presentan las eficiencias del concentrador derivadas de pruebas experimentales, para este caso de estudio se utiliza un concentrador de disco parabólico de 5 *m* de diámetro.

Kaushika, N.D., et al. [35] establecen que si se reduce el peso en la estructura se puede reducir el costo del sistema. Ellos construyen un concentrador ligero y para ello utilizan un marco de aluminio de una antena parabólica de telecomunicaciones donde remplazan la malla metálica de la antena por un espejo reflector. También diseñan y colocan el receptor para este concentrador en el foco del disco parabólico. Como la superficie reflectora está expuesta al medio ambiente, ésta deberá tener una larga vida y un bajo costo, para esto se puede proteger del medio ambiente por medio de un proceso de anodización.

El concentrador está fabricado con un espejo de vidrio, hecho con una película de polímero recubierta por una película de plata-aluminio. Ellos aseguran que con este tipo de concentrador se obtienen muchas ventajas como son: un menor peso de la estructura, índices de reflexión cercanos a un espejo de vidrio, fácil construcción y una gran resistencia al estallamiento del espejo provocados por los cambios de temperatura.

Las características principales del concentrador son las siguientes: largo focal 0.96 *m*, diámetro de apertura 2.405 *m*, ángulo de apertura 65 °, relación de concentración 295, ángulo de dispersión 18 *mrad* y una reflectancia de 0.9 para el primer año de vida del sistema.

Para la producción de vapor por medio de este tipo de concentradores, los autores aseguran que los receptores convencionales son inadecuados, por lo que ellos han investigado receptores de semi-cavidad y receptores de cavidad modificados. De pruebas preliminares realizadas al sistema de concentración ellos han encontrado eficiencias de conversión del 70 al 80 % a temperaturas cercanas a 450 °C.

En el caso de México, en el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), surge el proyecto de reconversión tecnológica de antenas parabólicas de telecomunicaciones de desecho para generación de vapor de uso industrial.

Las características de algunas de estas antenas son las siguientes: 3.32 *m* de diámetro y un área de apertura de 8.66 *m*<sup>2</sup>, longitud focal de 0.83 *m* que dan un ángulo de apertura de 90 ° con un peso total de 300 *kg*.

Estimando que se puede disponer de alrededor de 300 de estas antenas, todas ellas en buenas condiciones, se abrió una posibilidad interesante para utilizar dichas antenas como concentradores solares de bajo costo.

De los trabajos realizados en la evolución de este proyecto se tiene lo siguiente:

Jiménez, M.R., et al. [36] presentan los avances del estudio teórico y experimental que tiene como propósito el adaptar una antena parabólica de aluminio para telecomunicación, de más de tres metros de diámetro, como concentrador solar, dado que la compañía TELECOM, las había dado de baja para realizar un cambio tecnológico. Ellos describen el método empleado para el pulimento de la superficie hasta alcanzar índices de reflexión relativamente altos (0.75 entre 400 y 700  $nm$ , y 0.92 para la región infraroja hasta 3000  $nm$ ) y presentan los espectros obtenidos en muestras del mismo material que han sido sometidos a pruebas de temperismo en la Ciudad de México.

También se describe el proceso experimental usado para determinar el volumen óptimo del absorbedor, utilizando una técnica a base de un barrido de la superficie reflectora con rayo láser y una técnica de trazado de rayos, con lo que ha sido posible estimar una relación de concentración superior a 800 soles.

Estrada et al. [37], presentan los avances teóricos en la investigación de la determinación de la forma óptima del receptor y de las pérdidas térmicas asociadas y en cuyo trabajo se pretende obtener concentradores de discos parabólicos con una superficie altamente reflejante, eficiencias de concentración grandes, y asociado así a un bajo costo de fabricación. Las dimensiones de la antena utilizada son: 3.32  $m$  de diámetro, largo focal de 0.83  $m$ , y con ángulo de apertura de 90 °.

Para el análisis teórico utilizaron un software de trazado de rayos llamado Convolution of Incident Radiation with Concentrator Errors (CIRCE) [38], facilitando así el análisis óptico de la distribución solar en 3-D. El CIRCE es un código computacional el cual modela la eficiencia óptica de concentradores solares de disco parabólico en tres dimensiones. Métodos estadísticos son utilizados para evaluar la distribución direccional de los rayos reflejados desde un punto dado sobre el concentrador. Dadas las geometrías del concentrador y del receptor, la forma solar, así como las imperfecciones del concentrador como son la aspereza y el error asociado de este, el código predice la distribución del flujo radiativo en el receptor, así como la potencia total que incide en este último. En este estudio las distribuciones de flujo para forma cónica y cilíndrica en el receptor fueron analizadas y la función de error del concentrador fue determinada dando un valor  $\sigma = 2mrad$ . La concentración pico local para el receptor cilíndrico fue de 2040 soles y la concentración geométrica fue de 860 soles. Con estas concentraciones, es posible pensar en temperaturas tan altas como 1000  $K$  o mayores.

Estrada et al. [39], determinaron experimentalmente la zona focal de la antena y con base en esto determinaron la geometría y las dimensiones óptimas del receptor

para el concentrador solar paraboidal obtenido a partir de la antena de telecomunicaciones. Describen los experimentos realizados para obtener el valor del error angular asociado al concentrador. También presentan los resultados del estudio óptico de trazado de rayos, el cual les permitió determinar teóricamente las características del receptor, de acuerdo a los resultados de los experimentos. Debido a que la antena de aluminio tiene un ángulo de  $90^\circ$ , es necesario usar un receptor tipo cavidad que permita la captación de energía tanto interna como externamente. En este estudio consideraron las geometrías cilíndrica, cónica, esférica y combinaciones entre ellas, resultando ser la geometría cónica la que da los mejores resultados. Las dimensiones del receptor fueron determinadas maximizando la eficiencia del transporte de radiación de la apertura del concentrador al receptor.

Con base a los resultados obtenidos, se desarrollo en el CIE de la UNAM, el proyecto denominado Concentrador Solar Paraboidal con Ángulo de Apertura de  $90^\circ$  (COSPAA-90-I) cuyo propósito es estudiar térmica y mecánicamente diversos tipos de receptores del concentrador solar tipo plato parabólico el cual fue construido a partir de una antena de telecomunicaciones de desecho.

El COSPAA-90-I está constituido por los siguientes elementos (tabla 1.6 y figura 1.8):

Tabla 1.6: Componentes del sistema COSPAA-90-I.

1	Pedestal
2	Torreta de seguimiento
3	Caja de control
4	Estructura de soporte del disco parabólico
5	Contrapesos
6	Concentrador solar de disco parabólico
7	Buscador solar

El funcionamiento de este sistema de concentración solar se realiza en forma manual por medio de una tarjeta adaptada para este fin la cual está colocada y aislada de la intemperie en una caja metálica, misma que se encuentra colocada en el pedestal. A esta tarjeta se le suministra voltaje de AC y por medio de la cual se convierte en voltaje de CD para ser suministrada a cada motor de  $22\text{ V}$ . Cada motor se puede operar en forma independiente, ya que poseén reductores independientes.

Para lograr el movimiento aparente del sol se ha implementado un buscador solar



Figura 1.8: Fotografía del COSPAA-90-I; los números corresponden a la tabla 1.6.

en el borde del concentrador, el cual permite observar por medio de una pantalla transparente la sombra del sol, conociendo así la orientación del concentrador con respecto al sol.

### **Características del concentrador solar**

El concentrador solar de disco parabólico se ha obtenido a partir de una antena de telecomunicaciones de desecho fabricada totalmente de aluminio, a la cual se le ha aplicado un proceso de pulido mecánico. El disco parabólico posee las características mencionadas en la tabla 1.7 presentada a continuación:

### **Características del receptor cónico**

Los concentradores de foco puntual tienen normalmente ángulos de apertura de  $45^\circ$ , ya que con éstos se obtienen las concentraciones solares más altas sin embargo, el

Tabla 1.7: Características del concentrador solar.

Característica	
Diámetro de apertura	3.42 [m]
Área del concentrador	8.657 [m <sup>2</sup> ]
Distancia focal	0.83 [m]
Ángulo de apertura	90 °
Peso	300 [kg]

concentrador que se ha obtenido de la antena de telecomunicaciones tiene un ángulo de apertura de 90°, esto hace que el receptor de este sistema tenga que ser especial. Así, el receptor cónico del COSPAA-90-I, presenta las características descritas en la tabla 1.8 y el mismo se puede observar en la figura 1.9.

Tabla 1.8: Características del receptor cónico.

Característica	
Diámetro de apertura	217 [mm]
Altura	170 [mm]
Superficie de calentamiento	0.1959 [m <sup>2</sup> ]
Material del receptor	Acero inoxidable A-304
Calor específico del material del receptor	0.515 [kJ/kg°C]

De acuerdo a la figura 1.10, el funcionamiento del receptor se describe de la siguiente forma: Al colocarse el receptor cónico en la región focal del concentrador de disco parabólico el receptor capta la energía proveniente del concentrador por medio de las superficies de calentamiento exterior e interior. Para que la energía en forma de calor sea removida del receptor se utiliza agua como fluido térmico, la cual entra por la parte inferior del cuerpo del receptor y se hace circular por el interior del receptor. Entre las superficies de calentamiento exterior e interior existe un difusor de separación de flujo, por medio del cual el agua pasará de la zona de calentamiento exterior a la zona de calentamiento interior y saliendo así por la parte superior del cuerpo del receptor.



Figura 1.9: Fotografía del receptor cónico.

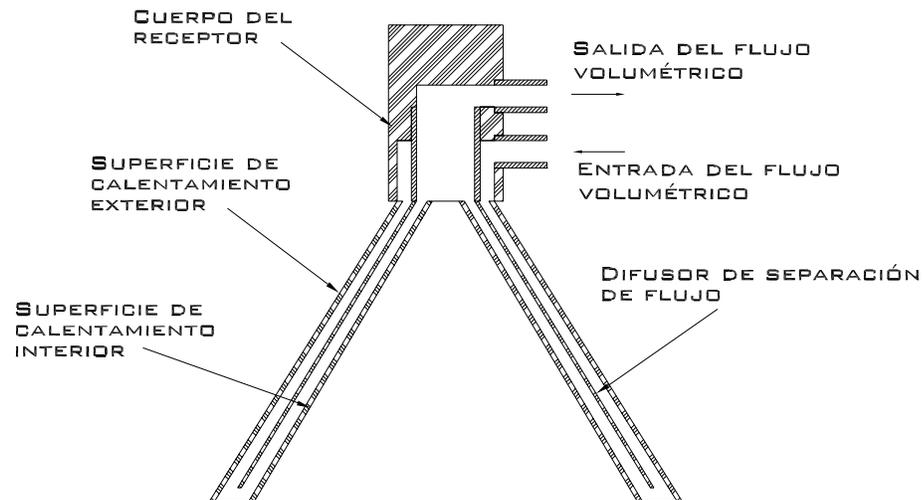


Figura 1.10: Descripción del receptor cónico.

De acuerdo al diseño de este receptor las mayores temperaturas de placa se obtendrán en la superficie de calentamiento interior, disminuyendo así en la superficie de calentamiento exterior.

## **Necesidades de continuar el trabajo realizado en el proyecto COSPAA-90-I y aportaciones del proyecto COSPAA-90-II**

Si bien el proyecto COSPAA-90-I logró avances significativos, no se logró obtener estudios que permitieran caracterizarlo térmicamente. Aunado a esto, la estructura tipo azimutal de un solo poste (ASP) mostró ser costosa en su fabricación. Por lo que se propuso dar marcha al proyecto COSPAA-90-II el cual pretende aportar los siguientes elementos:

- Diseño mecánico y construcción de una montura ecuatorial más simple en su operación que la montura azimutal y más barata.
- Puesta en operación del sistema.
- Instrumentación del receptor cónico.
- Experimentación térmica del sistema.
- Caracterización térmica del mismo, encontrando su curva de eficiencia.

### **1.5. Objetivos del trabajo**

El objetivo principal de este trabajo es diseñar, construir, y caracterizar térmicamente un sistema de concentración solar de disco parabólico con montura ecuatorial para producción de calor de proceso a partir de una antena parabólica de telecomunicaciones de desecho.

Los objetivos particulares son:

1. Realizar el diseño mecánico de la estructura ecuatorial para el concentrador.
2. Construir y armar la estructura ecuatorial.
3. Realizar un modelo matemático del proceso de calentamiento del receptor.
4. Instrumentar el sistema y realizar la experimentación necesaria para determinar la caracterización térmica del receptor.
5. Comparar los resultados teórico-experimentales en el receptor y realizar la caracterización térmica en el sistema.

Para presentar los resultados del estudio, el presente trabajo se ha estructurado en cinco capítulos, siendo éste el primero de ellos y la introducción a los siguientes. En el capítulo 2 se presenta la metodología seguida para determinar el diseño mecánico de la estructura tipo ecuatorial por medio de la cual se obtuvo el dimensionamiento y la selección de los materiales del COSPAA-90-II. En el capítulo 3 se incluye el modelo matemático del proceso de calentamiento del receptor para lo cual se describe el modelo físico del receptor, así como el planteamiento del modelo matemático. En el capítulo 4 se presenta la descripción del circuito de circulación del sistema, la instrumentación realizada al receptor y el diseño de las pruebas experimentales realizadas, así mismo se describe la metodología experimental utilizada. En el capítulo 5 se muestran y analizan los resultados de los experimentos realizados al sistema y se realiza la comparación de éstos contra el modelo matemático, determinando la caracterización térmica del receptor.

## 2

# Diseño mecánico de la estructura del COSPAA-90-II

### 2.1. Tipos de monturas para concentradores solares de disco parabólico

En la mayoría de las instalaciones de concentradores solares de disco parabólico se utilizan las estructuras ASP las cuales requieren un mecanismo de seguimiento de dos movimientos independientes para seguir el movimiento aparente del sol.

Algunos ejemplos de instalaciones que utilizan este tipo de montura son los siguientes:

La planta Solar 1 en Barstow, California, EUA. En esta planta los espejos del concentrador están montados en una estructura de este tipo[40]. El proyecto Solar Total Energy tiene el concentrador montado sobre un cúmulo (cluster) de tres piernas verticales[41]. Esta estructura no es una ASP propiamente dicho, pero tampoco es un tripodo (tres postes empotrados en el suelo), debido a que los postes no salen desde un simple punto. El sistema La Jet tiene los concentradores montados sobre un solo poste[42], el cual se compone de una red de elementos estructurales en lugar de un tubo convencional. La instalación Kuwaití es verdaderamente una ASP aunque no del tipo vertical[43]. Otras instalaciones experimentales simples también utilizan la ASP.

Existen algunas mejoras más complicadas que han sido diseñados para superar algunas de las desventajas de los montajes azimutales. Un ejemplo es el del diseño de General Electric[6] el cual pasa de ser una estructura simple ASP a una más

compleja, y de mayor costo en la construcción de la estructura.

Existe una propuesta para una montura ecuatorial denominada "andamio colgante" (cradle) realizada por Cordy, C.[44], en la cual el autor asegura que con este tipo de montura se presentan mayores ventajas en comparación con las monturas tipo azimutal para los concentradores solares de disco parabólico.

Algunas de estas ventajas son las siguientes:

- La estructura podrá soportar vientos fuertes, evitando así en cualquier instante, el cambio de la posición del concentrador a una posición de resguardo.
- Para seguir el movimiento aparente del sol se requiere exclusivamente de un movimiento al rededor del eje polar de rotación por lo que esto se puede lograr por medio de un único motor de baja potencia, acoplado a un reductor piñon-cremallera el cual es simple y económico.

Debido a las ventajas e innovaciones que el diseño de la Montura Ecuatorial Tipo Andamio Colgante (METAC) presenta sobre la montura azimutal, se determinó diseñar y construir una estructura de este tipo para el proyecto COSPAA-90-II.

## 2.2. Descripción de la Montura Ecuatorial Tipo Andamio Colgante (METAC)

La METAC se compone de 12 elementos estructurales en forma de tres tetraedros los cuales están unidos por los nodos  $A$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  y  $F$ . Las vistas ortogonales se muestran en la figura 2.1 y en la figura 2.2 se presenta la descripción general de la estructura.

El primer tetraedro se compone por los nodos  $A$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  y  $C$ . El segundo tetraedro se compone por los miembros  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $D$  y  $C$ . El tercer tetraedro por  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $F$ ,  $D$  y  $E$ .

La estructura está soportada por el nodo  $A$  y el punto  $F$ , mismo que se tensa al piso.

Así mismo, la estructura presenta dos ejes de rotación para seguir el movimiento aparente del sol, el eje polar y el eje de declinación. El eje polar pasa a través de los puntos  $A$  y  $F$  y el eje de declinación por medio de los nodos  $B_1$  y  $B_2$ . Para lograr el primer movimiento se debe acoplar el mecanismo de conducción del eje polar en el nodo  $C$  con lo cual se logra un gran radio de giro.

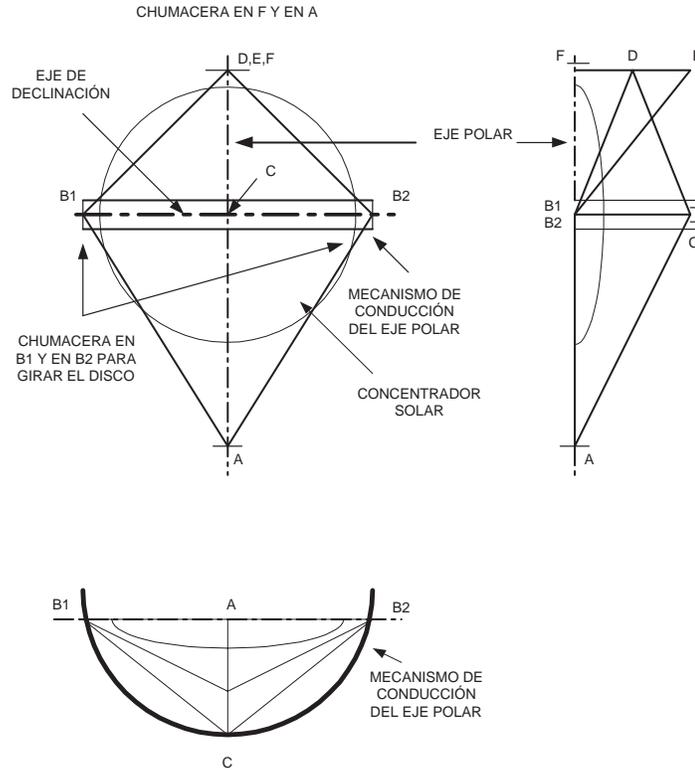


Figura 2.1: Vistas ortogonales de la METAC.

Las dimensiones exactas de la METAC dependen del diámetro del concentrador, así como de la latitud de la instalación. Por lo que se deberán tomar las siguientes consideraciones:

- La distancia desde el eje de declinación al vértice  $A$  será normalmente cercana a 2 veces el radio del concentrador.
- La distancia desde  $B_1$  hasta  $B_2$  es cercana a 2.2 veces el radio del concentrador.
- El total del peso de la METAC es minimizado si el nodo  $E$  se localiza cerca-namente a 1.15 veces el radio del disco, debajo del eje polar.

La mayoría de los miembros de la estructura están sometidos a fuerzas axiales por lo cual solamente pueden trabajar a tensión o compresión. La excepción es el

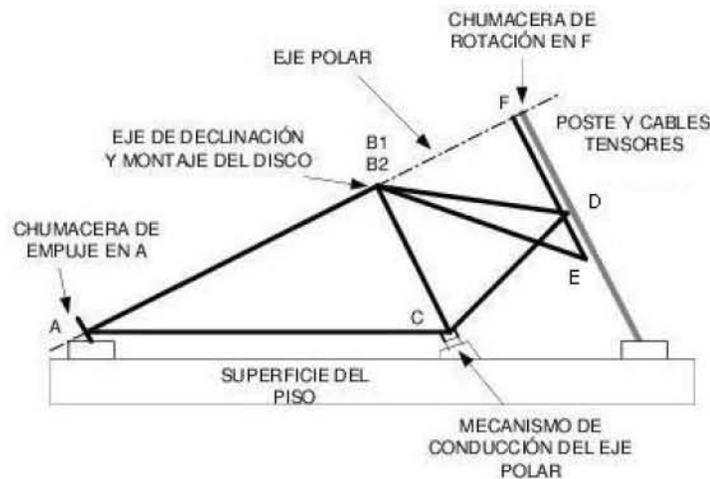


Figura 2.2: Vista de lado de la METAC.

elemento  $EDF$  por lo que éste es la única pieza de la estructura que trabaja a flexión.

Debido a la fuerza de arrastre del viento y al peso del concentrador junto con la estructura se provoca un momento alrededor del nodo  $D$ , pero ni siquiera en este caso, este momento está por debajo del 5% del momento experimentado en una estructura ASP con el disco soportando al viento.

Existe un esfuerzo axial entre  $D$  y  $F$ , pero el esfuerzo axial es mucho menor que el esfuerzo causado por el momento alrededor de  $D$ . Si el elemento  $EDF$  soporta al momento alrededor de  $D$ , éste librará fácilmente el pandeo debido a la fuerza de compresión causada por el viento incidiendo en la cara o en la parte posterior del concentrador. La carga del viento en cada dirección, depende de la posición relativa que tome el concentrador con respecto al mismo, la posición del disco puede ser expresada en función del viento con base en un sistema coordenado polar con la cara del disco y a un ángulo  $\theta$ , alejándose de la fuente de viento y a un ángulo  $\phi$ , en sentido antihorario desde la vertical hacia la fuente de viento.

Con base en estas características se calcularon las dimensiones para el COSPAA-90-II (tabla 2.1) mismas que serán importantes para determinar el diseño mecánico de la estructura.

Así también se construyó una maqueta a escala de la estructura, la cual se puede observar en la figura 2.3.



Figura 2.3: Fotografía de la maqueta de la estructura.

Tabla 2.1: Dimensiones del COSPAA-90-II.

<i>Elemento</i>	<i>L [m]</i>
<i>AC</i>	4.614
<i>AB</i> (2)	4.565
<i>CB</i> (2)	3.183
<i>BD</i> (2)	3.450
<i>CD</i>	2.340
<i>BE</i> (2)	3.870
<i>B<sub>1</sub>B<sub>2</sub></i> (2)	0.400
<i>EDF</i>	2.284

### 2.3. Metodología para el diseño mecánico

Para realizar el diseño mecánico de la estructura se siguió la siguiente metodología determinando así:

1. Posiciones relativas y fuerzas a las que se somete la estructura.
2. Fuerzas de arrastre y de sustentación debidas al viento.
3. Reacciones en nodos  $B_1$  y  $B_2$ .
4. Fuerzas de arrastre  $A$  y peso de la estructura  $W$ .

5. Fuerzas de reacción en los nodos  $B_1$  y  $B_2$ .
6. Reacciones en los nodos  $A$  y  $F$ .
7. Vectores de posición de los nodos  $A$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C$ ,  $D$  y  $E$ .
8. Fuerzas axiales en los nodos  $A$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C$ ,  $D$  y  $E$ .
9. Momento de flexión aplicado en el elemento  $\overline{EF}$ .
10. Dimensionamiento de los elementos de la estructura.
11. Esfuerzo normal al que se somete cada elemento de la METAC.
12. Esfuerzo cortante que actúa en el elemento  $\overline{EF}$ .
13. Esfuerzo normal aplicado en las flechas de acoplamiento: nodos  $A$  y  $F$ .
14. Esfuerzo normal en las flechas de rotación: nodos  $B_1$  y  $B_2$ .
15. Diámetro propuesto y esfuerzo cortante de los pernos de sujeción para unir los elementos de la estructura.

A continuación se presenta el desarrollo de esta metodología.

## Posiciones relativas y fuerzas a las que se somete la estructura

En la figura 2.4 se presentan los Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) de las fuerzas a las cuales estará sometido el concentrador y las cuales son: fuerza de arrastre, fuerza de sustentación y el peso de la estructura. Estas fuerzas dependen de la posición que va tomando el ángulo de referencia del plano del concentrador con respecto a la horizontal y las cuales son: posición inicial (amanecer), intermedia (mediodía) y final (atardecer).

La rotación se realiza con base en un eje coordenado relativo ( $y,z$ ) y con respecto al ángulo complementario ( $\theta'$ ).

Para el rango de las tres posiciones se tomará en cuenta el siguiente intervalo arbitrario:

- Posición inicial a intermedia; se tendrá una rotación del ángulo complementario desde  $70^\circ$  hasta  $0^\circ$ , en sentido antihorario.

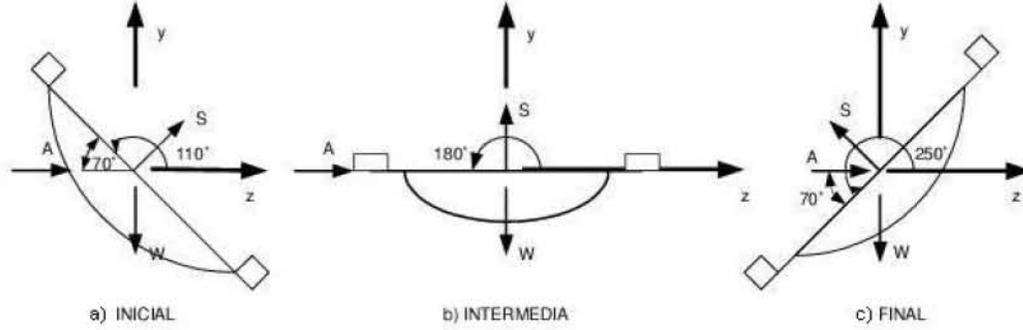


Figura 2.4: Posiciones que toma la METAC, con respecto al eje polar.

- Posición intermedia;  $\theta' = 0$ .
- Posición postintermedia a final; se rotará de 0 a  $-70^\circ$  el ángulo complementario y en sentido antihorario.

De esta forma, el disco junto con la estructura se mantienen en una posición horizontal fija, rotando exclusivamente las fuerzas mencionadas anteriormente con respecto al ángulo complementario  $\theta'$ .

### Fuerzas de arrastre y de sustentación debidas al viento

Las fuerzas de arrastre y de sustentación pueden ser calculados por medio de los polinomios propuestos por Peterka y Derickson[45], que son función de la velocidad del viento que incide en el concentrador, del diámetro del concentrador y del ángulo que forma el plano del concentrador con la horizontal y los cuales se presentan a continuación.

$$A = 0.4815V_{m\acute{a}x}^2 D^2 (1.348 - 0.146\theta - 0.470\theta^2) \quad \text{para } \theta < \frac{\pi}{2} \quad (2.1)$$

$$A = 0.4815V_{m\acute{a}x}^2 D^2 (-1.036 + 0.681\theta) \quad \text{para } \theta > \frac{\pi}{2} \quad (2.2)$$

$$S = 0.4815V_{m\acute{a}x}^2 D^2 (0.020 + 1.367\theta - 0.966\theta^2 + 1.968\theta^3 - 1.228\theta^4) \quad \text{para } \theta < \frac{\pi}{2} \quad (2.3)$$

$$S = 0.4815V_{m\acute{a}x}^2 D^2 \left( 7.660 + 9.131\theta - 3.277\theta^2 + 0.365\theta^3 \right) \text{ para } \theta > \frac{\pi}{2} \quad (2.4)$$

donde:

$D$  = Diámetro del disco.

$V_{m\acute{a}x}$  = Velocidad máxima del viento.

$\theta$  = Ángulo entre la dirección del viento y la dirección del plano del concentrador.

### Reacciones en nodos $B_1$ y $B_2$

Las fuerzas aerodinámicas y el peso transmiten su fuerza en los puntos  $B_1$  y  $B_2$ , consecuentemente estos puntos transmitirán estas fuerzas a los apoyos (nodos  $A$  y  $F$ ), los cuales soportarán a la estructura completa y a cada elemento de ésta.

En la figura 2.5 se presenta el *DCL* del disco y sus soportes  $B_1$  y  $B_2$ , para la posición inicial a intermedia.

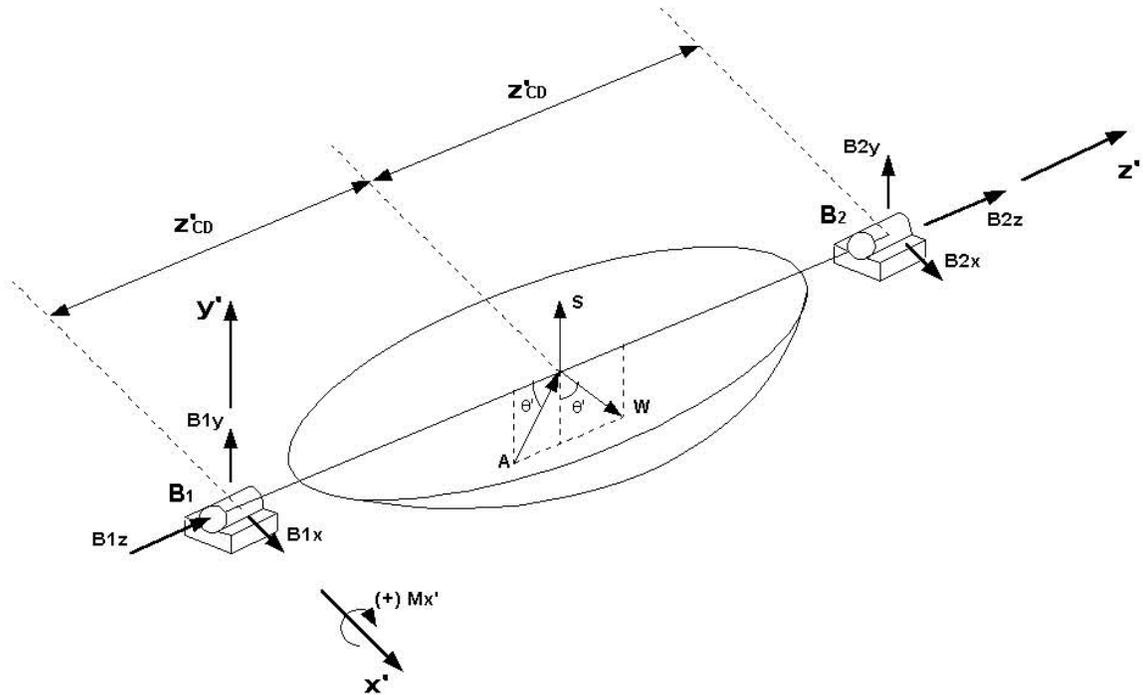


Figura 2.5: DCL en el disco y en las chumaceras de soporte, nodos  $B_1$  y  $B_2$ .

donde:

$A$  = Fuerza de arrastre.

$W$  = Peso total (Peso del disco y de la estructura).

$S$  = Fuerza de sustentación.

Las fuerzas  $A$ ,  $W$  y  $S$  se encuentran en el plano  $(y', z')$

$\theta'$  = Angulo complementario de rotación.

$B_{1y}$  = Reacción en la chumacera eje  $y'$  nodo  $B_1$ .

$B_{1z}$  = Reacción en la chumacera eje  $z'$  nodo  $B_1$ .

$B_{1x}$  = Reacción en la chumacera eje  $x'$  nodo  $B_1$ .

$B_{2y}$  = Reacción en la chumacera eje  $y'$  nodo  $B_2$ .

$B_{2z}$  = Reacción en la chumacera eje  $z'$  nodo  $B_2$ .

$B_{2x}$  = Reacción en la chumacera eje  $x'$  nodo  $B_2$ .

$z'_{CD}$  = Distancia desde la chumacera hasta el centro del disco.

El  $DCL$  para las posiciones intermedia a final es idéntico al de la figura 2.5, excepto que las fuerzas  $A$  y  $W$  cambian al sentido contrario, como se observa en la figura 2.4.

### Fuerzas de arrastre $A$ y peso de la estructura $W$

- Intervalo de rotación de  $110^\circ$  a  $180^\circ$ , las componentes de  $A$  y  $W$  son:

$$A_{z'} = A \cos \theta' \quad (2.5)$$

$$A_{y'} = A \sin \theta' \quad (2.6)$$

$$W_{z'} = W \sin \theta' \quad (2.7)$$

$$W_{y'} = -W \cos \theta' \quad (2.8)$$

- Intervalo de rotación  $181^\circ$  a  $250^\circ$

$$A_{z'} = A \cos \theta' \quad (2.9)$$

$$A_{y'} = -A \operatorname{sen} \theta' \quad (2.10)$$

$$W_{z'} = -W \operatorname{sen} \theta' \quad (2.11)$$

$$W_{y'} = -W \cos \theta' \quad (2.12)$$

### Fuerzas de reacción en los nodos $B_1$ y $B_2$

- Intervalo de rotación de  $110^\circ$  a  $180^\circ$

Aplicando las ecuaciones de equilibrio con base en la figura 2.5, se tiene lo siguiente:

$$\sum F_{z'} = 0 \quad (2.13)$$

$$B_{1z} + B_{2z} + A \cos \theta' + W \operatorname{sen} \theta' = 0 \quad (2.14)$$

$$\sum F_{y'} = 0 \quad (2.15)$$

$$B_{1y} + B_{2y} + S + A \operatorname{sen} \theta' - W \cos \theta' = 0 \quad (2.16)$$

$$\sum M_{x'} = 0 \quad (2.17)$$

$$-2Z'_{cd} B_{2y} - Z'_{cd} S - Z'_{cd} A \operatorname{sen} \theta' + Z'_{cd} W \cos \theta' = 0 \quad (2.18)$$

Despejando  $B_{2y}$  de la ecuación 2.18:

$$B_{2y} = 0.5 \left( -S - A \operatorname{sen} \theta' + W \cos \theta' \right) \quad (2.19)$$

Despejando  $B_{1y}$  de la ecuación 2.16:

$$B_{1y} = \left( -S - A \operatorname{sen} \theta' + W \cos \theta' - B_{2y} \right) \quad (2.20)$$

Para determinar las reacciones en el eje  $z'$  se tiene lo siguiente:

$$B_{1z} = B_{2z} \quad (2.21)$$

Entonces de la ecuación 2.14:

$$B_{2z} = \frac{-A \cos \theta' - W \operatorname{sen} \theta'}{2} \quad (2.22)$$

De esta forma, con las ecuaciones 2.22, 2.21, 2.19 y 2.20, se determinan  $B_{2z}$ ,  $B_{1z}$ ,  $B_{2y}$  y  $B_{1y}$  respectivamente, en el intervalo de rotación de  $110^\circ$  a  $180^\circ$ .

- Intervalo de  $181^\circ$  a  $250^\circ$ .

Aplicando las ecuaciones de equilibrio con base en las figuras 2.5 y 2.4(c), se tiene lo siguiente:

$$\sum F_{z'} = 0 \quad (2.23)$$

$$B_{1z} + B_{2z} + A \cos \theta' - W \operatorname{sen} \theta' = 0 \quad (2.24)$$

$$\sum F_{y'} = 0 \quad (2.25)$$

$$B_{1y} + B_{2y} + S - A \operatorname{sen} \theta' - W \cos \theta' = 0 \quad (2.26)$$

$$\sum M_{x'} = 0 \quad (2.27)$$

$$-2Z'_{cd}B_{2y} - Z'_{cd}S - Z'_{cd}A \operatorname{sen} \theta' + Z'_{cd}W \cos \theta' = 0 \quad (2.28)$$

Despejando  $B_{2y}$  de la ecuación 2.28:

$$B_{2y} = 0.5 \left( -S + A \operatorname{sen} \theta' + W \cos \theta' \right) \quad (2.29)$$

Despejando  $B_{1y}$  de la ecuación 2.26:

$$B_{1y} = \left( -S + A \operatorname{sen} \theta' + W \cos \theta' - B_{2y} \right) \quad (2.30)$$

Para determinar las reacciones en el eje  $z'$  se tiene lo siguiente:

De las ecuaciones 2.21 y 2.24.

$$B_{2z} = \frac{-A \cos \theta' + W \operatorname{sen} \theta'}{2} \quad (2.31)$$

Con las ecuaciones 2.21, 2.30, 2.29 y 2.31, se determinan  $B_{1z}$ ,  $B_{1y}$ ,  $B_{2y}$  y  $B_{2z}$  respectivamente, en el intervalo de rotación de  $181^\circ$  a  $250^\circ$ .

La fuerza de arrastre  $A$ , se obtiene de la ecuación 2.1 la fuerza de sustentación  $S$  se obtiene de la ecuación 2.3 y para el peso  $W$  se propone un peso estimado total.

### Reacciones en los nodos $A$ y $F$

La estructura se soportará en los nodos  $A$  y  $F$ . En la figura 2.6 se presenta el DCL de la METAC.

De acuerdo con la figura 2.6, el eje de referencia se sitúa en el nodo  $A$ .

En el nodo  $A$  se encuentran las siguientes reacciones:  $A_x$ ,  $A_y$ , y  $A_z$ , debido a que se tiene una chumacera de empuje.

En el punto  $F$  se tienen las siguientes reacciones:  $F_y$ , y  $F_z$ , debido que en este nodo se tiene una chumacera simple de giro.

Aplicando las ecuaciones de equilibrio se tiene lo siguiente:

$$\sum F_z = 0 \quad (2.32)$$

$$-F_z - A_z + B_{1z} + B_{2z} = 0 \quad (2.33)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (2.34)$$

$$F_y + A_y + B_{1y} + B_{2y} = 0 \quad (2.35)$$

$$\sum F_x = 0 \quad (2.36)$$

$$A_x = 0 \quad (2.37)$$

$$\sum M_z = 0 \quad (2.38)$$

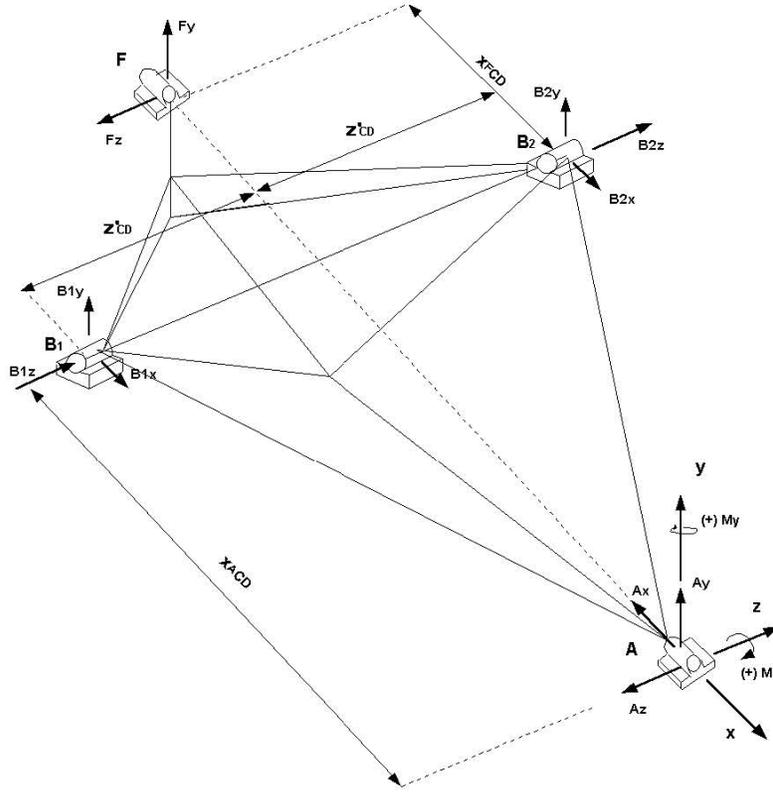


Figura 2.6: Diagrama de Cuerpo Libre de la METAC.

$$x_{AcD}B_{y1} + x_{AcD}B_{y2} + (x_{Fcd} + x_{AcD}) F_y = 0 \quad (2.39)$$

Despejando  $F_y$  de la ecuación 2.39:

$$F_y = \frac{-x_{AcD} (B_{y1} + B_{y2})}{(x_{Fcd} + x_{AcD})} \quad (2.40)$$

$$\sum M_y = 0 \quad (2.41)$$

$$x_{AcD}B_{z1} + x_{AcD}B_{z2} - (x_{Fcd} + x_{AcD}) F_z = 0 \quad (2.42)$$

Despejando  $F_z$  de la ecuación 2.42:

$$F_z = \frac{x_{Acd}(B_{z1} + B_{z2})}{(x_{Fcd} + x_{Acd})} \quad (2.43)$$

Despejando  $A_z$  de la ecuación 2.33:

$$A_z = B_{1z} + B_{2z} - F_z \quad (2.44)$$

Despejando  $A_y$  de la ecuación 2.35:

$$A_y = -B_{1y} - B_{2y} - F_y \quad (2.45)$$

Con las ecuaciones 2.40, 2.43, 2.44 y 2.45, se determinan las reacciones  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $A_z$  y  $A_y$ , respectivamente.

## Vectores de posición de los nodos $A$ , $B_1$ , $B_2$ , $C$ , $D$ y $E$

Una vez determinadas las reacciones en los nodos  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $A$  y  $F$ , se procede a determinar las fuerzas axiales de cada elemento, según el nodo al que pertenezcan. Para realizar esto primero se deberá obtener los vectores de posición de un nodo con respecto a otro. Esto se realizará con base en la figura 2.7, en donde se presentan las coordenadas de cada nodo.

### ■ Nodo A

Del nodo  $A$  al nodo  $B_1$

$$\overrightarrow{AB_1} = \frac{\overrightarrow{B_1} - \overrightarrow{A}}{\sqrt{AB_1}} = \frac{(B_{1x}, 0, B_{1z}) - (0, 0, 0)}{\sqrt{AB_1}} \quad (2.46)$$

$$\overrightarrow{AB_1} = \frac{B_{1x} \hat{i} + B_{1z} \hat{k}}{\sqrt{(B_{1x})^2 + (B_{1z})^2}} \quad (2.47)$$

Componente  $\hat{i}$

$$AB_{1,x} = \frac{B_{1x}}{\sqrt{(B_{1x})^2 + (B_{1z})^2}} \quad (2.48)$$

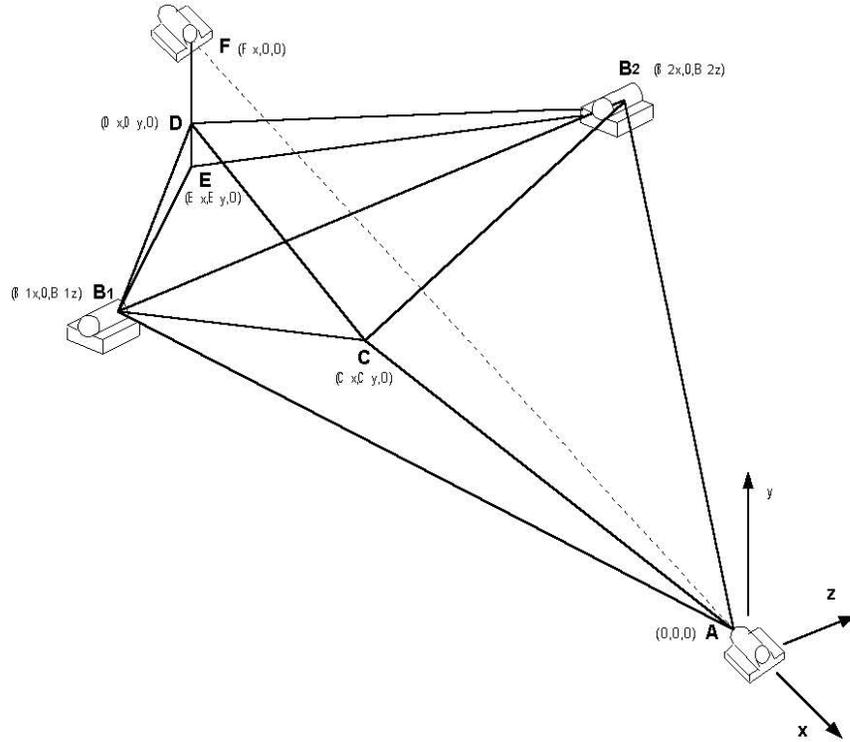


Figura 2.7: Coordenadas de cada nodo de la METAC.

Componente  $\hat{k}$

$$AB_{1,z} = \frac{B_{1z}}{\sqrt{(B_{1x})^2 + (B_{1z})^2}} \quad (2.49)$$

Del nodo  $A$  al nodo  $B_2$

$$\overrightarrow{AB_2} = \frac{B_{2x} \hat{i} + B_{2z} \hat{k}}{\sqrt{(B_{2x})^2 + (B_{2z})^2}} \quad (2.50)$$

Componente  $\hat{i}$

$$AB_{2,x} = \frac{B_{2x}}{\sqrt{(B_{2x})^2 + (B_{2z})^2}} \quad (2.51)$$

Componente  $\hat{k}$

$$AB_{2,z} = \frac{B_{2z}}{\sqrt{(B_{2x})^2 + (B_{2z})^2}} \quad (2.52)$$

Del nodo  $A$  al nodo  $C$

$$\overrightarrow{AC} = \frac{C_x \hat{i} + C_y \hat{j}}{\sqrt{(C_x)^2 + (C_y)^2}} \quad (2.53)$$

Componente  $\hat{i}$

$$AC,x = \frac{C_x}{\sqrt{(C_x)^2 + (C_y)^2}} \quad (2.54)$$

Componente  $\hat{j}$

$$AC,y = \frac{C_y}{\sqrt{(C_x)^2 + (C_y)^2}} \quad (2.55)$$

■ **Nodo C**

Del nodo  $C$  al nodo  $A$

$$\overrightarrow{CA} = -\overrightarrow{AC} \quad (2.56)$$

De las componentes del vector de posición (2.53):

Componente  $\hat{i}$

$$CA,x = - \left( \frac{C_x}{\sqrt{(C_x)^2 + (C_y)^2}} \right) \quad (2.57)$$

Componente  $\hat{j}$

$$CA,y = - \left( \frac{C_y}{\sqrt{(C_x)^2 + (C_y)^2}} \right) \quad (2.58)$$

Del nodo  $C$  al nodo  $B_1$

$$\overrightarrow{CB_1} = \frac{-C_y \hat{j} + B_{1z} \hat{k}}{\sqrt{(-C_y)^2 + (B_{1z})^2}} \quad (2.59)$$

Componente  $\hat{j}$

$$CB_{1,y} = - \left( \frac{C_y}{\sqrt{(-C_y)^2 + (B_{1z})^2}} \right) \quad (2.60)$$

Componente  $\hat{k}$

$$CB_{1,z} = \frac{B_{1z}}{\sqrt{(-C_y)^2 + (B_{1z})^2}} \quad (2.61)$$

Del nodo  $C$  al nodo  $B_2$

$$\overrightarrow{CB_2} = \frac{-C_y \hat{j} + B_{2z} \hat{k}}{\sqrt{(-C_y)^2 + (B_{2z})^2}} \quad (2.62)$$

Componente  $\hat{j}$

$$CB_{2,y} = - \left( \frac{C_y}{\sqrt{(-C_y)^2 + (B_{2z})^2}} \right) \quad (2.63)$$

Componente  $\hat{k}$

$$CB_{2,z} = \frac{B_{2z}}{\sqrt{(-C_y)^2 + (B_{2z})^2}} \quad (2.64)$$

Del nodo  $C$  al nodo  $D$

$$\overrightarrow{CD} = \frac{(D_x - C_x) \hat{i} + (D_y - C_y) \hat{j}}{\sqrt{(D_x - C_x)^2 + (D_y - C_y)^2}} \quad (2.65)$$

Componente  $\hat{i}$

$$CD,x = \frac{(D_x - C_x)}{\sqrt{(D_x - C_x)^2 + (D_y - C_y)^2}} \quad (2.66)$$

Componente  $\hat{j}$

$$CD, y = \frac{(D_y - C_y)}{\sqrt{(D_x - C_x)^2 + (D_y - C_y)^2}} \quad (2.67)$$

■ **Nodo B<sub>1</sub>**

Del nodo B<sub>1</sub> al nodo D

Componente  $\hat{i}$

$$B_1D, x = \frac{(D_x - B_{1x})}{\sqrt{(D_x - B_{1x})^2 + (D_y)^2 + (-B_{1z})^2}} \quad (2.68)$$

Componente  $\hat{j}$

$$B_1D, y = \frac{D_y}{\sqrt{(D_x - B_{1x})^2 + (D_y)^2 + (-B_{1z})^2}} \quad (2.69)$$

Componente  $\hat{k}$

$$B_1D, z = \frac{-B_{1z}}{\sqrt{(D_x - B_{1x})^2 + (D_y)^2 + (-B_{1z})^2}} \quad (2.70)$$

Del nodo B<sub>1</sub> al nodo E

Componente  $\hat{i}$

$$B_1E, x = \frac{(E_x - B_{1x})}{\sqrt{(E_x - B_{1x})^2 + (E_y)^2 + (-B_{1z})^2}} \quad (2.71)$$

Componente  $\hat{j}$

$$B_1E, y = \frac{E_y}{\sqrt{(E_x - B_{1x})^2 + (E_y)^2 + (-B_{1z})^2}} \quad (2.72)$$

Componente  $\hat{k}$

$$B_1E, z = \frac{-B_{1z}}{\sqrt{(E_x - B_{1x})^2 + (E_y)^2 + (-B_{1z})^2}} \quad (2.73)$$

Del nodo  $B_1$  al nodo  $C$

Como:

$$\overrightarrow{B_1C} = -\overrightarrow{CB_1}$$

Entonces del vector de posición 2.59:

Componente  $\hat{j}$

$$B_1C, y = \frac{C_y}{\sqrt{(-C_y)^2 + (B_{1z})^2}} \quad (2.74)$$

Componente  $\hat{k}$

$$B_1C, z = - \left( \frac{B_{1z}}{\sqrt{(-C_y)^2 + (B_{1z})^2}} \right) \quad (2.75)$$

Del nodo  $B_1$  al nodo  $A$

Como:

$$\overrightarrow{B_1A} = -\overrightarrow{AB_1} \quad (2.76)$$

Entonces del vector de posición unitario 2.47:

Componente  $\hat{i}$

$$B_1A, x = - \left( \frac{B_{1x}}{\sqrt{(B_{1x})^2 + (B_{1z})^2}} \right) \quad (2.77)$$

Componente  $\hat{k}$

$$B_1A, z = - \left( \frac{B_{1z}}{\sqrt{(B_{1x})^2 + (B_{1z})^2}} \right) \quad (2.78)$$

Del nodo  $B_1$  al nodo  $B_2$

$$\overrightarrow{B_1B_2} = (k) \quad (2.79)$$

■ **Nodo B<sub>2</sub>**

Del nodo B<sub>2</sub> al nodo D

Componente  $\hat{i}$

$$B_2D, x = \frac{(D_x - B_{2x})}{\sqrt{(D_x - B_{2x})^2 + (D_y)^2 + (-B_{2z})^2}} \quad (2.80)$$

Componente  $\hat{j}$

$$B_2D, y = \frac{D_y}{\sqrt{(D_x - B_{2x})^2 + (D_y)^2 + (-B_{2z})^2}} \quad (2.81)$$

Componente  $\hat{k}$

$$B_2D, z = \frac{-B_{2z}}{\sqrt{(D_x - B_{2x})^2 + (D_y)^2 + (-B_{2z})^2}} \quad (2.82)$$

Del nodo B<sub>2</sub> al nodo E

Componente  $\hat{i}$

$$B_2E, x = \frac{(E_x - B_{2x})}{\sqrt{(E_x - B_{2x})^2 + (E_y)^2 + (-B_{2z})^2}} \quad (2.83)$$

Componente  $\hat{j}$

$$B_2E, y = \frac{E_y}{\sqrt{(E_x - B_{2x})^2 + (E_y)^2 + (-B_{2z})^2}} \quad (2.84)$$

Componente  $\hat{k}$

$$B_2E, z = \frac{-B_{2z}}{\sqrt{(E_x - B_{2x})^2 + (E_y)^2 + (-B_{2z})^2}} \quad (2.85)$$

Del nodo B<sub>2</sub> al nodo C

Como:

$$\overrightarrow{B_2C} = -\overrightarrow{CB_2}$$

Entonces del vector de posición unitario 2.62:

Componente  $\hat{j}$

$$B_2C, y = \frac{C_y}{\sqrt{(-C_y)^2 + (B_{2z})^2}} \quad (2.86)$$

Componente  $\hat{k}$

$$B_2C, z = - \left( \frac{B_{2z}}{\sqrt{(-C_y)^2 + (B_{2z})^2}} \right) \quad (2.87)$$

Del nodo  $B_2$  al nodo  $A$

Como:

$$\overrightarrow{B_2A} = -\overrightarrow{AB_2}$$

Entonces del vector de posición unitario 2.50:

Componente  $\hat{i}$

$$B_2A, x = - \left( \frac{B_{2x}}{\sqrt{(B_{2x})^2 + (B_{2z})^2}} \right) \quad (2.88)$$

Componente  $\hat{k}$

$$B_2A, z = - \left( \frac{B_{2z}}{\sqrt{(B_{2x})^2 + (B_{2z})^2}} \right) \quad (2.89)$$

Del nodo  $B_2$  al nodo  $B_1$

Del vector de posición unitario 2.79

$$\overrightarrow{B_2B_1} = - (k) \quad (2.90)$$

**Fuerzas axiales en los nodos  $A$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C$ ,  $D$  y  $E$** 

Teniendo los vectores de posición unitarios desarrollados anteriormente se determinan las fuerzas axiales en cada elemento de la estructura, utilizando un análisis de nodos y con base en la figura 2.8, en la cual se presenta el DCL de todos los nodos y elementos de la estructura.

**▪ Nodo A**

Los vectores de fuerzas para el nodo  $A$ , con base en la figura 2.8 son:

Desde el nodo  $A$  al nodo  $B_1$

$$\overrightarrow{F_{AB_1}} = F_{AB_1} \overrightarrow{AB_1} \quad (2.91)$$

Del vector de posición 2.47 y sus respectivas componentes 2.48 y 2.49:

$$\overrightarrow{F_{AB_1}} = F_{AB_1} (AB_1 \hat{i} + AB_1 \hat{k}) \quad (2.92)$$

Desde el nodo  $A$  al nodo  $B_2$

$$\overrightarrow{F_{AB_2}} = F_{AB_2} \overrightarrow{AB_2} \quad (2.93)$$

Del vector de posición 2.50 y sus respectivas componentes 2.51 y 2.52:

$$\overrightarrow{F_{AB_2}} = F_{AB_2} (AB_2 \hat{i} + AB_2 \hat{k}) \quad (2.94)$$

Desde el nodo  $A$  al nodo  $C$

$$\overrightarrow{F_{AC}} = F_{AC} \overrightarrow{AC} \quad (2.95)$$

Del vector de posición 2.53 y sus respectivas componentes 2.54 y 2.55:

$$\overrightarrow{F_{AC}} = F_{AC} (AC \hat{i} + AC \hat{j}) \quad (2.96)$$

Los vectores de fuerza para las reacciones  $A_y$ ,  $A_z$  son:

$$\overrightarrow{A_y} = A_y \hat{j} \quad (2.97)$$

$$\overrightarrow{A_z} = A_z \hat{k} \quad (2.98)$$

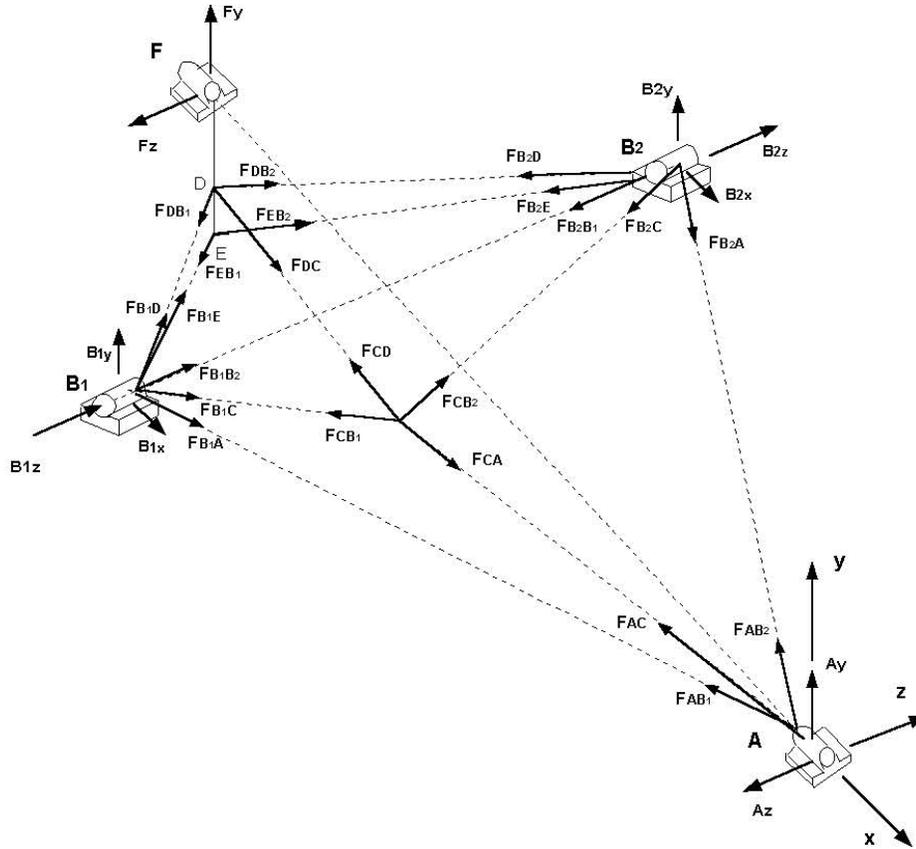


Figura 2.8: Elementos de la METAC.

Sumando las componentes de las ecuaciones 2.92, 2.94, 2.96, 2.97 y 2.98:

Componente  $\hat{i}$

$$AB_{1,x} F_{AB_1} + AB_{2,x} F_{AB_2} + AC,x F_{AC} = 0 \quad (2.99)$$

Componente  $\hat{j}$

$$AC,y F_{AC} = -A_y \quad (2.100)$$

Componente  $\hat{k}$

$$AB_{1,z} F_{AB_1} + AB_{2,z} F_{AB_2} = -A_z \quad (2.101)$$

Con las ecuaciones 2.99 a 2.101 se forma un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, el cual se resuelve para obtener  $F_{AB_1}$ ,  $F_{AB_2}$  y  $F_{AC}$ .

Resolviendo el sistema se tiene lo siguiente:

Despejando  $F_{AC}$  de la ecuación 2.100:

$$F_{AC} = \frac{-A_y}{AC, y} \quad (2.102)$$

Despejando  $F_{AB_1}$  de la ecuación 2.99:

$$F_{AB_1} = \frac{-AB_{2, x} F_{AB_2} - AC, x F_{AC}}{AB_{1, x}} \quad (2.103)$$

Despejando  $F_{AB_1}$  de la ecuación 2.101:

$$F_{AB_1} = \frac{-A_z - AB_{2, z} F_{AB_2}}{AB_{1, z}} \quad (2.104)$$

Igualando las ecuaciones 2.103 y 2.104 y despejando  $F_{AB_2}$ :

$$F_{AB_2} = \frac{(AB_{1, z} AC, x F_{AC} - AB_{1, x} A_z)}{(AB_{1, x} AB_{2, z} - AB_{1, z} AB_{2, x})} \quad (2.105)$$

Con las ecuaciones 2.102, 2.105, 2.103 o 2.104, se determinan  $F_{AC}$ ,  $F_{AB_2}$  y  $F_{AB_1}$  respectivamente.

▪ **Nodo C**

Desde el nodo  $C$  al nodo  $A$

$$\overrightarrow{F_{CA}} = F_{CA} \overrightarrow{CA} \quad (2.106)$$

Del vector de posición 2.56 y sus respectivas componentes 2.57 y 2.58:

$$\overrightarrow{F_{CA}} = F_{CA} (CA \hat{i} + CA \hat{j}) \quad (2.107)$$

Desde el nodo  $C$  al nodo  $B_1$

$$\overrightarrow{F_{CB_1}} = F_{CB_1} \overrightarrow{CB_1} \quad (2.108)$$

Del vector de posición 2.59 y sus respectivas componentes 2.60 y 2.61:

$$\overrightarrow{F_{CB_1}} = F_{CB_1} (CB_1 \hat{j} + CB_1 \hat{k}) \quad (2.109)$$

Desde el nodo  $C$  al nodo  $B_2$

$$\overrightarrow{F_{CB_2}} = F_{CB_2} \overrightarrow{CB_2} \quad (2.110)$$

Del vector de posición 2.62 y sus respectivas componentes 2.63 y 2.64:

$$\overrightarrow{F_{CB_2}} = F_{CB_2} (CB_2 \hat{j} + CB_2 \hat{k}) \quad (2.111)$$

Desde el nodo  $C$  al nodo  $D$

$$\overrightarrow{F_{CD}} = F_{CD} \overrightarrow{CD} \quad (2.112)$$

Del vector de posición 2.65 y sus respectivas componentes 2.66 y 2.67:

$$\overrightarrow{F_{CD}} = F_{CD} (CD \hat{i} + CD \hat{j}) \quad (2.113)$$

Sumando las componentes de las ecuaciones 2.107, 2.109, 2.111 y 2.113:

Componente  $\hat{i}$

$$CD, x F_{CD} = -CA, x F_{CA} \quad (2.114)$$

Componente  $\hat{j}$

$$CB_1, y F_{CB_1} + CB_2, y F_{CB_2} + CD, y F_{CD} = -CA, y F_{CA} \quad (2.115)$$

Componente  $\hat{k}$

$$CB_1, z F_{CB_1} + CB_2, z F_{CB_2} = 0 \quad (2.116)$$

Formándose así el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas con las ecuaciones 2.114 a 2.116 para determinar  $F_{CD}$ ,  $F_{CB_1}$  y  $F_{CB_2}$ .

Al resolver el sistema se tiene lo siguiente:

Despejando  $F_{CD}$  de la ecuación 2.114:

$$F_{CD} = \frac{-CA, x F_{CA}}{CD, x} \quad (2.117)$$

Despejando  $F_{CB_1}$  de la ecuación 2.116:  
y como:

$$B_{2z} = -B_{1z} \quad (2.118)$$

Por consiguiente:

$$F_{CB_1} = F_{CB_2} \quad (2.119)$$

Sustituyendo la ecuación 2.119 en la ecuación 2.115 y despejando  $F_{CB_2}$  :

$$F_{CB_2} = \frac{-CA, y F_{CA} - CD, y F_{CD}}{(CB_1, y + CB_2, y)} \quad (2.120)$$

Con las ecuaciones 2.117, 2.120 y 2.119 se determinan  $F_{CD}$ ,  $F_{CB_2}$  y  $F_{CB_1}$ , respectivamente.  $F_{CA}$  se determinó anteriormente.

■ **Nodo B<sub>1</sub>**

Desde el nodo  $B_1$  al nodo  $A$

$$\overrightarrow{F_{B_1A}} = F_{AB_1} \overrightarrow{B_1A} \quad (2.121)$$

Del vector de posición 2.76 y sus respectivas componentes 2.77 y 2.78:

$$\overrightarrow{F_{B_1A}} = F_{AB_1} (B_1A\hat{i} + B_1A\hat{k}) \quad (2.122)$$

Desde el nodo  $B_1$  al nodo  $C$

$$\overrightarrow{F_{B_1C}} = F_{CB_1} \overrightarrow{B_1C} \quad (2.123)$$

Del vector de posición y sus respectivas componentes 2.74 y 2.75:

$$\overrightarrow{F_{B_1C}} = F_{CB_1} (B_1C\hat{j} + B_1C\hat{k}) \quad (2.124)$$

Desde el nodo  $B_1$  al nodo  $B_2$

$$\overrightarrow{F_{B_1B_2}} = F_{B_1B_2} \overrightarrow{B_1B_2} \quad (2.125)$$

Del vector de posición 2.79:

$$\overrightarrow{F_{B_1B_2}} = F_{B_1B_2} \hat{k} \quad (2.126)$$

Desde el nodo  $B_1$  al nodo  $D$

$$\overrightarrow{F_{B_1D}} = F_{B_1D} \overrightarrow{B_1D} \quad (2.127)$$

Del vector de posición y sus respectivas componentes 2.68, 2.69 y 2.70:

$$\overrightarrow{F_{B_1D}} = F_{B_1D} (B_1D \hat{i} + B_1D \hat{j} + B_1D \hat{k}) \quad (2.128)$$

Desde el nodo  $B_1$  al nodo  $E$

$$\overrightarrow{F_{B_1E}} = F_{B_1E} \overrightarrow{B_1E} \quad (2.129)$$

Del vector de posición y sus respectivas componentes 2.71, 2.72 y 2.73:

$$\overrightarrow{F_{B_1E}} = F_{B_1E} (B_1E \hat{i} + B_1E \hat{j} + B_1E \hat{k}) \quad (2.130)$$

Los vectores de fuerza para las reacciones  $B_{1y}$ ,  $B_{1z}$  son:

$$\overrightarrow{B_{1y}} = B_{1y} \hat{j} \quad (2.131)$$

$$\overrightarrow{B_{1z}} = B_{1z} \hat{k} \quad (2.132)$$

Sumando las componentes de las ecuaciones 2.122, 2.124, 2.126, 2.128, 2.130, 2.131 y 2.132; se tiene lo siguiente:

Componente  $\hat{i}$

$$B_1D, xF_{B_1D} + B_1E, xF_{B_1E} = -B_1A, xF_{AB_1} \quad (2.133)$$

Componente  $\hat{j}$

$$B_1D, yF_{B_1D} + B_1E, yF_{B_1E} = -B_1C, yF_{CB_1} - B_{1y} \quad (2.134)$$

Componente  $\hat{k}$

$$B_1D, zF_{B_1D} + B_1E, zF_{B_1E} + F_{B_1B_2} = -B_1A, zF_{AB_1} - B_1C, zF_{CB_1} - B_{1z} \quad (2.135)$$

Resolviendo el sistema formado por las ecuaciones 2.133 a 2.135 se tiene lo siguiente:

Despejando  $F_{B_1D}$  de la ecuación 2.133:

$$F_{B_1D} = \frac{-B_1A, xF_{AB_1} - B_1E, xF_{B_1E}}{B_1D, x} \quad (2.136)$$

Despejando también  $F_{B_1D}$  de la ecuación 2.134 e igualando con la ecuación 2.136 y despejando  $F_{B_1E}$  :

$$F_{B_1E} = \frac{-B_1D, x(B_1C, yF_{CB_1} + B_1y) + B_1D, yB_1A, xF_{AB_1}}{(B_1D, xB_1E, y - B_1D, yB_1E, x)} \quad (2.137)$$

Despejando  $F_{B_1B_2}$  de la ecuación 2.135:

$$F_{B_1B_2} = -B_1A, zF_{AB_1} - B_1C, zF_{CB_1} - B_1z - B_1D, zF_{B_1D} - B_1E, zF_{B_1E} \quad (2.138)$$

De esta forma, con las ecuaciones 2.136, 2.137 y 2.138 se obtienen  $F_{B_1D}$ ,  $F_{B_1E}$  y  $F_{B_1B_2}$ , respectivamente.

▪ **Nodo  $B_2$**

Desde el nodo  $B_2$  al nodo  $A$

$$\overrightarrow{F_{B_2A}} = F_{AB_2} \overrightarrow{B_2A} \quad (2.139)$$

Del vector de posición y sus respectivas componentes 2.88 y 2.89:

$$\overrightarrow{F_{B_2A}} = F_{AB_2} (B_2A\hat{i} + B_2A\hat{k}) \quad (2.140)$$

Desde el nodo  $B_2$  al nodo  $C$

$$\overrightarrow{F_{B_2C}} = F_{CB_2} \overrightarrow{B_2C} \quad (2.141)$$

Del vector de posición y sus respectivas componentes 2.86 y 2.87:

$$\overrightarrow{F_{B_2C}} = F_{CB_2} (B_2C\hat{j} + B_2C\hat{k}) \quad (2.142)$$

Desde el nodo  $B_2$  al nodo  $B_1$

$$\overrightarrow{F_{B_2B_1}} = F_{B_1B_2} \overrightarrow{B_2B_1} \quad (2.143)$$

Del vector de posición 2.90:

$$\overrightarrow{F_{B_2B_1}} = -F_{B_2B_1} \hat{k} \quad (2.144)$$

Desde el nodo  $B_2$  al nodo  $D$

$$\overrightarrow{F_{B_2D}} = F_{B_2D} \overrightarrow{B_2D} \quad (2.145)$$

Del vector de posición y sus respectivas componentes 2.80, 2.81 y 2.82:

$$\overrightarrow{F_{B_2D}} = F_{B_2D} (B_2D \hat{i} + B_2D \hat{j} + B_2D \hat{k}) \quad (2.146)$$

Desde el nodo  $B_2$  al nodo  $E$

$$\overrightarrow{F_{B_2E}} = F_{B_2E} \overrightarrow{B_2E} \quad (2.147)$$

Del vector de posición y sus respectivas componentes 2.83, 2.84 y 2.85:

$$\overrightarrow{F_{B_2E}} = F_{B_2E} (B_2E \hat{i} + B_2E \hat{j} + B_2E \hat{k}) \quad (2.148)$$

Los vectores de fuerza para las reacciones  $B_{2y}$ ,  $B_{2z}$  son:

$$\overrightarrow{B_{2y}} = B_{2y} \hat{j} \quad (2.149)$$

$$\overrightarrow{B_{2z}} = B_{2z} \hat{k} \quad (2.150)$$

Sumando las componentes de las ecuaciones 2.140, 2.142, 2.144, 2.146, 2.148, 2.149 y 2.150; se tiene lo siguiente:

Componente  $\hat{i}$

$$B_2D, xF_{B_2D} + B_2E, xF_{B_2E} = -B_2A, xF_{AB_2} \quad (2.151)$$

Componente  $\hat{j}$

$$B_2D, yF_{B_2D} + B_2E, yF_{B_2E} = -B_2C, yF_{CB_2} - B_{2y} \quad (2.152)$$

Componente  $\hat{k}$

$$B_2D, zF_{B_2D} + B_2E, zF_{B_2E} - F_{B_2B_1} = -B_2A, zF_{AB_2} - B_2C, zF_{CB_2} - B_{2z} \quad (2.153)$$

Resolviendo el sistema formado por las ecuaciones 2.151 a 2.153 se tiene lo siguiente:

Despejando  $F_{B_2D}$  de la ecuación 2.151:

$$F_{B_2D} = \frac{-B_2A, xF_{AB_2} - B_2E, xF_{B_2E}}{B_2D, x} \quad (2.154)$$

Sustituyendo la ecuación 2.154 en la ecuación 2.152 y despejando  $F_{B_2E}$  se tiene lo siguiente:

$$F_{B_2E} = \frac{-B_2D, x(B_2C, yF_{CB_2} + B_2y) + B_2D, yB_2A, xF_{AB_2}}{(B_2D, xB_2E, y - B_2D, yB_2E, x)} \quad (2.155)$$

Despejando  $F_{B_2B_1}$  de la ecuación 2.153:

$$F_{B_2B_1} = B_2A, zF_{AB_2} + B_2C, zF_{CB_2} + B_2z + B_2D, zF_{B_2D} + B_2E, zF_{B_2E} \quad (2.156)$$

De esta forma, con las ecuaciones 2.155, 2.154 y 2.156 se obtienen  $F_{B_2E}$ ,  $F_{B_2D}$  y  $F_{B_2B_1}$  respectivamente, por lo que quedan determinadas las fuerzas axiales de los elementos de la estructura.

## Momento de flexión aplicado en el elemento $\overline{EF}$

En el elemento  $\overline{EF}$  se presenta un esfuerzo axial entre  $D$  y  $F$ , pero éste es mucho menor que el esfuerzo de flexión causado por las fuerzas en el nodo  $D$ . Si el elemento  $\overline{EF}$  soporta al momento en  $D$  o en  $E$  (que es la misma situación que en  $D$ ), soportará por supuesto al esfuerzo axial.

Para obtener el esfuerzo de flexión se debe obtener primero el momento de  $D$  hasta  $F$ , y después el momento de  $E$  hasta  $F$ . Con base en la figura 2.9 en la cual se presenta el DCL en la dirección  $z$  del elemento  $\overline{EF}$ , esto es:

$$M_{\overline{DF}} = \overline{DF} |F_{RD}| \quad (2.157)$$

donde:

$\overline{DF}$  = Distancia desde  $D$  hasta  $F$ .

$|F_{RD}|$  = Módulo de la fuerza resultante en el nodo  $D$ .

La fuerza resultante en el nodo  $D$  es:

$$\overrightarrow{F_{RD}} = \overrightarrow{F_{DB_1}} + \overrightarrow{F_{DB_2}} \quad (2.158)$$

De los vectores de fuerzas 2.128 y 2.146, con sus respectivas componentes ( $k$ ) :

$$F_{RD} = F_{B_1D} + F_{B_2D} \quad (2.159)$$

Con las ecuaciones 2.159 y 2.157 se obtiene  $F_{RD}$  y  $M_{\overline{DF}}$  respectivamente.

De igual forma se obtiene el momento de E hasta F, con base en la figura 2.9

$$M_{\overline{EF}} = \overline{EF} |F_{RE}| \quad (2.160)$$

donde:

$\overline{EF}$  = Distancia desde  $E$  hasta  $F$ .

$|F_{RE}|$  = Módulo de la fuerza resultante en el nodo  $E$ .

La fuerza resultante en el nodo  $E$  es:

$$F_{RE} = F_{EB_1} + F_{EB_2} \quad (2.161)$$

Lo cual se obtiene de las ecuaciones 2.137 y 2.155 respectivamente.

## 2.4. Dimensionamiento de los elementos de la estructura

Al tener las fuerzas que actúan en cada miembro de la METAC, se pueden obtener las dimensiones de los diámetros requeridos para cada tubo (que pueden ser tubos redondos o cuadrados). Es por esto que se requiere determinar el diámetro medio mínimo para cada elemento.

### Elementos que trabajan a tensión o compresión

Este análisis se realiza de la siguiente forma:

Utilizando la ecuación para pandeo de columnas (Timoshenko[46]):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI N^2}{4L^2} \quad (2.162)$$

y despejando el momento de inercia:

$$I = \frac{4L^2 P_{cr}}{\pi^2 E N^2} \quad (2.163)$$

De la expresión para determinar el momento de inercia para un cilindro hueco:

$$I = \frac{\pi \phi_m^2 \varepsilon}{8} \quad (2.164)$$

donde:

$\varepsilon$  = Espesor de la pared del tubo.

$\phi_m$  = Diámetro medio del tubo.

Igualando la ecuación 2.164 con la ecuación 2.163:

$$\frac{\pi \phi_m^2 \varepsilon}{8} = \frac{4L^2 P_{cr}}{\pi^2 E N^2} \quad (2.165)$$

como:

$$\varepsilon = FR\phi_m \quad (2.166)$$

Sustituyendo la ecuación 2.166 en la ecuación 2.165 y despejando  $\phi_m$  :

$$\phi_m^3 = \frac{32L^2 P_{cr}}{FR\phi_m \pi^3 E N^2} \quad (2.167)$$

$$\phi_m^4 = \frac{32L^2 P_{cr}}{FR\pi^3 E N^2} \quad (2.168)$$

$$\phi_m = \left( \frac{32L^2 P_{cr}}{FR\pi^3 E N^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.169)$$

donde:

$FR$  = Relación del porcentaje del espesor de la pared del tubo con respecto al diámetro medio del tubo.

Con la ecuación 2.169 se obtiene el diámetro medio mínimo que se requiere en cada miembro de la estructura.

**Elemento  $\overline{EF}$** 

Para este elemento se requiere conocer el módulo de sección mínimo requerido.

De la siguiente expresión:

$$S_s = \frac{M_{m\acute{a}x}}{\sigma_{m\acute{a}x_{per}}} \quad (2.170)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x_{per}} = \frac{\sigma_y}{FS} \quad (2.171)$$

Sustituyendo la ecuación 2.170 en la ecuación 2.171:

$$S_s = \frac{FS M_{m\acute{a}x}}{\sigma_y} \quad (2.172)$$

donde:

$S_s$  = Módulo de sección mínimo requerido en el elemento  $\overline{EF}$ .

$\sigma_{m\acute{a}x_{per}}$  = Esfuerzo normal máximo permisible por el material.

$\sigma_y$  = Esfuerzo de deformación plástica del material.

$M_{m\acute{a}x}$  = Momento máximo de flexión ecuaciones 2.157 en el nodo  $D$  y 2.160 nodo  $E$ .

$FS = 2$  = factor de seguridad.

En la tabla 2.2, se presentan el valor del esfuerzo de deformación plástica de los aceros estructurales comerciales más comunes:

Tabla 2.2: Esfuerzo de deformación plástica de aceros estructurales.

<i>ACERO</i>	$\sigma_y$ [MPa]
<i>ASTM – A36</i>	250
<i>ASTM – A572</i>	340
<i>ASTM – A514</i>	700

## Esfuerzo normal al que se somete cada elemento de la ME-TAC

Para determinar el esfuerzo normal al cual está sometido cada tubo de la estructura se obtiene primero el esfuerzo normal máximo permisible por el material, el cual se determina por medio de la ecuación 2.171. Después, el esfuerzo normal de cada tubo se obtiene como:

$$\sigma_N = \frac{F_T}{A_T} \quad (2.173)$$

donde:

$F_T$  = Fuerza axial en cada miembro de la estructura.

$A_T$  = Área de la sección transversal en cada miembro de la estructura.

Al determinar el esfuerzo normal en cada tubo, se procederá a comparar éste con el esfuerzo normal máximo permisible por el material (ecuación 2.171). Esto es:

$$\sigma_{máx_{per}} > \sigma_N \quad (2.174)$$

De esta forma se asegura que el esfuerzo normal al que está sometido cada tubo quedará por debajo del máximo permisible por el material.

## Esfuerzo cortante que actúa en el elemento $\overline{EF}$

Realizando un DCL en el elemento  $\overline{EF}$  (Ver figura 2.9), el esfuerzo cortante es:

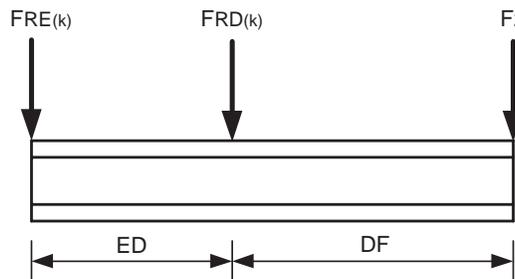


Figura 2.9: Diagrama de cuerpo libre en el elemento  $\overline{EF}$  debido a las fuerzas del nodo  $E$ ,  $D$  y punto  $F$ .

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{|V_{m\acute{a}x}|}{A_a} \quad (2.175)$$

donde:

$$|V_{m\acute{a}x}| = V_{m\acute{a}x_E} = F_{RE}$$

O también se puede presentar en:

$$|V_{m\acute{a}x}| = V_{m\acute{a}x_D} = F_{RD}$$

$A_a$  = Área de la sección.

De esta forma se deberá cumplir la siguiente desigualdad:

$$\tau_{m\acute{a}x_{per}} > \tau_N \quad (2.176)$$

donde:

$\tau_{m\acute{a}x_{per}}$  Esfuerzo cortante máximo permisible.

$$\tau_{m\acute{a}x_{per}} = \frac{\tau_y}{F.S.}$$

$\tau_y$  Esfuerzo cortante de fluencia del material.

## Esfuerzo normal aplicado en las flechas de acoplamiento: nodos $A$ y $F$

- Flecha nodo  $A$

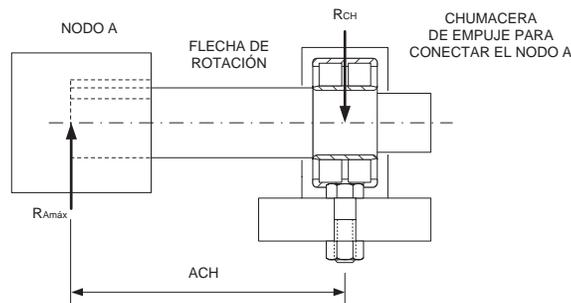


Figura 2.10: DCL del acoplamiento del nodo  $A$  a la chumacera de empuje.

De la figura 2.10, el esfuerzo normal es:

$$\sigma_{máxfA} = \frac{|M_{máxA}|c}{I_{fa}} \quad (2.177)$$

donde:

$|M_{máxA}|$  = Momento cortante máximo en la flecha

$$|M_{máxA}| = ACH R_{Amáx} \quad (2.178)$$

$ACH$  = Longitud de la flecha  $A$ .

$R_{Amáx}$  = Fuerza resultante de las reacciones en el nodo  $A$ .

$$R_{Amáx} = \sqrt{(A_y)^2 + (A_z)^2} \quad (2.179)$$

$c$  = Radio de la flecha.

$A_y$  = Reacción en el nodo  $A$ , dirección  $y$ .

$A_z$  = Reacción en el nodo  $A$ , dirección  $z$ .

Al calcular el esfuerzo normal se deberá de verificar lo siguiente:

$$\sigma_{máx_{per}} > \sigma_{máxf} \quad (2.180)$$

donde:

$\sigma_{máx_{per}}$  se obtiene de la ecuación 2.171:

- Flecha punto  $F$

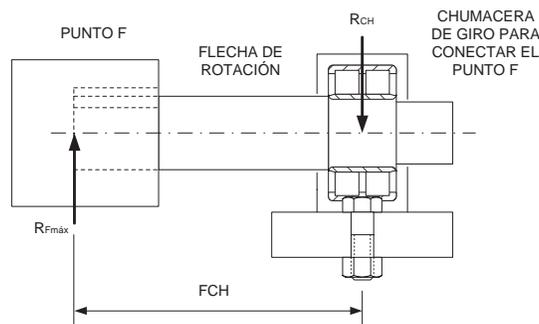


Figura 2.11: DCL del acoplamiento del punto  $F$  con la chumacera de giro.

De igual forma que para el nodo  $A$  y de la figura 2.11:

$$\sigma_{máxfF} = \frac{|M_{máxF}| c}{I_{ff}} \quad (2.181)$$

donde:

$|M_{máxF}|$  = Momento cortante máximo en la flecha.

$$|M_{máxF}| = FCH R_{Fmáx} \quad (2.182)$$

$FCH$  = Longitud de la flecha  $F$ .

$R_{Fmáx}$  = Fuerza resultante de las reacciones en el nodo  $F$ .

$$R_{Fmáx} = \sqrt{(F_y)^2 + (F_z)^2} \quad (2.183)$$

$F_y$  = Reacción en el nodo  $F$ , dirección  $y$ .

$F_z$  = Reacción en el nodo  $F$ , dirección  $z$ .

Por lo cual deberá cumplirse la desigualdad 2.180.

Para el caso de las flechas de rotación de los puntos  $A$  y  $F$ , se deberá especificar un diámetro inicial, así como las distancias desde cada punto a cada chumacera. Con los datos propuestos se deberá de obtener los esfuerzos normales y compararlos con la desigualdad 2.180.

### **Esfuerzo normal en las flechas de rotación: nodos $B_1$ y $B_2$**

Las flechas que soportan el disco  $B_1D_{isco}$  y  $B_2D_{isco}$  además de presentar un esfuerzo axial debido a las fuerzas  $F_{B_1B_2}$  y  $F_{B_2B_1}$ , soportarán también un esfuerzo normal, debido a que trabajan en flexión.

De la figura 2.12:

$$\sigma_{máxfB_1Disco} = \frac{|M_{máxB_1}| c_{B_1D}}{I_{B_1D}} \quad (2.184)$$

donde:

$|M_{máxB_1}|$  = Momento cortante máximo en la flecha  $B_1D_{isco}$ .

$$|M_{máxB_1}| = B_1D_{isco} B_{1y} \quad (2.185)$$

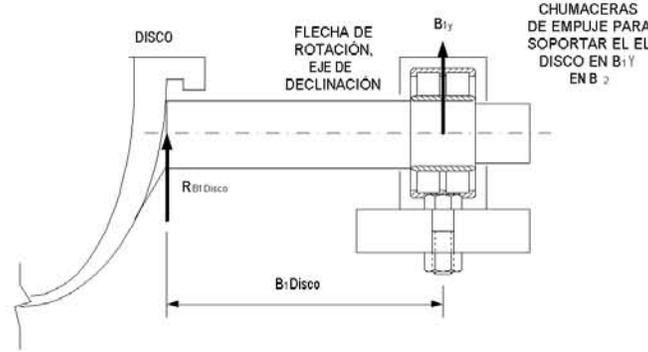


Figura 2.12: Flecha que unirá y soportará el nodo  $B_1$  al disco, mismo caso para  $B_2$  al disco.

$I_{B_1D}$  = Momento de inercia de la flecha  $B_1D_{isco}$ .

$$I_{B_1D} = \frac{\pi \phi_{B_1Disco}^4}{64} \quad (2.186)$$

donde:

$\phi_{B_1Disco}$  = Diámetro propuesto para la sección  $B_1D_{isco}$ .

$B_{1y}$  = Reacción en el nodo  $B_1$  (chumacera en  $B_1$ ), dirección  $y$ .

Del principio de superposición:

$$\sigma_{TmáxB_1Disco} = \sigma_{AxialB_1Disco} + \sigma_{máxfB_1Disco} \quad (2.187)$$

donde:

$\sigma_{AxialB_1Disco}$  = Esfuerzo axial en el elemento  $B_1B_2$  el cual se obtiene por medio de la ecuación 2.173:

De esta forma se deberá satisfacer la siguiente desigualdad:

$$\sigma_{máxper} > \sigma_{TmáxB_1Disco} \quad (2.188)$$

donde:

$\sigma_{máxper}$  = Esfuerzo máximo permisible, el cual se obtiene de la ecuación 2.171, para lo cual se deberá seleccionar un material adecuado.

Para la flecha  $B_2D_{isco}$  se obtiene de igual forma, cambiando exclusivamente los subíndices  $B_1$  por  $B_2$  de las ecuaciones 2.184 a 2.188.

## Diámetro propuesto y esfuerzo cortante de los pernos de sujeción para unir los elementos de la estructura

Para armar la estructura completa, se deberá tener una forma fácil, práctica y segura. Esto se puede lograr al sujetar o fijar cada elemento a su respectivo par de nodos por medio de pernos.

Para determinar el esfuerzo cortante al cual estará sometido cada perno y así saber que es seguro, se tendrá lo siguiente:

- Se propone un diámetro inicial para el perno de sujeción.
- Se calcula el área de la sección transversal de este diámetro del perno.

$$A_p = \frac{\pi \phi_p^4}{4} \quad (2.189)$$

Se obtiene el esfuerzo cortante al cual estará sometido el perno con el diámetro propuesto.

$$\tau_p = \frac{F_{pt}}{A_p} \quad (2.190)$$

donde:

$F_{pt}$  = Fuerza axial a la cual se somete cada elemento de la estructura, ecuaciones 2.102, 2.104, 2.105, 2.117, 2.119, 2.120, 2.136, 2.137, 2.138, 2.154, 2.155 y 2.156 respectivamente a cada tubo.

Asimismo, se deberá satisfacer la desigualdad 2.176 con  $\tau_y$  del material del perno.

## 2.5. Diseño mecánico de la estructura

Con base en el análisis desarrollado anteriormente, se procedió a calcular todos los parámetros para cada grado de rotación de la METAC.

De esta forma se tienen los resultados completos en cada rotación, encontrando así los resultados para los diámetros mínimos requeridos por cada elemento de la estructura, los esfuerzos normales a los que se somete cada elemento. También se encontrarán los diámetros adecuados para las flechas de rotación de la METAC en el nodo  $A$  y el punto  $F$ . Este procedimiento de cálculo se realizó en Excel, debido a la gran cantidad de operaciones requeridas.

En la figura 2.13 se observan los resultados obtenidos de los diámetros mínimos requeridos para cada elemento de la METAC, en función de la rotación que este mismo puede tomar cuando esté en funcionamiento en la plataforma solar del CIE.

Así por ejemplo, para el caso del elemento *AC*, deberá tener un diámetro mínimo que va desde 30 *mm* con 110° de rotación hasta 38 *mm* con 250° y presentando el máximo valor de 44 *mm* con un ángulo de rotación de 210°. Por ello se tomará al menos el valor de 45 *mm* de diámetro para dicho elemento.

De igual forma, en la figura 2.14 se observan los resultados de los esfuerzos normales para cada elemento de la METAC y también los esfuerzos cortantes a los que se someten las flechas de rotación del disco y las flechas de rotación de toda la estructura, Nudo *A* y Punto *F*, para cada grado de rotación de la METAC en la plataforma solar.

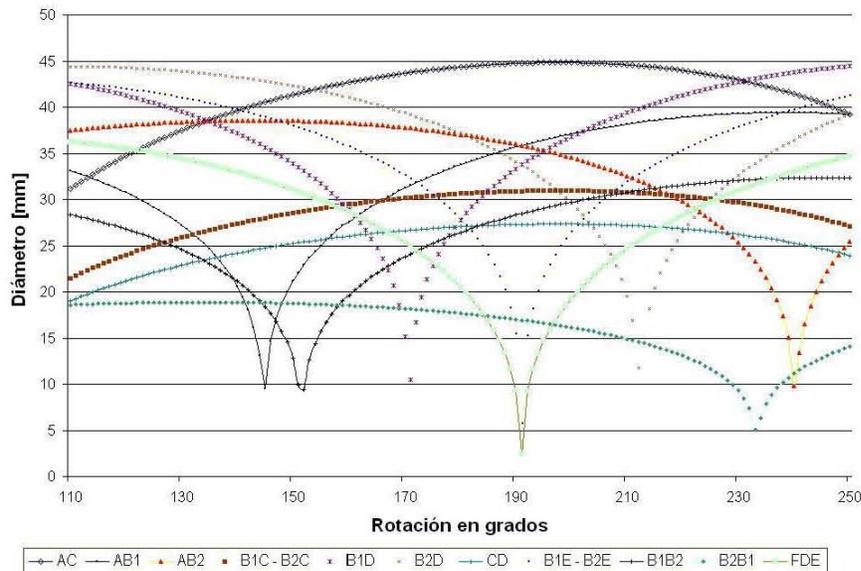


Figura 2.13: Cálculo de los diámetros mínimos requeridos en cada elemento.

En el caso del elemento *AC*, el esfuerzo normal con una posición de 110° corresponde a un valor aproximado de 7 *MPa*, en la posición final de 250° se tiene un valor de 12 *MPa* y se alcanza un valor máximo de 15 *MPa* con una posición de 195°.

Con los resultados obtenidos del análisis se han determinado tres opciones del tipo de material y la forma de las secciones para el diseño y la construcción de la

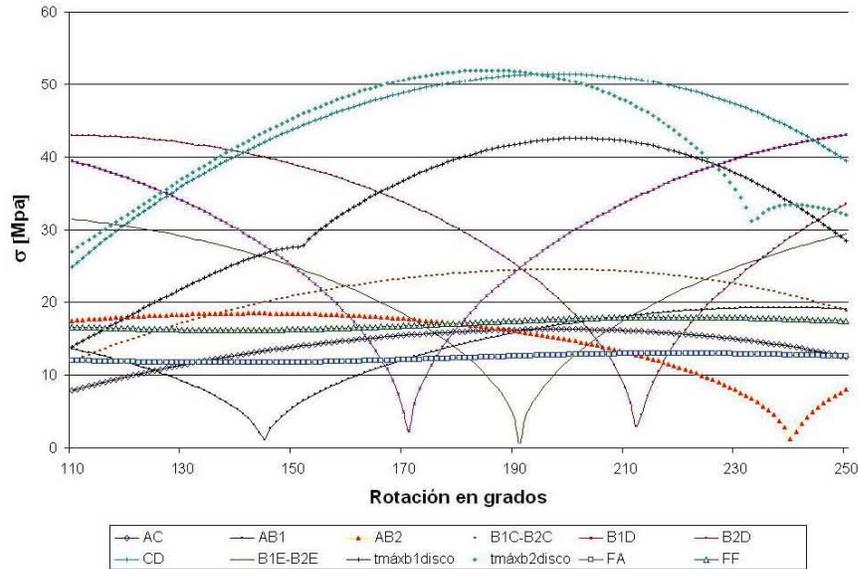


Figura 2.14: Cálculo de los esfuerzos normales en cada elemento de la METAC.

estructura las cuales son las siguientes: Opción 1, tubo industrial calibre 16, Opción 2, tubo mecánico cédula 30 y Opción 3, PTR calibre 14. Estas opciones se han seleccionado debido a que presentan el menor peso por metro de material, además de que son factibles para trabajarse en el taller mecánico del CIE.

En las tablas 2.3, 2.4 y 2.5 se presentan las posibles opciones. Éstas presentan la siguiente información: En la primera y segunda columna se presentan el nombre del elemento de la METAC y la longitud respectivamente. Del diámetro mínimo requerido se seleccionó el diámetro comercial inmediato, el cual se presenta en la tercera columna. En la cuarta columna se presenta el esfuerzo al cual se somete cada elemento de la METAC. El módulo de sección requerido en el elemento  $\overline{EF}$  se presenta en la quinta columna. En la sexta columna se tiene el peso aproximado de cada elemento, y por último en la séptima columna se tiene la masa de los elementos. Para estas columnas se presenta un peso y masa estimada total de todos los elementos de la METAC.

**Opción 1**

Tabla 2.3: Material: Tubo industrial calibre 16 ( $\varepsilon = 1.65 \text{ mm}$ ) Cold rolled.

<i>Elemento</i>	<i>L [m]</i>	$\phi_e$ [ <i>Pulg</i> ]	$\sigma_{tt}$ [ <i>MPa</i> ]	<i>S</i> $\times 10^3$ [ <i>mm</i> <sup>3</sup> ]	$W_t$ [ <i>N</i> ]	$m_t$ [ <i>N</i> ]
<i>AC</i>	4.614	$2\frac{1}{2}$	77.082		57.571	5.869
<i>AB</i> (2)	4.565	$2\frac{1}{4}$	55.028		102.378	10.436
<i>CB</i> (2)	3.183	2	58.289		63.336	6.456
<i>BD</i> (2)	3.450	$2\frac{1}{2}$	111.412		86.095	8.776
<i>CD</i>	2.340	2	89.140		23.281	2.373
<i>BE</i> (2)	3.870	$2\frac{1}{4}$	64.342		86.791	8.847
<i>B<sub>1</sub>B<sub>2</sub></i> (2)	0.400					
$\Sigma W, \Sigma m$					<b>433.540</b>	<b>44.194</b>
<i>EF</i>				234.700	613.223	62.510
<i>Disco</i>					2943.000	300.00
$\Sigma W_T, \Sigma m_T$					<b>3989.763</b>	<b>406.704</b>

**Opción 2**

Tabla 2.4: Material: Tubo mecánico cédula 30. Acero AISI 1518.

<i>Elemento</i>	<i>L [m]</i>	$\phi_n$ [ <i>Pulg</i> ]	$\sigma_{tt}$ [ <i>MPa</i> ]	<i>S</i> $\times 10^3$ [ <i>mm</i> <sup>3</sup> ]	$W_t$ [ <i>N</i> ]	$m_t$ [ <i>N</i> ]
<i>AC</i>	4.614	$2\frac{1}{2}$	21.317		208.173	21.220
<i>AB</i> (2)	4.565	2	16.691		337.527	34.406
<i>CB</i> (2)	3.183	$1\frac{1}{2}$	22.939		160.939	16.406
<i>BD</i> (2)	3.450	2	37.603		255.086	26.003
<i>CD</i>	2.340	2	23.989		86.508	8.818
<i>BE</i> (2)	3.870	2	19.516		286.140	29.168
<i>B<sub>1</sub>B<sub>2</sub></i> (2)	0.400					
$\Sigma W, \Sigma m$					<b>1378.589</b>	<b>140.529</b>
<i>EF</i>				234.700	613.223	62.510
<i>Disco</i>					2943.000	300.00
$\Sigma W_T, \Sigma m_T$					<b>4934.812</b>	<b>503.039</b>

### Opción 3

Tabla 2.5: Material: PTR calibre 14 ( $\varepsilon = 1.89 \text{ mm}$ ) acero al carbón 1018.

<i>Elemento</i>	<i>L [m]</i>	$\phi_n$ [Pulg]	$\sigma_{tt}$ [MPa]	<i>S X10<sup>3</sup> [mm<sup>3</sup>]</i>	<i>W<sub>t</sub> [N]</i>	<i>m<sub>t</sub> [N]</i>
<i>AC</i>	4.614	2	16.3		133.543	18.347
<i>AB</i> (2)	4.565	2	14		264.212	36.304
<i>CB</i> (2)	3.183	2	17.7		184.221	17.312
<i>BD</i> (2)	3.450	2	39.6		199.682	27.437
<i>CD</i>	2.340	2	30.87		67.718	7.362
<i>BE</i> (2)	3.870	2	22.67		233.991	30.777
<i>B<sub>1</sub>B<sub>2</sub></i> (2)	0.400		7			
$\Sigma W, \Sigma m$					<b>1083.367</b>	<b>142.249</b>
<i>EF</i>	2.284			93.759	613.223	62.510
<i>Disco</i>					2943.000	300.00
$\Sigma W_T, \Sigma m_T$					<b>4951.682</b>	<b>504.759</b>

Con base en las opciones analizadas se determinó que la opción óptima es la tercera, debido a que esta presenta un peso razonable de acuerdo a las condiciones de diseño. Por otra parte como la fabricación de la METAC se realizó en el taller mecánico del CIE, se llegó a la conclusión que se facilitaba trabajar con secciones cuadradas en lugar de secciones redondas, debido al tipo de herramientas con las que se cuenta en el taller mecánico.

En esta tercera opción, también se ha cambiado el tipo de sección en el elemento  $\overline{EF}$ . Dado que este elemento estará sometido a momentos de flexión importantes se seleccionó una barra hueca en lugar de una viga tipo *I* como en las opciones 1 y 2, disminuyendo considerablemente el peso de la estructura y facilitando el armado de la misma.

Una vez seleccionadas las dimensiones y materiales de los elementos de la METAC, se realizó el diseño mecánico de la estructura de soporte para el COSPAA-90-II.

El COSPAA-90-II (figura 2.15) se compone de los siguientes subsistemas:

- A. Base de la estructura móvil
- B. Soportes de la estructura móvil
- C. Estructura móvil

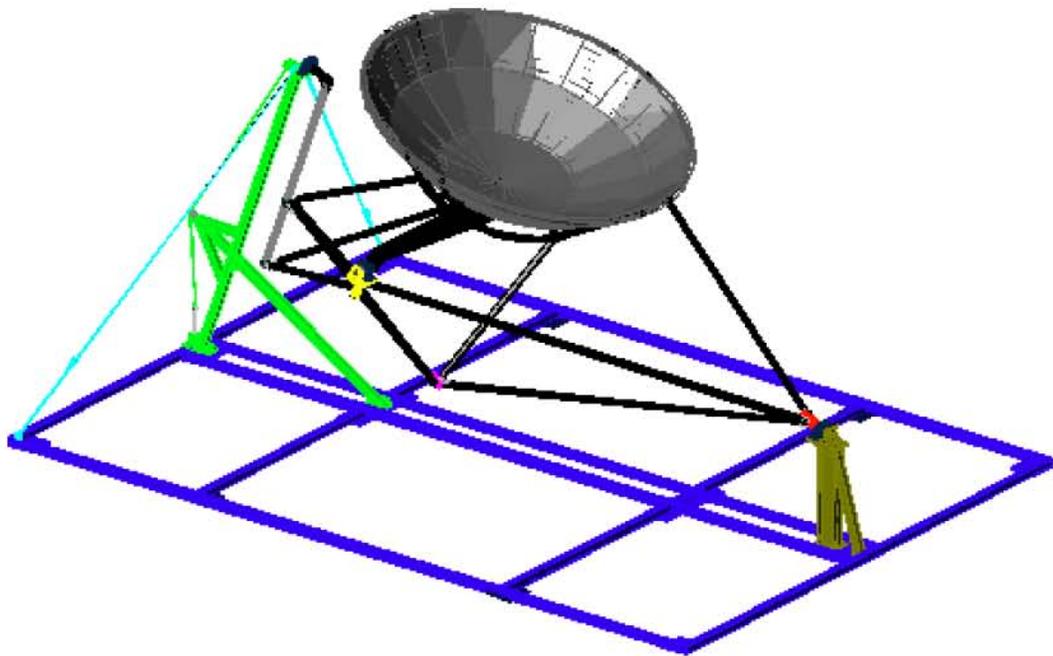


Figura 2.15: COSPAA-90-II.

Las partes que conforman dichos sistemas se presentan a continuación. (figuras 2.16 a 2.25).

### A. Base de la estructura móvil

Esta base se compone de 12 largueros estructurales, la cual se puede apreciar en la figura 2.16. El material seleccionado para este fin es PTR de 76 mm (3"), calibre 11 de acero al carbón 1018. También se tienen 12 placas de acero al carbón A-36, de 12.7 mm ( $\frac{1}{2}$ ") de espesor. Para unir los largueros con las placas base, se han utilizado pernos de acero inoxidable de 12.7 mm ( $\frac{1}{2}$ ") de diámetro y tuercas de seguridad. De esta forma se obtuvo una base rígida y de fácil armado, debido a que el diseño de la base es simétrico, reduciendo así el número de piezas y el tiempo de fabricación.

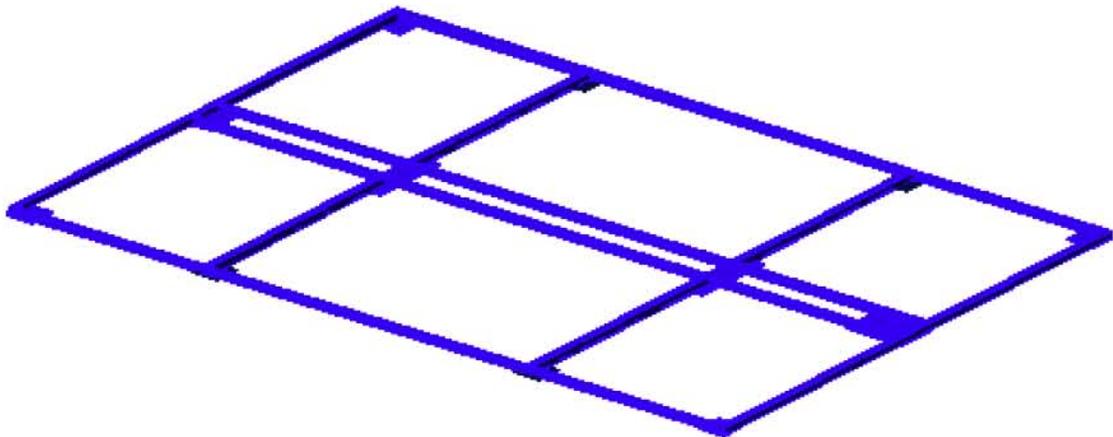


Figura 2.16: Base de la estructura móvil.

## B. Soportes de la estructura móvil

- Soporte *A*

El soporte *A* se compone de tres piezas principales que se observan en la figura 2.17. La pieza 1 es la placa base de la chumacera en el nodo *A*. Esta pieza es fundamental debido a que en ella se coloca una de las dos chumaceras de soporte de la estructura móvil, así como el balero axial para contener las fuerzas axiales en esta dirección. La pieza 2 es el pedestal de la placa base *A* la cual sirve para dar la adecuada altura y el alineamiento requerido en el eje de rotación polar. Por último la pieza 3 sirve de refuerzo al pedestal para contrarrestar las fuerzas axiales del nodo *A*.

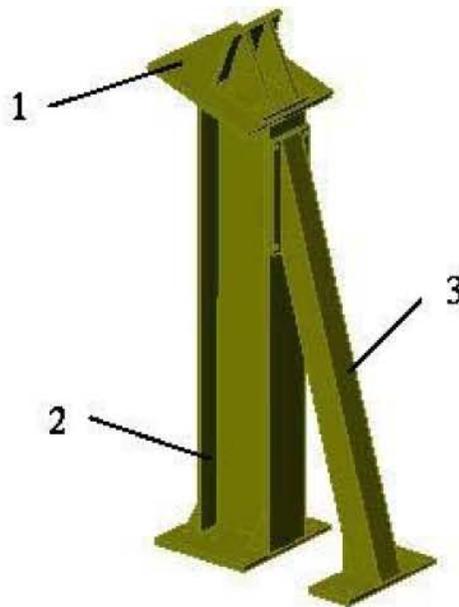


Figura 2.17: Soporte *A*.

■ Poste tensado

De acuerdo a la figura 2.18, el poste tensado (1) es la segunda pieza en importancia de los soportes de la METAC, debido a que en su parte superior se coloca la segunda chumacera de rotación del eje polar. Para lograr que esta pieza tenga una posición correcta se le han acoplado en la parte superior dos tensores (2) para mantenerlo fijo y contrarrestar los efectos de las fuerzas laterales del viento. Estos tensores se acoplan a la base de la estructura móvil. Para mejorar la posición que debe de tener la parte superior del poste tensado se ha diseñado y fabricado un sistema de tensión superior (3) el cual se compone de un cable galvanizado que se tensa en el extremo inferior mediante un tensor y una polea, la cual se apoya en el poste perpendicular al poste tensado. Con el sistema de tensión superior se pretende contrarrestar las fuerzas axiales en el punto  $F$ .

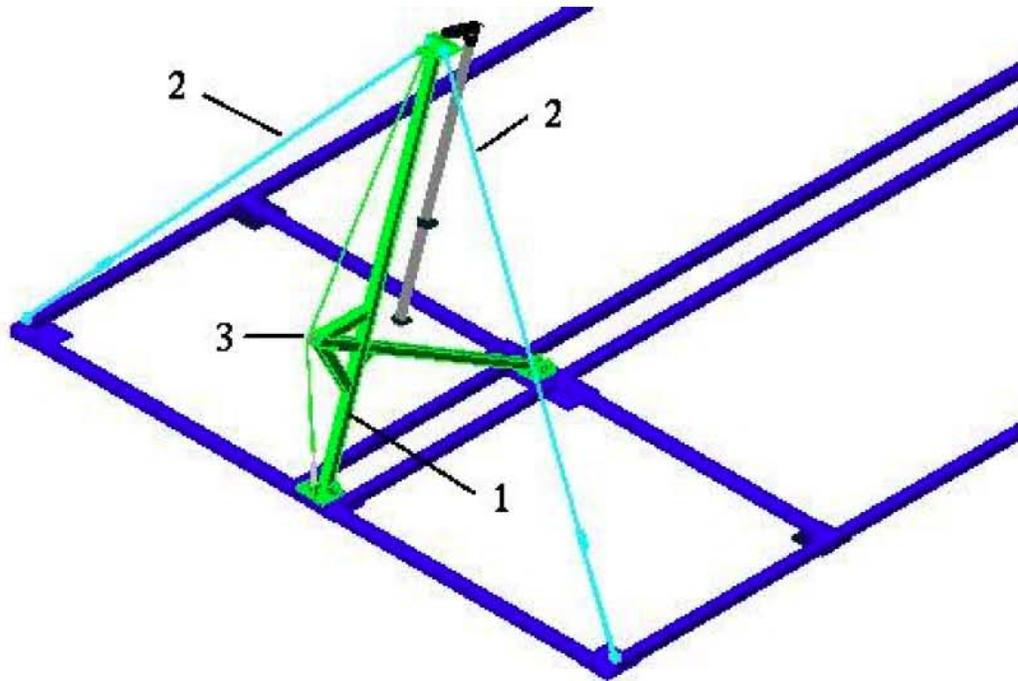


Figura 2.18: Poste tensado.

### C. Estructura móvil

- Soporte  $F$

En la figura 2.19 se observa el arreglo que se ha diseñado para alojar y acoplar la flecha de rotación del punto  $F$  con el elemento  $\overline{EF}$ . La flecha está soportada con una chumacera, misma que se fija con pernos de  $19\text{ mm}$  ( $\frac{3}{4}$ " ) de diámetro, en la parte superior del poste tensado.

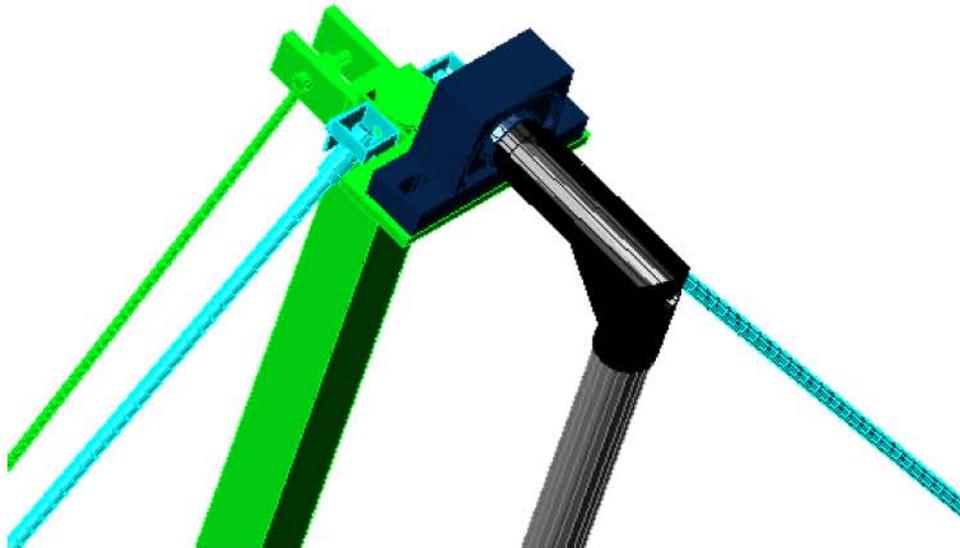


Figura 2.19: Soporte  $F$ .

- Nodo *A*

En la figura 2.20 se presenta el arreglo para acoplar la flecha de rotación del nodo *A* con los elementos *AB* y *AC* de la estructura móvil.

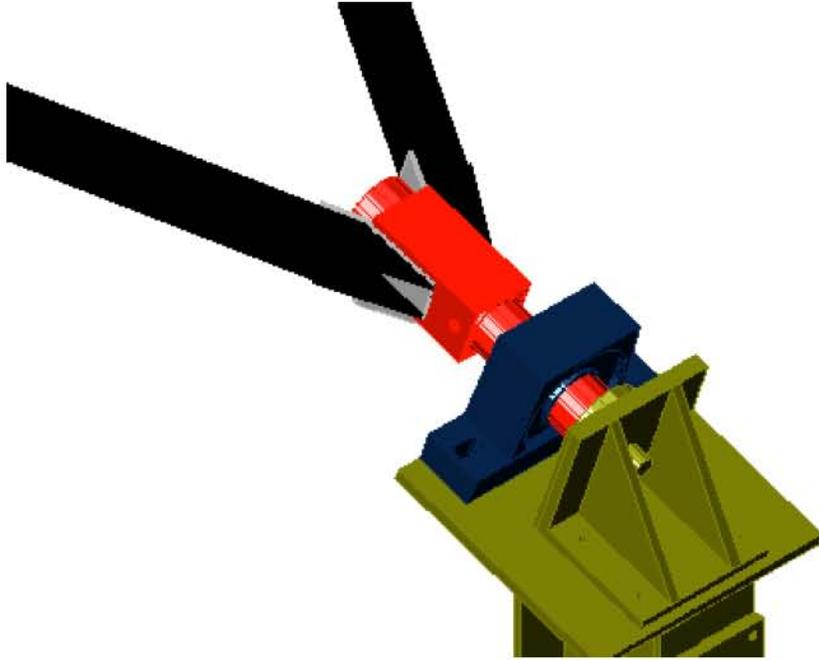


Figura 2.20: Nodo *A*.

- Nodos  $B_1$  y  $B_2$

Los nodos  $B_1$  y  $B_2$  (figura 2.21) alojan a las flechas de rotación del disco. Estos nodos sirven también para acoplar los elementos  $BD$ ,  $BE$ ,  $BC$  y  $BA$  de la estructura móvil.

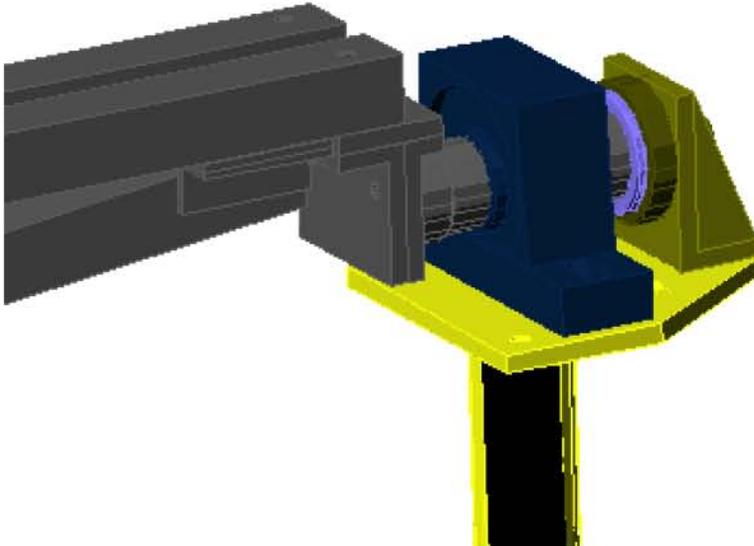


Figura 2.21: Nodos  $B_1$  y  $B_2$ .

■ Nodo  $C$

De igual forma que para los nodos  $B_1$  y  $B_2$ , en la figura 2.22 se observa la forma como se acoplan a este nodo los elementos de la estructura móvil  $AC$ ,  $BC$  y  $DC$ .

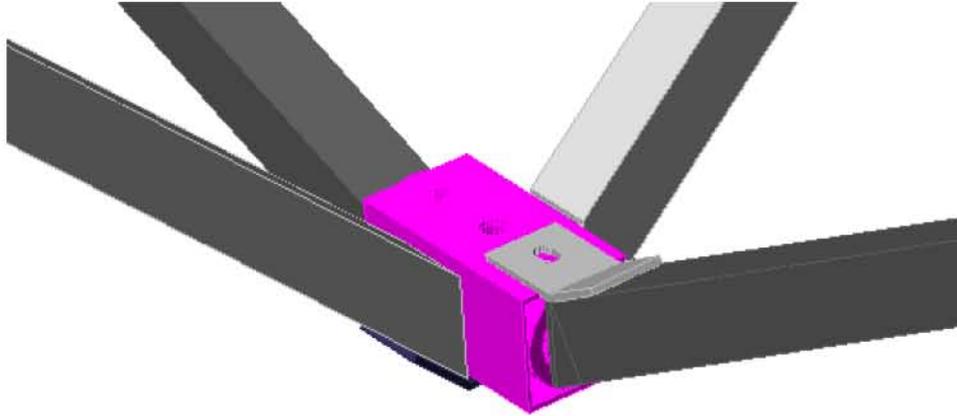


Figura 2.22: Nodo  $C$ .

■ Nodo  $D$

Para el diseño y la fabricación del nodo  $D$  (figura 2.23), se utilizó placa de acero al carbón de  $12.7\text{ mm}$  ( $\frac{1}{2}$ " ) de espesor. Esta pieza va unida al elemento  $\overline{EF}$  por medio de soldadura. En este nodo se acoplan los elementos  $DC$  y  $DB$  de la estructura móvil.

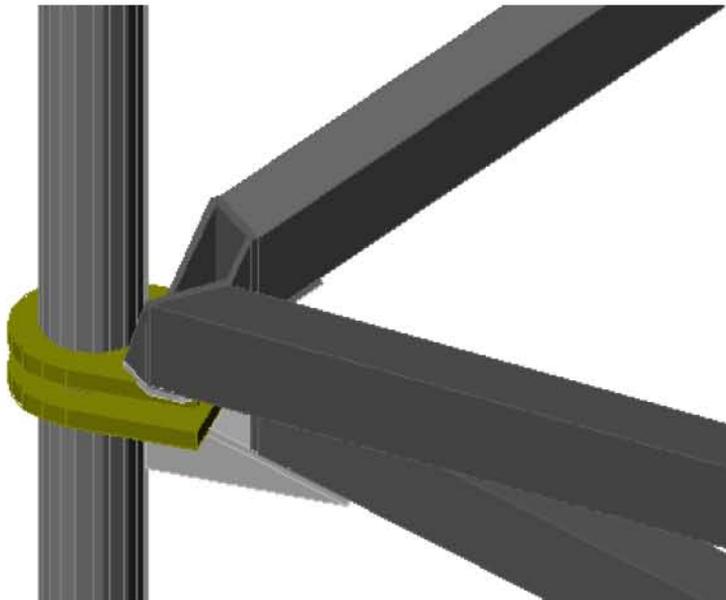


Figura 2.23: Nodo  $D$ .

- Nodo  $E$

La fabricación del nodo  $E$  (figura 2.24), es similar a la del nodo  $D$ . Los elementos que se acoplan a este nodo son los  $BE$ .

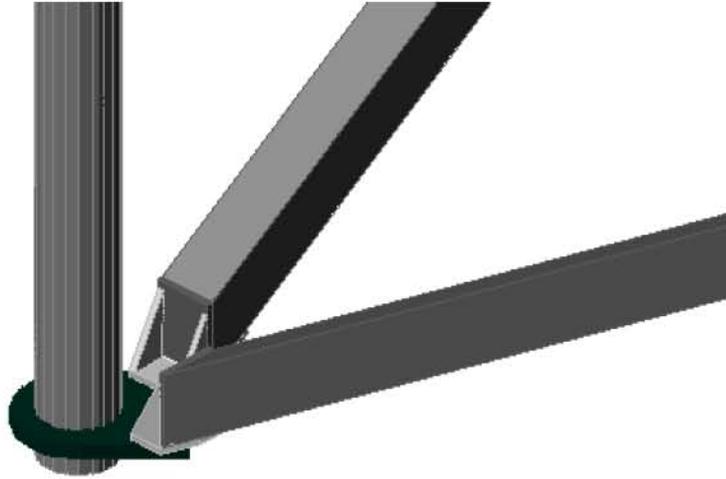


Figura 2.24: Nodo  $E$ .

- Tubos cuadrados

En la figura 2.25 se observan los elementos que conforman a la estructura móvil y los cuales están fabricados de acuerdo a la tabla 2.5. Los elementos se acoplan a los nodos por medio de pernos de acero inoxidable de  $12.7\text{ mm}$  ( $\frac{1}{2}$ " ) de diámetro con tuercas de seguridad.

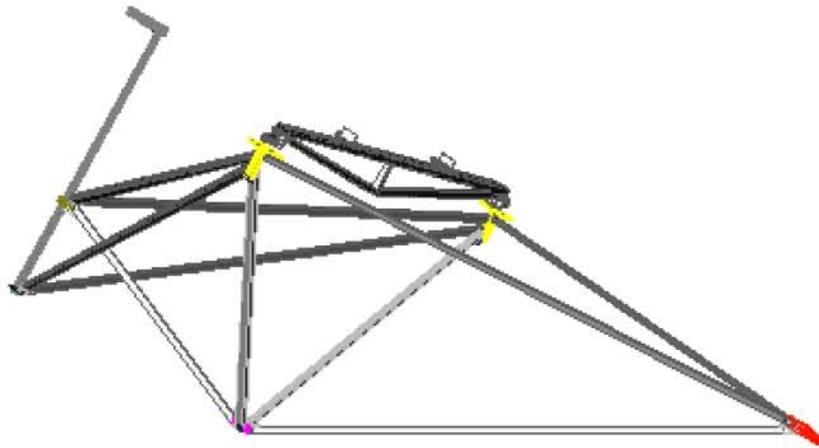


Figura 2.25: Tubos cuadrados.

Se realizaron 100 planos de fabricación para la elaboración de la estructura. En el apéndice A, se presentan algunos de estos planos de los elementos más importantes.

Todos los elementos han sido fabricados y la estructura se encuentra ensamblada en su totalidad. De las figuras 2.26 a la figura 2.33 se muestran fotografías del proceso de ensamble de la estructura del COSPAA-90-II montada sobre la plataforma solar del CIE.



Figura 2.26: Colocación de placas.



Figura 2.27: Colocación del soporte del nodo A.



Figura 2.28: Poste tensado.



Figura 2.29: Ensamble del nodo  $B_1$ .



Figura 2.30: Nodos ensamblados.



Figura 2.31: Soporte del concentrador ensamblado.



Figura 2.32: Vista frontal de la estructura.



Figura 2.33: Vista superior de la estructura.

# 3

## Modelo matemático del receptor

### 3.1. Descripción del problema

Como se describió en el capítulo 1 y con base en la figura 1.10, el funcionamiento del receptor cónico es el siguiente: El receptor capta la energía proveniente del concentrador por medio de las superficies de calentamiento exterior e interior. La energía en forma de calor es removida utilizando agua como fluido térmico, misma que ingresa por la parte inferior del cuerpo del receptor, circulando así por el interior del receptor. Entre las superficies de calentamiento exterior e interior existe un distribuidor de separación de flujo, por medio del cual el agua pasa de la zona de calentamiento exterior a la zona de calentamiento interior y sale por la parte superior del cuerpo del receptor. Como se mencionó anteriormente, las mayores temperaturas de placa se obtienen en la superficie interna, disminuyendo éstas en la superficie externa.

De acuerdo a esto, se puede realizar el balance de energía en el receptor para el proceso de calentamiento mismo que se presenta en la figura 3.1.

### 3.2. Planteamiento del modelo matemático

Para encontrar un modelo matemático representativo en el estado transitorio del calentamiento del receptor se ha realizado el balance de energía con base en la figura 3.1, para lo cual se consideran las siguientes suposiciones:

- Las propiedades termofísicas del fluido y del material del receptor son constantes.

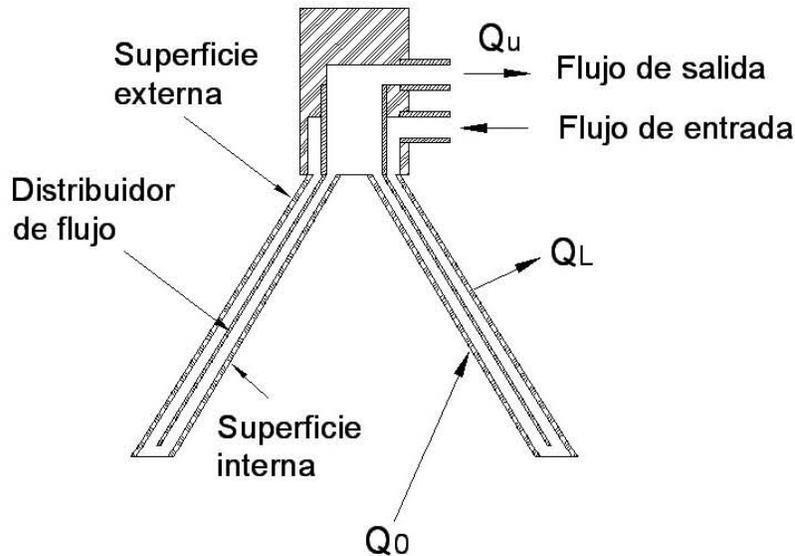


Figura 3.1: Balance de energía en el receptor cónico con flujo de agua.

- Aunque existen distribuciones de temperatura en la superficie en el receptor, se asume que la temperatura en éste es uniforme en toda la superficie, como una primera aproximación.
- La temperatura del agua a la entrada del receptor y la temperatura ambiente son constantes.
- Debido a la complejidad de la geometría del receptor, se supone una relación lineal de la temperatura de salida y la temperatura promedio del receptor de la siguiente forma:

$$T_s = aT + b \quad (3.1)$$

- Las pérdidas de calor al ambiente debidas a la transferencia de calor por convección y radiación se asumen como pérdidas globales de calor.

Así, el balance de energía en estado transitorio del proceso de calentamiento del receptor por el cual circula agua, es el siguiente:

$$Q_{abs} = Q_{sal} \quad (3.2)$$

donde:

$Q_{abs}$  = Es la potencia térmica reflejada por el concentrador y la cual es absorbida por el receptor.

$$Q_{abs} = \alpha_r \rho_c A_c G_b \quad (3.3)$$

$\alpha_r$  = Absortancia de la pintura de recubrimiento del receptor.

$\rho_c$  = Reflectancia del concentrador.

$A_c$  = Área del concentrador.

$G_b$  = Radiación directa que ingresa al concentrador.

$Q_{sal}$  = Potencia térmica que sale y que se almacena en el receptor.

La energía que sale del receptor se compone de las siguientes partes: calor de pérdidas al ambiente, calor útil que se lleva el agua y el incremento en la energía interna del receptor, por lo que se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_{sal} = Q_p + Q_u + \Delta U \quad (3.4)$$

donde:

$Q_p$  = Pérdidas de calor al ambiente.

$Q_u$  = Calor útil.

$\Delta U$  = Incremento de energía interna en el receptor.

El calor de pérdidas se determina de la siguiente forma:

$$Q_p = U_g A_r (T - T_a) \quad (3.5)$$

donde:

$U_g$  = Coeficiente global de pérdidas de calor en el receptor.

$A_r$  = Superficie de calentamiento en el receptor.

$T$  = Temperatura promedio en el receptor.

$T_a$  = Temperatura ambiente.

El calor útil que recibe el fluido que circula por el receptor está dado como:

$$Q_u = \dot{m}_{H_2O} C_{pH_2O} (T_s - T_e) \quad (3.6)$$

donde:

$\dot{m}_{H_2O}$  = Gasto másico del agua que fluye a través del receptor.

$C_{pH_2O}$  = Calor específico del agua.

$T_e$  = Temperatura del agua en la entrada del receptor.

$T_s$  = Temperatura del agua en la salida del receptor.

y la variación de energía interna en el receptor es:

$$\Delta U = m_r C_{pr} \frac{dT}{dt} \quad (3.7)$$

donde:

$m_r$  = Masa del receptor.

$C_{pr}$  = Calor específico del receptor.

$\frac{dT}{dt}$  = Variación de la temperatura promedio en el receptor con respecto al tiempo.

Sustituyendo las ecuaciones 3.2, 3.5, 3.6 y 3.7 en la ecuación 3.4 y agrupando términos se tiene la siguiente ecuación diferencial:

$$m_r C_{pr} \frac{dT}{dt} = Q_{abs} - \dot{m}_{H_2O} C_{pH_2O} (T_s - T_e) - A_r U_L (T - T_a) \quad (3.8)$$

Para resolver la ecuación 3.8 se requiere una expresión auxiliar de la temperatura de salida del fluido en función de la temperatura promedio del receptor, misma que es la ecuación 3.1, por lo que al sustituir esta última en la expresión 3.8, y agrupando términos se tiene lo siguiente:

$$\frac{dT}{dt} = - \left( \frac{\dot{m}_{H_2O} C_{pH_2O} a + A_r U_L}{m_r C_{pr}} \right) T + \left( \frac{Q_{abs} + \dot{m}_{H_2O} C_{pH_2O} (T_e - b) + A_r U_L T_a}{m_r C_{pr}} \right) \quad (3.9)$$

$$\frac{dT}{dt} + \alpha_1 T = \alpha_2 \quad (3.10)$$

Se tiene una ecuación diferencial lineal de 1<sup>er</sup> orden, la cual es del siguiente tipo:

$$\frac{dy}{dx} + P(x) \cdot y = Q(x) \quad (3.11)$$

donde:

$$P(x) = \alpha_1 \quad (3.12)$$

Integrando  $P(x)$  :

$$\int P(x) \cdot dx = \int \alpha_1 \cdot dx = \alpha_1 \cdot x \quad (3.13)$$

Se tiene también que:

$$\mu(x) = e^{\alpha_1 \cdot x} \quad (3.14)$$

Multiplicando la ecuación 3.11 por la ecuación 3.14:

$$\mu(x) \frac{dy}{dx} + P(x) \mu(x) \cdot y = \mu(x) Q(x) \quad (3.15)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.12 y 3.14 en la ecuación 3.15:

$$e^{\alpha_1 \cdot x} \frac{dy}{dx} + \alpha_1 e^{\alpha_1 \cdot x} \cdot y = e^{\alpha_1 \cdot x} Q(x) \quad (3.16)$$

Reagrupando:

$$\frac{d}{dx} (\mu(x) \cdot y) = \mu(x) Q(x) \quad (3.17)$$

$$\frac{d}{dx} (e^{\alpha_1 \cdot x} \cdot y) = e^{\alpha_1 \cdot x} \cdot \alpha_2 \quad (3.18)$$

Cambiando variables:

$$\frac{d}{dx} (e^{\alpha_1 \cdot t} \cdot T) = e^{\alpha_1 \cdot t} \cdot \alpha_2 \quad (3.19)$$

Integrando ámbos términos de la ecuación 3.19:

$$(e^{\alpha_1 \cdot t} \cdot T) = \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) e^{\alpha_1 \cdot t} + C_1 \quad (3.20)$$

Despejando  $T$  de la ecuación 3.20:

$$T = \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) + \frac{C_1}{e^{\alpha_1 \cdot t}} \quad (3.21)$$

Valuando la constante de integración de acuerdo a las condiciones iniciales:

En  $t = 0$  ;  $T = T_a = T_0$

$$T_0 = \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) + \frac{C_1}{e^{\alpha_1 \cdot (0)}} \quad (3.22)$$

$$C_1 = T_0 - \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) \quad (3.23)$$

Sustituyendo en valor de  $C_1$  en la ecuación 3.21:

$$T = \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) + \frac{\left(T_0 - \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)\right)}{e^{\alpha_1 \cdot t}} \quad (3.24)$$

donde:

$$\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) = \frac{\left[\frac{Q_{abs} + m_{H_2O} C_{pH_2O}(T_e - b) + A_r U_L T_a}{m_r C_{pr}}\right]}{\left[\frac{m_{H_2O} C_{pH_2O} a + A_r U_L}{m_r C_{pr}}\right]} \quad (3.25)$$

$$\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) = \frac{Q_{abs} + m_{H_2O} C_{pH_2O} (T_e - b) + A_r U_L T_a}{m_{H_2O} C_{pH_2O} a + A_r U_L} \quad (3.26)$$

$$B = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad (3.27)$$

$$A = \alpha_1 \quad (3.28)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.27 y 3.28:

$$T = B + (T_0 - B) e^{-A \cdot t} \quad (3.29)$$

La ecuación 3.29 es la solución de la ecuación diferencial 3.10 donde A y B serán usados como parámetros libres de ajuste de los datos experimentales encontrados en el capítulo 5, con ésta ecuación.

A continuación se presenta la figura 3.2 en la cual se muestra un ejemplo de la curva esperada mediante la aplicación del modelo matemático del proceso de calentamiento en estado transitorio del receptor.

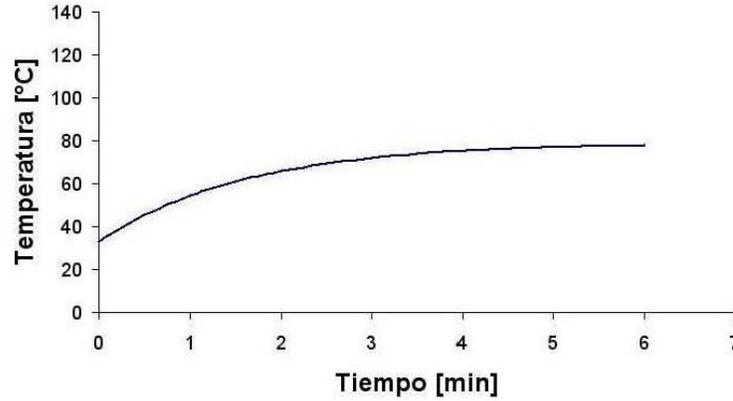


Figura 3.2: Curva característica del modelo matemático.

## Coeficiente global de pérdidas de calor, estado permanente

Un parámetro básico para determinar el comportamiento térmico del receptor es el coeficiente global de pérdidas de calor. Un cálculo aproximado de este coeficiente se puede obtener a partir de considerar la operación del receptor en estado estacionario.

Tomando en cuenta esta consideración y apartir del modelo matemático desarrollado para el proceso de calentamiento presentado en las ecuaciones 3.2 y 3.4, no existe variación de la energía interna en el receptor por lo que se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_{abs} = Q_p + Q_u \quad (3.30)$$

Al sustituir la ecuación 3.5 en la 3.30 y despejando  $U_g$  se obtiene el coeficiente global de transferencia de calor para el estado estacionario.

$$U_g = \frac{Q_{abs} - Q_u}{A_r (T - T_a)} \quad (3.31)$$

# 4

## Instrumentación, diseño y metodología experimental

Debido a que la construcción y armado de la nueva estructura para el seguimiento del movimiento aparente del sol del sistema COSPAA-90-II se retrasó, se determinó hacer el estudio térmico del sistema utilizando la montura ASP del COSPAA-90-I.

### 4.1. Instrumentación y descripción del circuito de circulación del sistema concentrador-receptor

Para realizar la caracterización térmica del sistema COSPAA-90-I se diseñó, montó e instrumentó un circuito hidráulico por medio del cual el agua fluye o circula a través del receptor.

Por medio de la figura 4.1 se describe el diagrama de instrumentación del circuito hidráulico listando sus componentes en la tabla 4.1.

La descripción de la figura 4.1, es la siguiente: para que el agua circule a través del circuito hidráulico, se requiere tener un tanque de alimentación donde esté contenida, para esto se tiene una cisterna (1), de esta forma se garantizará un flujo de agua suficiente durante las pruebas experimentales. El agua es succionada en el ducto de succión de la bomba centrífuga de 1/2 HP (2), a la salida de la bomba se hace pasar por un filtro (3) para eliminar residuos que pueda tener el tanque de alimentación (ver figura 4.2).

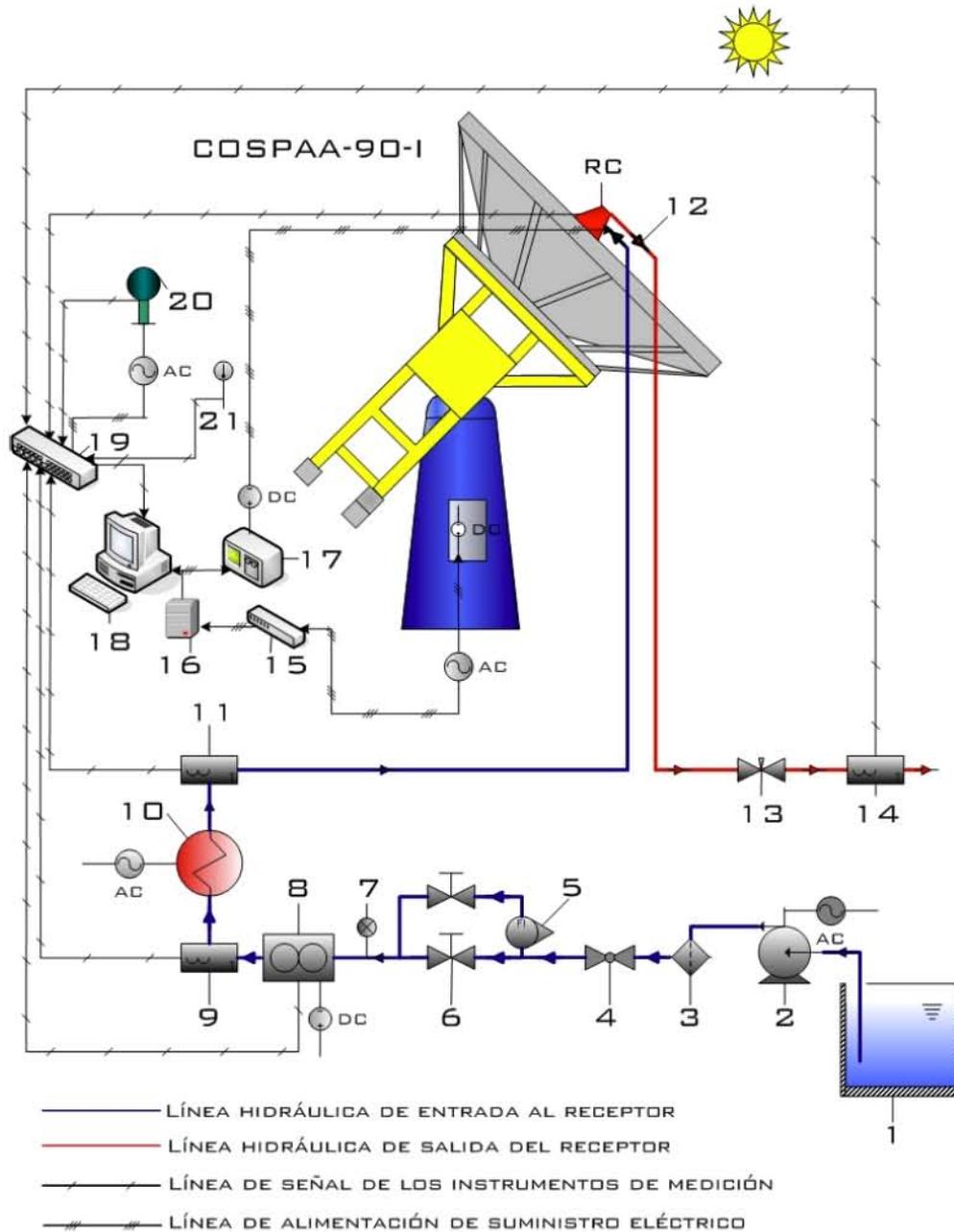


Figura 4.1: Diagrama de instrumentación del circuito hidráulico.

Tabla 4.1: Lista de componentes del diagrama de instrumentación del circuito hidráulico.

1	Tanque de alimentación
2	Bomba centrífuga de 1/2" hp de potencia
3	Filtro de agua
4	Válvula de globo
5	Rotámetro
6	Sistema de bypass con dos válvulas de compuerta
7	Manómetro digital de carátula
8	Medidor de flujo volumétrico analógico
9	Termopar de pozo tipo K
10	Precalentador de agua
11	Termopar de pozo tipo K
12	Instrumentación en el receptor
13	Válvula de aguja
14	Termopar tipo K
15	Supresor de picos
16	Unidad de respaldo de suministro eléctrico
17	Fuente de poder VCD
18	PC
19	Sistema adquisidor de datos (SAD)
20	Pirheliómetro
21	Termopar de temperatura ambiente

Después se tiene una primera válvula reguladora de flujo (4), misma que se utiliza para variar el gasto volumétrico que circula en el circuito hidráulico, al salir de ésta válvula se tiene un sistema de bypass en el cual se tiene un rotámetro (5) para tener una primera referencia en la regulación del gasto volumétrico, para lograr esto primero se cierra totalmente la válvula de compuerta inferior (6) manteniendo la válvula superior completamente abierta. A la salida del bypass se conecta un manómetro digital de carátula (7) y con este instrumento se puede verificar la correcta presurización de la línea hidráulica (ver figura 4.3)

La medición del flujo volumétrico se realiza por medio de un instrumento "Signet Scientific flowmeter modelo MK-508" (8) al cual se le suministró un voltaje de 10 VDC proveniente de la fuente de alimentación (17). Durante la calibración



Figura 4.2: Fotografía de la Bomba y filtro.



Figura 4.3: Fotografía del Bypass.

del medidor de flujo, se encontró su ecuación de calibración, la cual se presenta a continuación:

$$\dot{V} = mV_f + b_0 \quad (4.1)$$

donde:

$$m = 10.6347 \text{ l/minVolts}$$

$$b_0 = -0.1867 \text{ l/min}$$

El valor de la incertidumbre para el flujo volumétrico (Baird[47]) es:

$$\delta\dot{V} \pm 0.034 \text{ l/min}$$

Para obtener el flujo volumétrico deseado se regula el flujo por medio de la válvula de globo (4), observando la variación de voltaje en el SAD (19) hasta obtener el voltaje que le corresponde al flujo volumétrico deseado. El medidor de flujo volumétrico entrega una señal de voltaje al SAD Agilent 34970 (19) el cual tiene una tarjeta multiplexora de 20 canales HP 349001A, mismos que se conectan a una PC (14) para el almacenaje de los datos experimentales en la cual está instalado el software BenchLink Data Logger que permite visualizar los datos. El suministro de energía eléctrica al sistema de adquisición de datos, a la PC y a la fuente de alimentación se logra por medio de un supresor de picos de 6 salidas de alimentación (15) y un sistema de respaldo (16) para garantizar que en caso de corte del suministro eléctrico el sistema continúe trabajando (figura 4.4).

A la salida del medidor de flujo se conecta un termopar de pozo tipo K (9), el cual registra la temperatura de entrada del agua un precalentador de 5.5 kW de energía suministrada (10). Este precalentador que se muestra en la figura 4.5, permite variar la temperatura del agua a la entrada del receptor para poder realizar la prueba experimental 3 que se describirá más adelante.

La descripción del precalentador que se presenta en la figura 4.6 es la siguiente: Se compone de un tubo de cobre de 1 m de largo y 12.7 mm (1/2") de diámetro, al cual se le han colocado alrededor 6 resistencias eléctricas longitudinales (cinco de ellas de 1000 W de potencia eléctrica y una de 500 W). Para minimizar las pérdidas de calor al ambiente, se ha aislado térmicamente con un aislante de lana mineral con espesor de 25.4 mm y con papel aluminio en el exterior. La variación del suministro de energía eléctrica al agua se logra al encender o apagar cada resistencia por medio de su interruptor correspondiente.

A la salida del precalentador se conecta otro termopar de pozo tipo K (11) para registrar la temperatura en la salida del mismo. Después de esto el agua circula hacia la entrada del receptor (12) por medio de una manguera de conducción, y



Figura 4.4: Fotografía del Sistema Adquisidor de Datos (SAD).

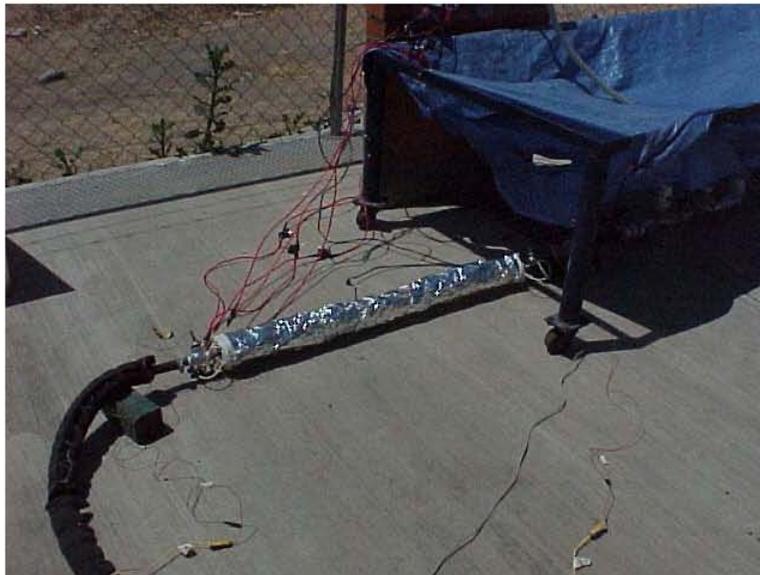


Figura 4.5: Fotografía del precalentador.

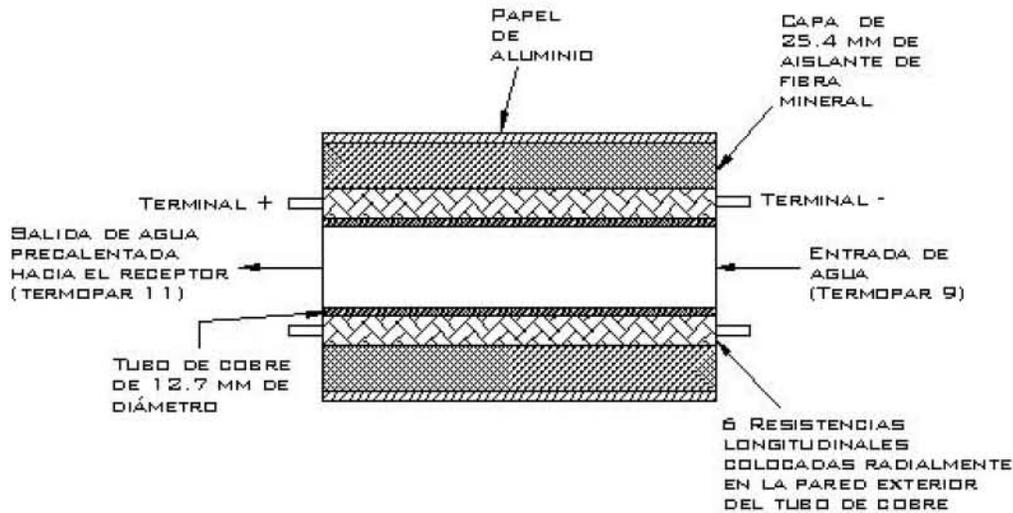


Figura 4.6: Esquema descriptivo del precalentador.

la cual se ha aislado térmicamente. En el receptor se han instrumentado una serie de termopares y sensores de presión tanto a la entrada como a la salida, esto se describirá más adelante. A la salida del receptor se conecta otra manguera del mismo tipo que la de entrada, para después conectar una válvula de aguja de acero al carbón con vástago de acero inoxidable (13). Con esta válvula se puede purgar el aire y después presurizar la línea del circuito hidráulico. Para purgar la línea se cierra completamente la válvula, después se enciende la bomba y se mantiene así cerca de cinco minutos. Después se abre la válvula de aguja una vuelta y se cierra nuevamente, repitiendo este proceso hasta que se observe que ya no sale aire de la línea. Para presurizar la línea se requiere primero cerrar completamente la válvula (ya purgada), al observar una presión de  $241 \text{ kPa}$  ( $35 \text{ lf/pul}^2$ ) por medio del manómetro (7) se puede abrir una vuelta la válvula muy despacio y observando nuevamente que la lectura del manómetro no pase por debajo de  $207 \text{ kPa}$  ( $30 \text{ lf/pul}^2$ ). Otra de las razones principales de esta válvula es para lograr una estrangulación del agua y así poder medir la calidad con la que sale el vapor producido por el concentrador (según el flujo volumétrico utilizado), para esto se requiere conocer la temperatura a la salida de la estrangulación y esto se logra por medio de un termopar de pozo tipo K (14), el cual se conecta al SAD. Un dato importante que se requiere conocer es la radiación solar directa, ya que con este valor se obtiene la energía solar que

incide en el concentrador. Para determinar esta cantidad de energía se utiliza un pirheliómetro Eppley modelo NIP (20) con una constante de  $8.42 \times 10^{-6} \text{Vm}^2\text{W}^{-1}$ , la señal de salida en voltaje de este instrumento se manda al SAD para ser convertido en unidades de radiación solar directa  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . (Ver figura 4.7)



Figura 4.7: Fotografía del pirheliómetro utilizado en la experimentación.

De esta forma se tiene un circuito hidráulico instrumentado que permite realizar diversas pruebas experimentales en el sistema COSPAA-90-I.

## 4.2. Instrumentación de los receptores cónicos

Se tienen dos receptores cónicos diseñados y fabricados especialmente para el COSPAA-I. El primero de ellos es un receptor cónico construido en lámina de cobre el cual se utilizó para conocer la reflectancia del concentrador y de esta forma conocer también la potencia de concentración. El segundo receptor es el descrito en el capítulo 1 cuya función es obtener calor útil del sistema.

## Instrumentación del receptor cónico de cobre

En la figura 4.8 se observa el receptor cónico de cobre y en la figura 4.9 se presentan sus dimensiones.



Figura 4.8: Fotografía del receptor cónico sin remoción de calor.

El primer paso realizado en la instrumentación de este receptor fué lijarlo y limpiarlo totalmente de la pintura con la que se encontraba cubierto originalmente. Después de realizar la limpieza se procedió a pintar nuevamente el receptor con una pintura negra de alta temperatura de la marca COMEX y la cual de pruebas ópticas realizadas a esta pintura se ha encontrado un valor promedio de absorptancia de 0.89 [48]. La razón de utilizar esta pintura es que de acuerdo a las especificaciones del fabricante la pintura puede ser utilizada en aplicaciones con temperaturas cercanas a  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , además otro factor importante es que esta pintura se puede adquirir fácilmente en tiendas de esta marca y a un costo accesible, a diferencia de otras pinturas de este tipo.

Como en este caso lo único que se requiere medir es la temperatura en los primeros instantes del proceso de calentamiento en el receptor y sin flujo de agua a través del mismo (debido a que no está diseñado para remoción de calor), sólomente se requiere instrumentar una cantidad de termopares en diferentes puntos de la superficie interna del receptor.

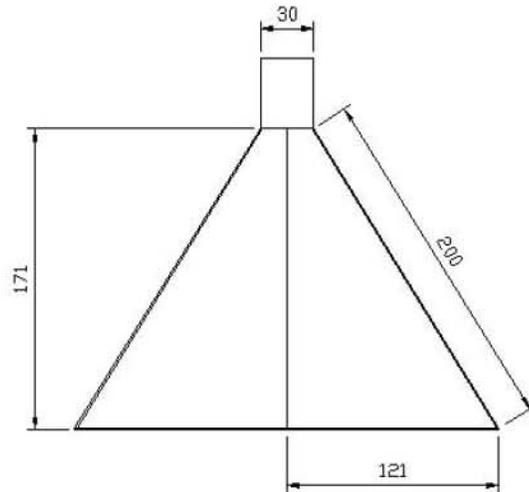


Figura 4.9: Dimensiones del receptor de cobre, acot. en *mm*.

De acuerdo a las distribuciones típicas del flujo radiativo en un receptor cónico se determinó que con 10 termopares se podía conocer adecuadamente la temperatura del promedio pesado en la superficie del receptor y así poder conocer por medio de un balance de energía la reflectancia del concentrador.

De esta forma se fabricaron, calibraron e instalaron 10 termopares tipo K (cromo-aluminio), cubiertos con aislante de alta temperatura. Para la calibración de los termopares se utilizó un equipo para calibración de termopares Jofra, y de los resultados de ésta calibración se comprobó que la tolerancia que presentaron los termopares fabricados se encontraban dentro del valor proporcionado por el fabricante que es de  $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La calibración de los termopares se observa en la figura 4.10.

Para lograr una adecuada distribución en la colocación de los termopares se seccionaron en la superficie externa diez áreas representativas a cada termopar, lo que se observa en la figura 4.11.

Al determinar las áreas específicas para cada termopar, se procedió a colocar a éstos en la superficie interna. Para realizar esto se quitó la tapa de la base del receptor, se marcaron los puntos de contacto de los termopares con la superficie interna, se realizaron barrenos pasados en estos puntos y se colocaron uno a uno cada termopar, fijándolos a la superficie por medio de tornillos y tuercas. Obteniendo y manteniendo así un buen contacto de la punta de cada termopar con la superficie del receptor.



Figura 4.10: Fotografía del proceso de calibración de los termopares.

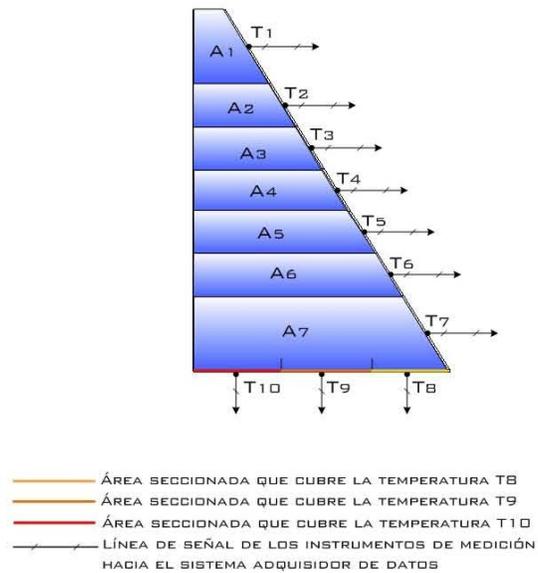


Figura 4.11: Distribución de los termopares en el receptor de cobre.

Después de colocar los termopares en la parte interna del receptor se conectaron éstos al sistema adquirente de datos, calentando al tacto cada uno de ellos y observando la variación de temperatura esperada, asegurando así el correcto funcionamiento de los termopares. Enseguida se cerró la tapa e inmediatamente se acopló en el soporte del concentrador, quedando así listo el receptor para realizar las correspondientes pruebas experimentales.

### **Instrumentación del receptor para producción de calor de proceso**

De igual forma que en el caso anterior, el primer paso realizado en la instrumentación fué lijar y limpiar totalmente el receptor. Después de realizar la limpieza se procedió a pintar el receptor con pintura negra de alta temperatura de la marca COMEX, de esta forma el receptor se encontró listo para colocar la instrumentación.

De acuerdo al funcionamiento del receptor se requieren conocer las temperaturas a la entrada y a la salida del mismo, por consiguiente se ha instrumentado una línea de entrada la cual empieza conectando un cople para la manguera de entrada, después continúa una válvula check para que no se retorne el agua, enseguida se colocó un transductor de presión Cole-Palmer modelo A-68848-40, mismo que se alimenta con 10 VDC de la fuente de alimentación y que entrega una señal de voltaje al SAD. Los transductores de presión se calibraron con ayuda del Laboratorio de Refrigeración y Bombas de Calor del CIE, debido a que en este laboratorio se cuenta con la infraestructura necesaria para tal fin, la colocación de los sensores y el equipo utilizado se observa en las figuras 4.12 y 4.13.

Con esto se determinaron las ecuaciones de calibración de los transductores de presión, conociendo los valores de la presión a la entrada y a la salida del receptor.

La ecuación de calibración del transductor de presión a la entrada es:

$$P [psi] = 247.3 V_{TP} [Volts] - 249.07 \quad (4.2)$$

El valor de la incertidumbre para el transductor de entrada es:

$$\delta P_1 \pm 0.77 \text{ psi}$$



Figura 4.12: Fotografía del equipo utilizado en la calibración de los transductores de presión.

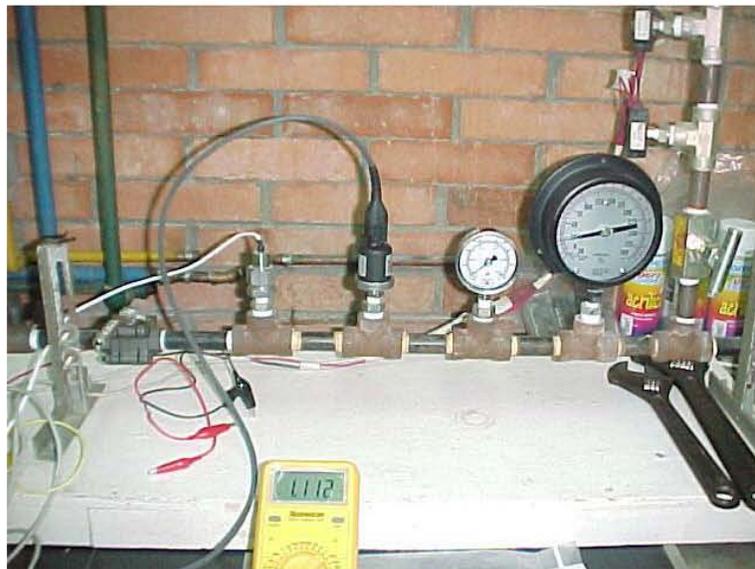


Figura 4.13: Fotografía del sistema de calibración de los transductores de presión.

La ecuación de calibración del transductor de presión a la salida es:

$$P [psi] = 248.81 V_{TP} [Volts] - 249.57 \quad (4.3)$$

El valor de la incertidumbre para el transductor de salida es:  
 $\delta P_2 \pm 1.31 \text{ psi}$

Después de este transductor, se colocó un termopar de pozo tipo K para obtener la temperatura a la entrada del receptor. A la salida del receptor se acopló una línea de salida, a la cual se le agregó otro termopar de pozo tipo K y otro transductor de presión, registrando así la temperatura y la presión en la salida del receptor. Esta línea de salida se acopló a la manguera de salida del circuito hidráulico.

Una aportación importante en la instrumentación de este receptor fué colocar una serie de termopares en la superficie externa y en la cavidad de éste, ya que el diseño original no contemplaba conocer las temperaturas en la superficie del mismo. Esto se logró al construir un soporte especial en forma de riel de acero inoxidable el cual albergaba en su interior a los termopares, evitando así que la radiación reflejada por el concentrador incidiera directamente en ellos, pudiendo de esta forma alterar las mediciones. Cabe mencionar que por medio de este riel la única parte que estaba en contacto con la superficie del receptor era la punta del propio termopar.

En la figura 4.14 se puede observar la distribución de los termopares sobre la superficie del receptor, colocando así, tres termopares en la superficie externa ( $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ ) y los otros tres en la superficie interna ( $T_4$ ,  $T_5$  y  $T_6$ ).

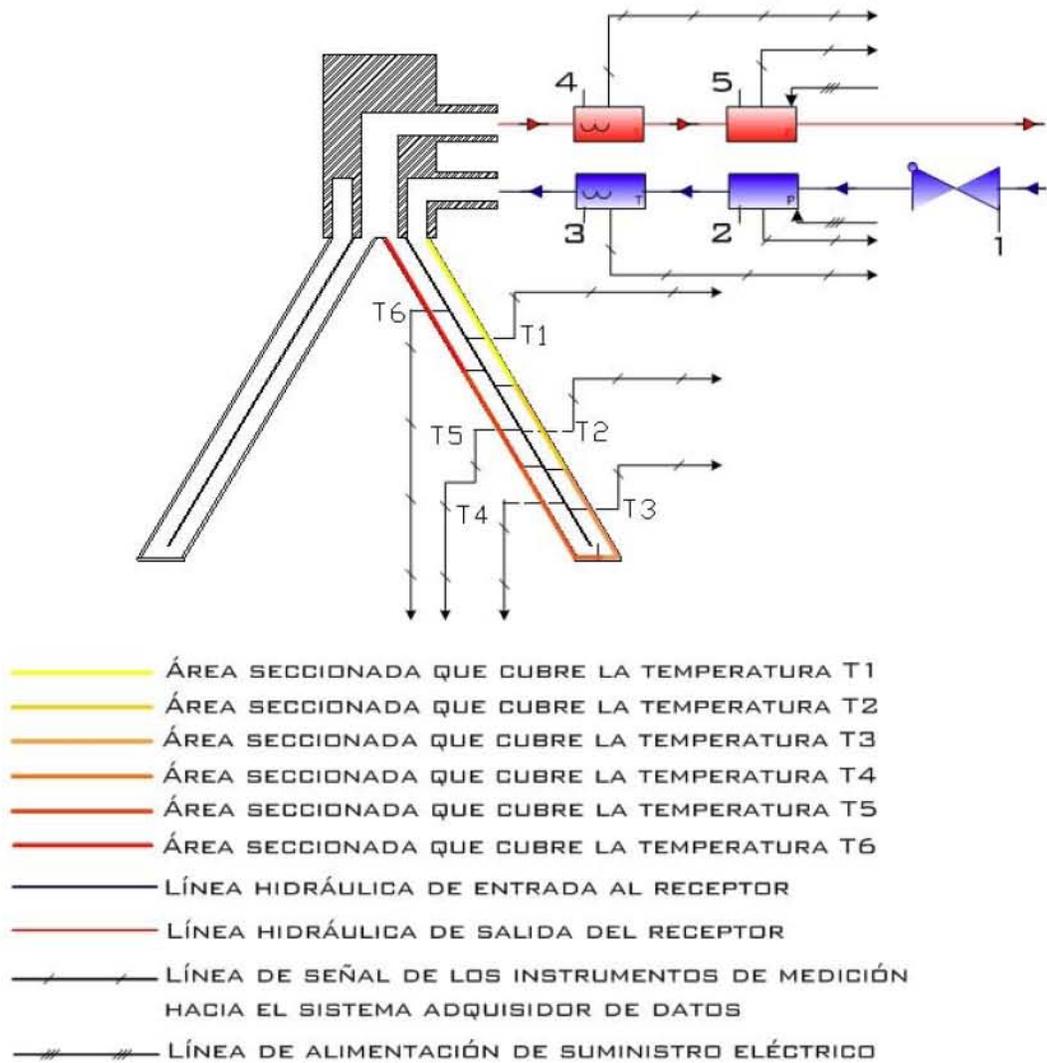


Figura 4.14: Seccionamiento del área del receptor.

En las figuras 4.15 y 4.16 se presenta la instrumentación realizada en el receptor para producción de calor de proceso.



Figura 4.15: Fotografía del acercamiento de la vista de instrumentación del receptor.



Figura 4.16: Fotografía de la vista de la instrumentación del receptor montado en el concentrador.

### 4.3. Diseño de los experimentos

Una vez que la instrumentación ha sido realizada se procede a diseñar los experimentos necesarios para determinar la caracterización térmica del COSPAA-90-I.

#### Experimento 1. Determinación de la reflectancia del concentrador

Para este experimento se utiliza el receptor cónico sin remoción de calor y las variables a medir en este caso son las 10 temperaturas en la superficie interna del receptor. El sistema se debe enfocar al sol y se debe seguir a éste por medio del buscador solar instalado en el borde del concentrador en un intervalo de tiempo. De esta forma se puede obtener una temperatura del promedio pesado en la superficie del receptor para los primeros instantes del proceso de calentamiento, registrando los datos experimentales en el SAD. Como se requiere conocer la variación de la temperatura en un instante de tiempo muy corto el registro de datos se realiza cada 0.1 s. La otra variable importante a medir es la radiación directa solar que incide en el concentrador, misma que se ha obtiene por medio del pirheliómetro.

Para este experimento se tiene lo siguiente:

Con base en la figura 3.1 se realiza un balance de energía en los primeros instantes en el proceso de calentamiento, la energía suministrada al receptor es igual al incremento de energía interna y despreciando las pérdidas de calor al ambiente debido a que  $T_r \simeq T_a$  se obtiene la ecuación 4.4:

$$Q_{abs} = \Delta U \quad (4.4)$$

donde:

$$Q_{abs} = \rho_c \alpha_r A_c G_b \quad (4.5)$$

$$\Delta U = m_R C_{pR} \left( \frac{dT}{dt} \right) \quad (4.6)$$

Igualando al ecuación 4.5 con la ecuación 4.6 y despejando  $\rho_c$  se tiene lo siguiente:

$$\rho_c = \frac{m_R C_{pR} \left( \frac{dT}{dt} \right)}{\alpha_r A_c G_b} \quad (4.7)$$

donde:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_f - T_i}{t_f - t_i} \quad (4.8)$$

$T_i$  es la temperatura promedio en la superficie del receptor de cobre al inicio del experimento.

$T_f$  es la temperatura promedio en la superficie del receptor de cobre después de un intervalo de tiempo.

$t_i = 0$  es el tiempo inicial del experimento.

$t_f =$  es el tiempo después de un intervalo de tiempo.

La experimentación se tiene que realizar en diferentes ocasiones para determinar un valor promedio de la reflectancia del concentrador.

## **Experimento 2. Pruebas de repetitividad en los procesos de calentamiento y enfriamiento del sistema concentrador-receptor**

En este experimento se debe utilizar el receptor para remoción de calor. El sistema se debe enfocar al sol y se debe seguir a éste por medio del buscador solar instalado en el borde del concentrador en un intervalo de tiempo, registrando todos los datos experimentales de los instrumentos de medición contenidos en el circuito hidráulico (a excepción del funcionamiento de precalentador). El experimento se realiza en los estados transitorio y estacionario del proceso de calentamiento a diferentes flujos volumétricos que son 4, 3, 2 , 1 y 0.3 *l/min*, y una vez que se llegue al estado estacionario el cual se observa cuando ya no existen variaciones de temperatura a la entrada y a la salida del receptor, se deberá desenfocar el sistema, esperar a que el receptor se enfrie y volver a realizar el enfoque para lograr un nuevo proceso de calentamiento. Esta prueba se realiza en tres ocasiones para cada flujo estudiado, de esta forma se puede observar el comportamiento del sistema completo y conocer si funciona de manera correcta. El tiempo de registro de los datos experimentales es cada 5 s debido a que la prueba experimental con cada flujo se contempla que dure 1 hora.

### **Experimento 3. Pruebas de variación de temperatura a la entrada del receptor**

En este experimento se utiliza nuevamente el receptor para remoción de calor, sin invertir el sentido de ingreso del agua al receptor. Después de la verificación del funcionamiento correcto del sistema se debe enfocar al sol y se debe seguir a éste otra vez por medio del buscador solar, registrando todos los datos experimentales de los instrumentos de medición contenidos en el circuito hidráulico, además se pone en funcionamiento el precalentador de agua. Durante el desarrollo del experimento se fija un flujo volumétrico empezando de mayor a menor (los flujos volumétricos que se requieren son 5, 4, 3, 2 y 1 *l/min*), y se debe de ir variando la temperatura de entrada al receptor lo cual se logra por medio del precalentador de agua. Para este fin se enciende la primera resistencia eléctrica y se espera un tiempo razonable a que la temperatura de entrada al receptor se estabilice, después se encienden la segunda y la tercera resistencia del precalentador, se estabiliza la temperatura de entrada al receptor y se repite el proceso de encendido de resistencias eléctricas hasta determinar 4 diferentes temperaturas a la entrada del receptor. Dependiendo del flujo volumétrico se encenderán todas o algunas de la resistencias eléctricas. De esta forma se pueden obtener distintos valores de la temperatura de entrada al receptor para los flujos volumétricos mencionados y así determinar una curva de la eficiencia térmica del sistema en el estado estacionario.

## **4.4. Metodología experimental**

A continuación se presenta la metodología experimental que se tiene que realizar en cada experimento.

### **Experimento 1**

1. Se instala el receptor cónico sin remoción de calor previamente instrumentado en el soporte del concentrador solar.
2. Se limpia el concentrador solar con agua abundante, para realizar esto se aplica un chorro de agua durante 5 minutos y con papel húmedo se remueve la tierra que queda en la superficie del concentrador.
3. Se coloca el sistema de adquisición de datos a un lado del COSPAA-90-I, en una posición que al momento de la operación no choque y que los cables de

conexión no se tensen. Ambos sistemas se conectan a la línea de alimentación eléctrica.

4. Se conectan los 10 termopares al sistema de adquisición de datos y se verifica el correcto funcionamiento de cada uno de ellos.
5. Se instala el pirheliómetro en una correcta orientación con respecto al sol y se pone en funcionamiento.
6. Se rota al COSPAA-90-I en una sola dirección hasta que la sombra del receptor sobre el concentrador aparezca alineada con respecto al sol.
7. Se tapa al receptor con una campana especialmente fabricada y en todo proceso de la orientación alguien tiene que mantener a distancia al receptor cubierto de la radiación solar que refleja el concentrador. La persona que realiza esta operación deberá estar cubierta con una bata blanca de manga larga, careta de soldador, guantes de carnaza y casco para cubrir la cabeza.
8. Se activa el escaneo de las temperaturas del receptor y del pirheliómetro en el sistema de adquisidor.
9. Se empieza la alineación hacia arriba del concentrador y por medio del buscador solar se llegará hasta la alineación normal con respecto al sol.
10. Se descubre abruptamente al receptor, quitando la campana para este fin.
11. Se sigue la orientación del sol por 5 minutos más.
12. Se desorienta al sistema bajando al concentrador hasta una posición de enfriamiento.
13. Se suspende el escaneo de los datos experimentales.

## Experimento 2

1. Se instala el receptor cónico para remoción de calor previamente instrumentado en el soporte del concentrador solar y se aíslan las mangueras de circulación, así como los transductores de presión de la radiación solar reflejada por el concentrador.
2. Se limpia el concentrador solar con agua abundante, para realizar esto se aplica un chorro de agua durante 5 minutos y con papel húmedo se se remueve la tierra que queda en la superficie del concentrador.
3. Se coloca el sistema de adquisición de datos a un lado del COSPAA-90-I, en una posición que al momento de la operación no choque y que los cables de conexión no se tensen. Ambos sistemas se conectan a la línea de alimentación eléctrica.
4. Se conectan todos los instrumentos de medición al sistema de adquisición de datos y se verifica el correcto funcionamiento de cada uno de ellos.
5. Se instala el pirheliómetro en una correcta orientación con respecto al sol y se pone en funcionamiento.
6. Se rota al COSPAA-90-I en una sola dirección hasta que la sombra del receptor sobre el concentrador aparezca alineada con respecto al sol.
7. Se enciende la bomba, verificando previamente un llenado del 90% de la capacidad del tanque de alimentación.
8. Se purga y se presuriza el circuito hidráulico.
9. Se regula el flujo volumétrico por medio de las válvulas para este fin, verificando el voltaje de referencia en el sistema adquirente.
10. Se activa el escaneo de todos los datos experimentales por medio del sistema de adquisición.
11. Se empieza la alineación hacia arriba del concentrador y por medio del buscador solar se llegará hasta la alineación normal con respecto al sol.
12. Se sigue la orientación del sol hasta que se presente el estado estacionario en el receptor y se verifica en todo instante el correcto funcionamiento de todo el sistema.

13. Se desorienta al sistema bajando al concentrador hasta una posición de enfriamiento.
14. Se regula nuevamente el flujo volumétrico al siguiente valor requerido.
15. Se repiten nuevamente el proceso de calentamiento y enfriamiento por tres ocasiones más para un mismo flujo volumétrico, según los pasos del 11 hasta el 13.

### **Experimento 3**

1. Una vez que se ha instalado el receptor de remoción de calor sin invertir el sentido de ingreso del agua al receptor se limpia el concentrador solar con agua abundante, para realizar esto se aplica un chorro de agua durante 5 minutos y con papel húmedo se se remueve la tierra que queda en la superficie del concentrador.
2. Del experimento 2 se repiten los pasos del 2 al 12.
3. Se enciende la primera resistencia eléctrica del precalentador y se espera un cierto tiempo hasta que la temperatura de entrada al receptor se estabilice.
4. Se repite el paso 3 hasta encender todas las resistencias utilizadas según el flujo volumétrico.
5. Al terminar con todas las resistencias para un cierto flujo, éste se regula nuevamente al siguiente valor requerido.
6. En forma inversa se apagan una a una las resistencias eléctricas para el nuevo flujo volumétrico, observando un enfriamiento.
7. Se repiten los pasos del 3 al 6 según el caso.

# 5

## Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas experimentales realizadas, se analizan y discuten.

### 5.1. Experimento 1. Determinación de la reflectancia del concentrador

Para este experimento se tienen los siguientes resultados:

Se realizaron tres pruebas experimentales con baja radiación solar directa. En las figuras 5.1 a la 5.6 se presentan las variaciones de las temperaturas y de la temperatura promedio en la superficie del receptor con respecto al tiempo. Esto se realiza en el proceso de calentamiento y sin remoción de calor.

La prueba 1 para este experimento se realizó con una radiación solar directa promedio de  $493.5 \text{ W/m}^2$ . En las figuras 5.1 y 5.2 se observa el proceso de alineamiento del concentrador solar con respecto al sol, el cual se presenta desde el tiempo inicial registrado y hasta aproximadamente después de  $1 \text{ min}$ . Al descubrir el receptor se nota el acentuado incremento de temperaturas en la superficie del mismo desde el primer minuto de la prueba y hasta  $30 \text{ s}$  después de estar expuesto el receptor a la radiación reflejada por el concentrador. Para este caso se han registrado temperaturas promedio en la superficie desde  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  y hasta  $210 \text{ }^\circ\text{C}$  en un tiempo de  $30 \text{ s}$ , alcanzando un valor máximo de  $275 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este gran incremento de temperaturas ocurre debido a que en el receptor no existe remoción de calor y por otra parte el receptor está construido de lámina de cobre, la cual presenta una alta conductividad

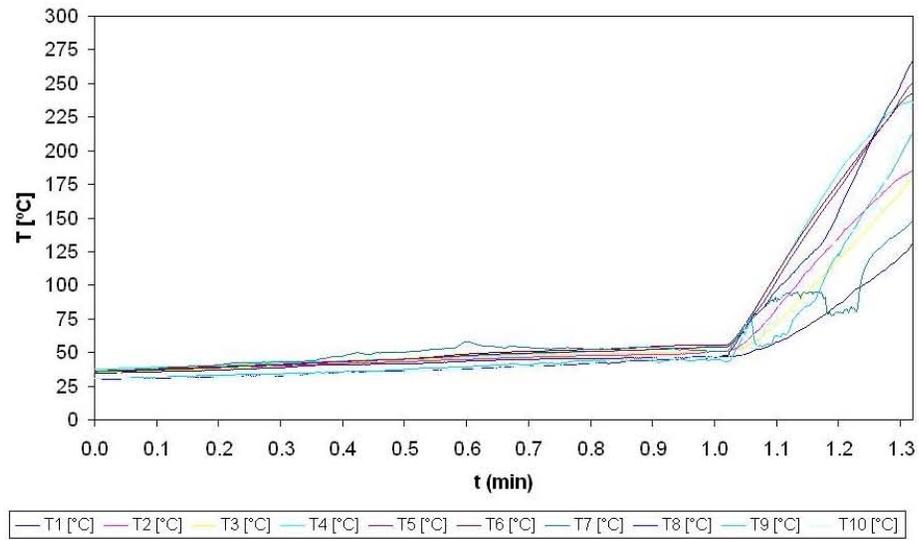


Figura 5.1: Prueba 1. Evolución de la temperatura de los termopares en la superficie del receptor.

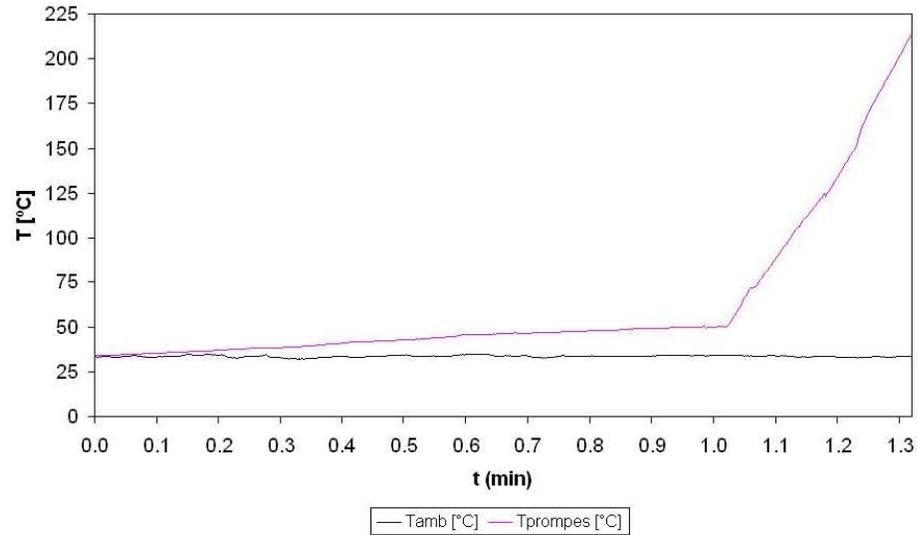


Figura 5.2: Prueba 1. Evolución de la temperatura promedio en la superficie del receptor.

térmica. En los primeros instantes de la prueba experimental se observa un comportamiento lineal muy bien definido para la variación de temperatura del receptor con respecto al tiempo, por lo que se puede aproximar correctamente el cambio de energía interna por medio de la expresión 4.8 y así poder encontrar la reflectancia promedio del concentrador solar.

Para la prueba 2 (figuras 5.3 y 5.4) se registró una radiación directa promedio de  $465 W/m^2$ . El proceso de calentamiento comenzó a partir del minuto 1.2 y duró aproximadamente  $1.8 min$ , comenzando con una temperatura promedio en la superficie del receptor cercana a  $50 ^\circ C$  y llegando hasta  $300 ^\circ C$  al final de la prueba. En este caso también se observa un comportamiento lineal al inicio del calentamiento.

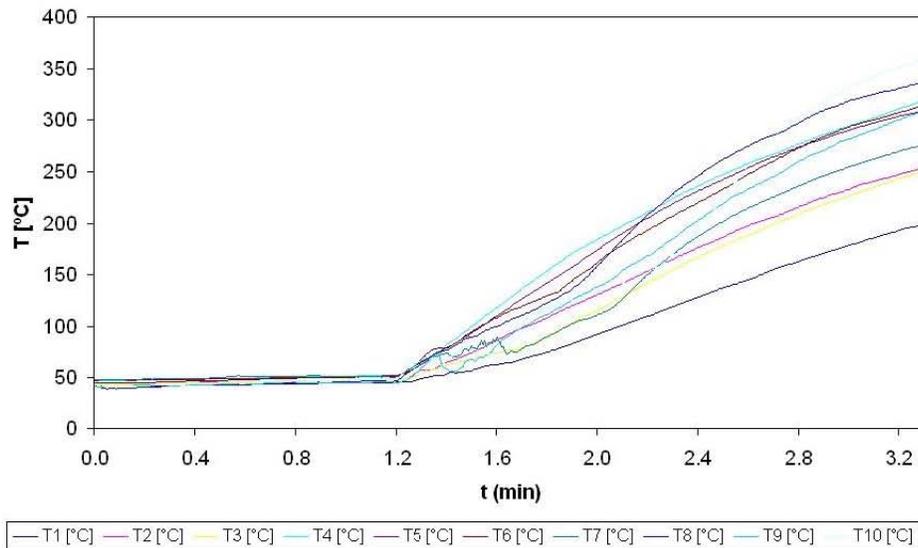


Figura 5.3: Prueba 2. Evolución de la temperatura de los termopares en la superficie del receptor.

En la prueba 3 (figuras 5.5 y 5.6) el promedio de la radiación solar directa fue de  $225 W/m^2$  y el calentamiento del receptor comenzó al minuto 0.4 con una temperatura promedio de  $30 ^\circ C$  y alcanzando temperaturas de  $130 ^\circ C$  en  $40 s$  aproximadamente. De igual forma que en las pruebas anteriores se observa el comportamiento lineal al inicio del calentamiento del receptor.

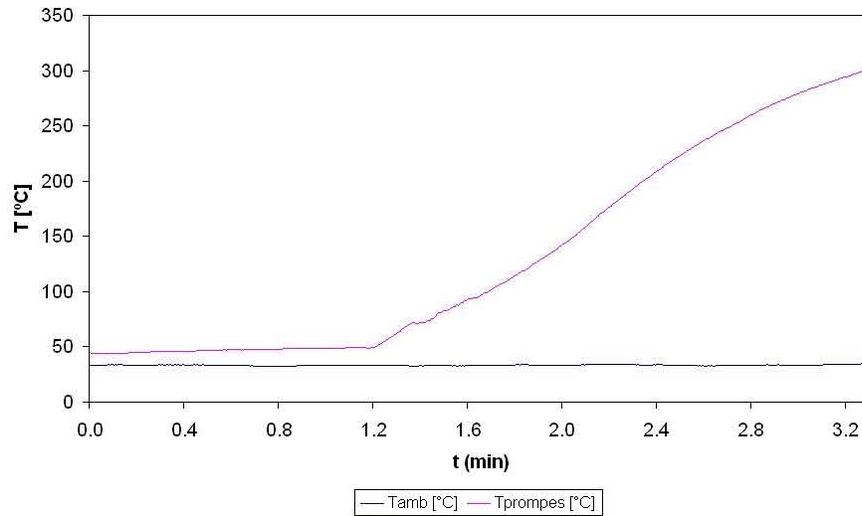


Figura 5.4: Prueba 2. Evolución de la temperatura promedio en la superficie del receptor.

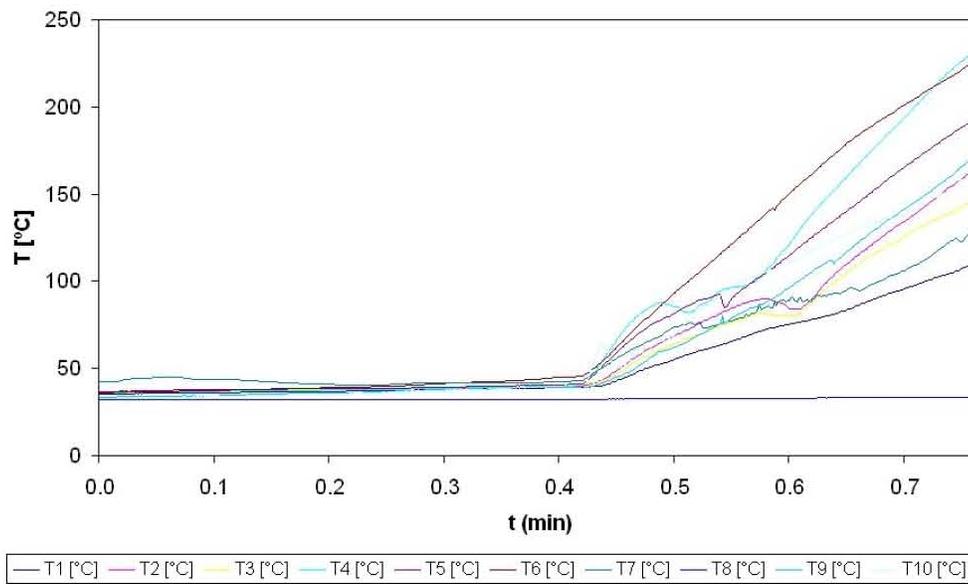


Figura 5.5: Prueba 3. Evolución de la temperatura de los termopares en la superficie del receptor.

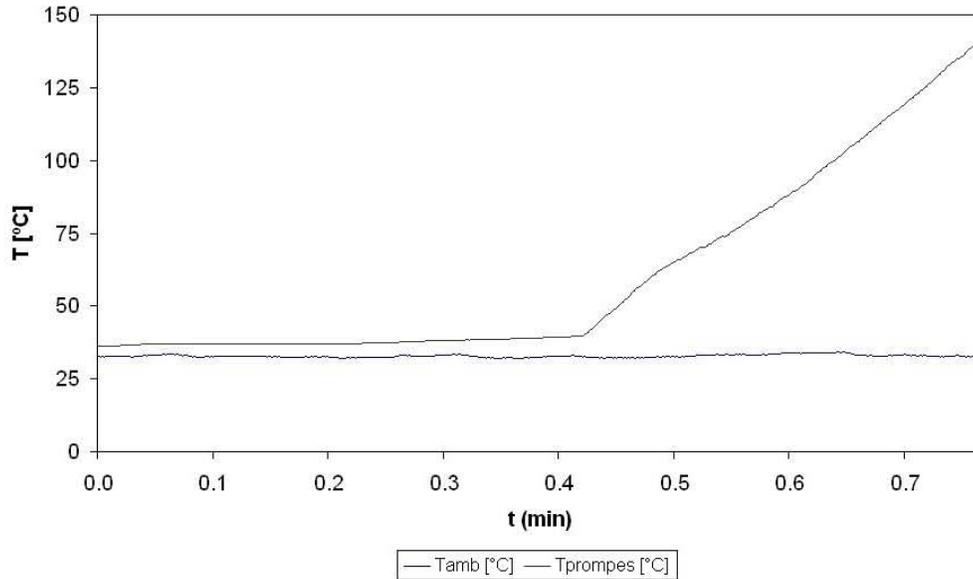


Figura 5.6: Prueba 3. Evolución de la temperatura promedio en la superficie del receptor.

Con base en los resultados experimentales obtenidos se determinó un valor estimado de la reflectancia del concentrador para las tres pruebas. Con base en las expresiones 4.4 hasta 4.8 y tomando un valor para la absorptancia de la pintura negra de alta temperatura de la marca COMEX de 0.89[48], misma que se ha aplicado en la superficie del receptor, se han obtenido los siguientes resultados, los cuales se observan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Resultados de la reflectancia del concentrador.

Prueba	$G_b$ [ $W/m^2$ ] $\pm 0.5\%$	$Q_{abs}$ [ $W$ ] $\pm 40.3$ [ $W$ ]	$\rho_c$ $\pm 0.0123$
1	493.5	3215	0.8267
2	465	2975	0.8133
3	225	1405	0.7920
		$\bar{\rho}_c$	0.8106

En la tabla 5.1 y de izquierda a derecha se tiene lo siguiente: número de la prueba realizada, radiación solar directa, potencia térmica absorbida por el receptor y reflectancia del concentrador. De acuerdo a los resultados obtenidos se ha determinado un valor promedio para la reflectancia del concentrador de 0.8106 y analizando este valor con los valores de reflectancia de los sistemas desarrollados mundialmente presentados anteriormente en la tabla 1.4 se observa que el valor de reflectancia obtenido de la antena de telecomunicaciones de desecho del COSPAA-90-I a la cual se le ha aplicado un proceso de pulido mecánico previamente, está aproximadamente en un 10% por debajo de los sistemas Vanguard (0.935), MDAC (0.91), German-Saudi (0.92) y SBP (0.94), pero está dentro del rango de los sistemas CPG (de 0.85 a 0.78) y AISIN/Miyako (de 0.85 a 0.78). Cabe mencionar que el valor de 0.8106 es un valor muy aceptable para una superficie la cual no estaba contemplada para trabajar como concentrador solar desde su origen.

## 5.2. Experimento 2. Pruebas de repetitividad en los procesos de calentamiento y enfriamiento del sistema concentrador-receptor

Para las pruebas de repetitividad se utilizaron cuatro flujos volumétricos: 4, 3, 2 y 1  $l/min$ . Además se realizaron pruebas para 0.3  $l/min$  pero sin realizar repetitividad del proceso de calentamiento y enfriamiento para este flujo.

De acuerdo a la metodología experimental planteada anteriormente en el capítulo 4, se determinaron entre los datos más importantes, las siguientes variables experimentales:

- Radiación solar directa  $G_b$
- Temperatura en la superficie del receptor:  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$  y  $T_6$
- Temperatura en la entrada del receptor  $T_e$
- Temperatura en la salida del receptor  $T_s$
- Temperatura ambiente  $T_a$
- Gasto volumétrico  $V$

### Prueba realizada con un gasto volumétrico de 4 l/min

En la figura 5.7 y hasta la figura 5.9 se pueden observar las repeticiones del proceso de calentamiento y enfriamiento en el receptor, utilizando un gasto volumétrico de 4 l/min. La prueba experimental duró en total 1 h con intervalos de tiempo de 20 min para cada proceso de calentamiento y enfriamiento del receptor. El promedio de la radiación solar directa fue de 700 W/m<sup>2</sup> para los tres procesos realizados con este flujo. En la figura 5.7 se observan las variaciones de las temperaturas en la superficie del receptor y donde para la temperatura  $T_1$  (figura 4.14) se tienen valores de 45 °C, mientras que para  $T_6$  se tienen valores de 135 °C.

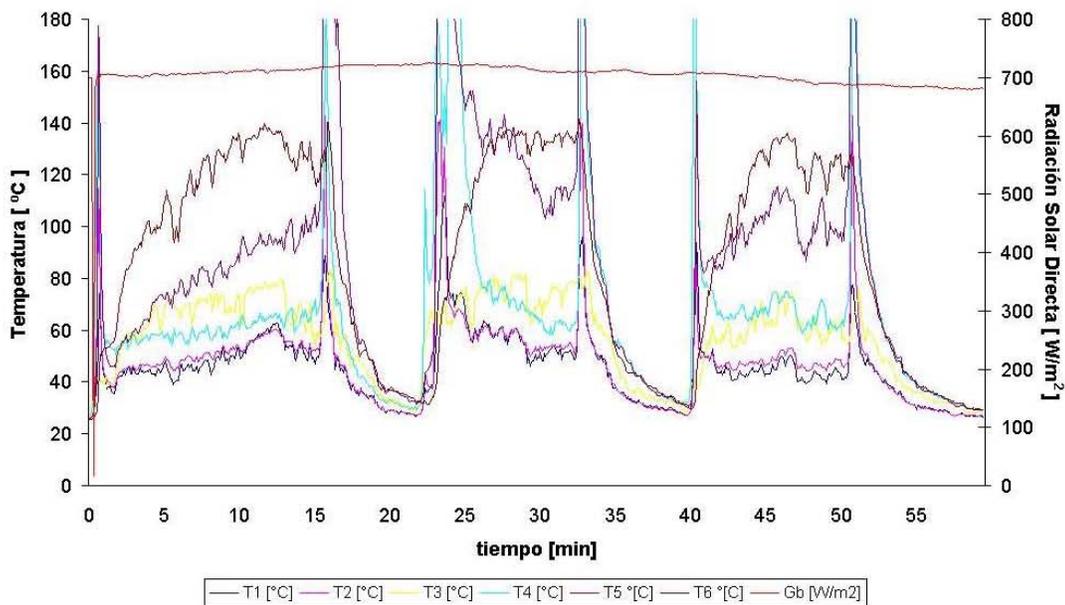


Figura 5.7: Temperaturas en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 4$  [l/min].

En la figura 5.8 se observa la variación de la temperatura promedio en la superficie del receptor, los picos observados corresponden al inicio del enfoque y del desenfoco del concentrador con respecto al sol. Esta temperatura promedio alcanza valores por encima de 68 °C.

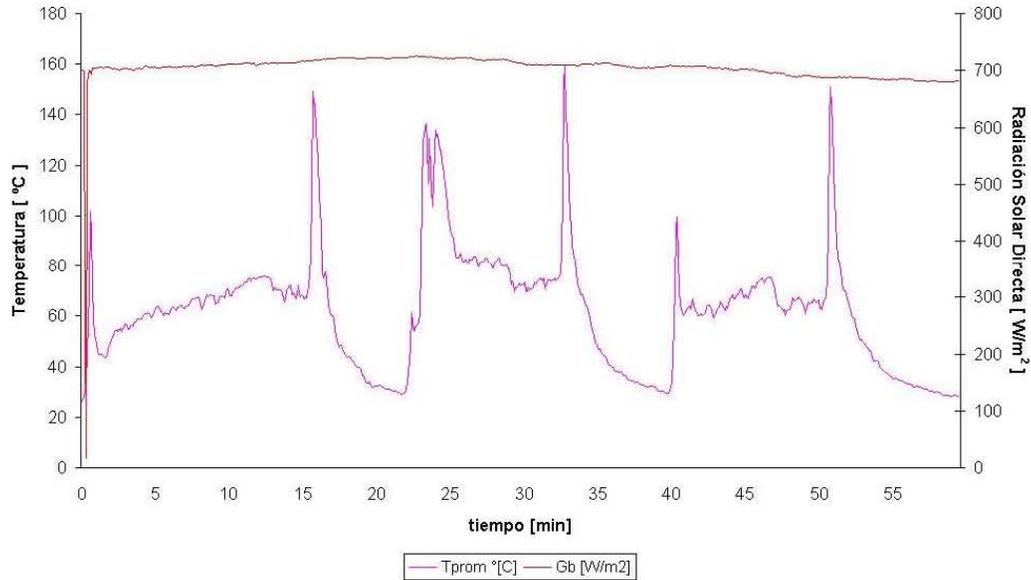
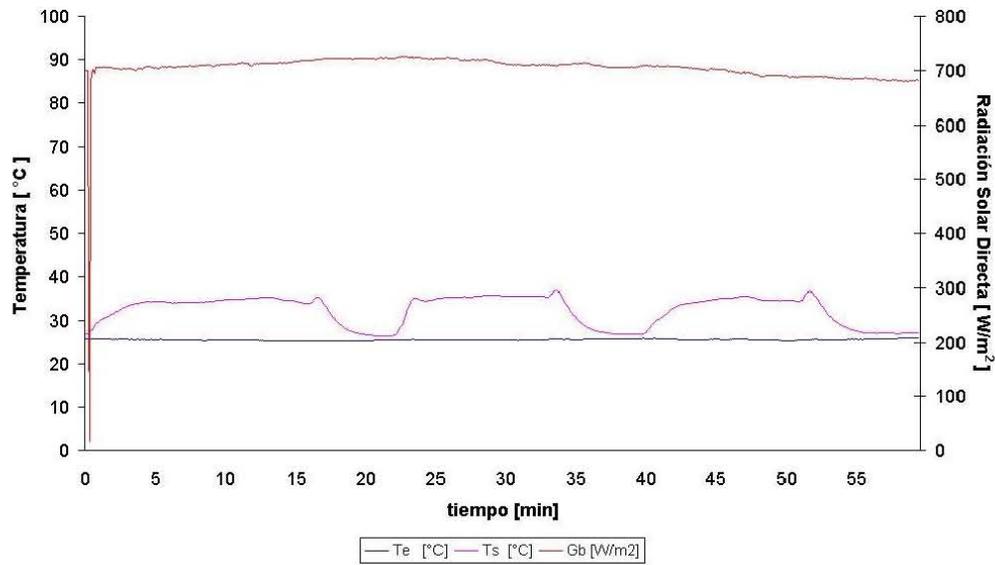
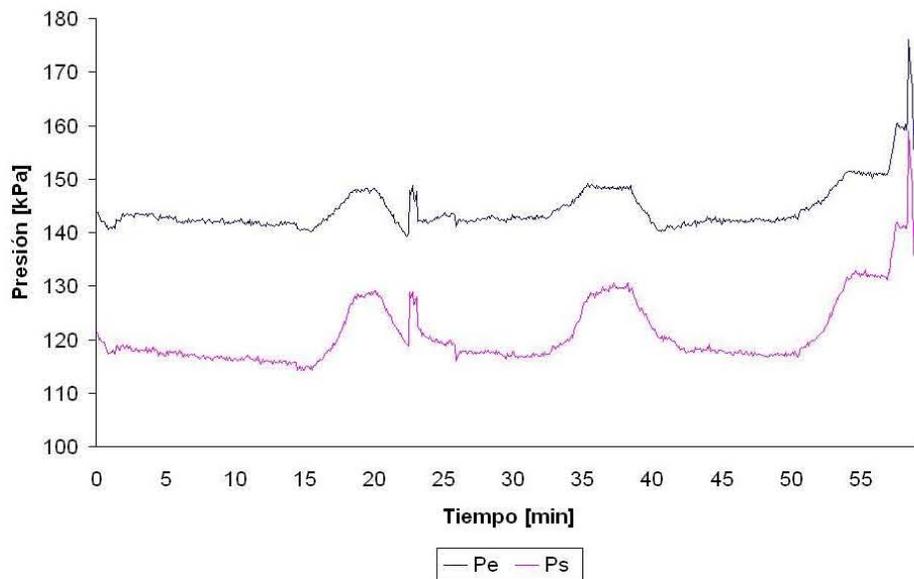


Figura 5.8: Temperatura promedio en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 4$  [l/min].

En la figura 5.9 se tienen las temperaturas a la entrada y a la salida del agua que fluye a través del receptor, la temperatura de entrada permanece casi constante a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que la temperatura de salida alcanzó valores aproximados a  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por lo que se tiene una diferencia de temperatura cercana a  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  para este flujo volumétrico.

En la figura 5.10 se pueden observar las presiones registradas a la entrada y a la salida del receptor. La presión de entrada toma valores casi constantes en promedio de  $142\text{ kPa}$  para las tres puebas de repetitividad, los tres aumentos que se observan son debidos al desenfoque y enfoque del concentrador. La presión a la salida del receptor se ve disminuida debida a la caída de presión que el agua experimenta al pasar por el receptor, en este caso se observa que los valores registrados son también casi constantes y toman valores promedio de  $117\text{ kPa}$ , observando también los aumentos debidos a desenfoque y enfoque del sistema. Por lo que se presenta una caída de presión aproximadamente de  $25\text{ kPa}$  del paso del agua a través del receptor.

Figura 5.9: Temperatura de entrada y salida en el receptor,  $\dot{V} = 4$  [l/min].Figura 5.10: Presión de entrada y salida en el receptor,  $\dot{V} = 4$  [l/min].

En cada una de las figuras de la 5.7 a la 5.9 se puede observar claramente la consistencia de los experimentos, debido a que se alcanzan temperaturas similares en la superficie del receptor, así como en la temperatura de salida del agua que atraviesa al receptor.

### Ajuste del modelo matemático con los datos experimentales

Para lograr el ajuste del modelo matemático con los datos experimentales y con base en la figura 5.9 se acotó uno de los procesos de calentamiento del receptor, siendo para este caso el primero en el cual se han ajustado la temperatura promedio experimental del receptor con la temperatura teórica obtenida del modelo matemático (expresión 3.29). En la figura 5.11, se presenta la temperatura experimental representada por las barras de error y la temperatura teórica por la línea continua. En esta figura se observa un excelente ajuste de los datos experimentales con respecto al resultado teórico. El estado estacionario para un flujo de  $4 \text{ l/min}$  se alcanza en un tiempo aproximado de  $10 \text{ min}$  y con una temperatura promedio teórica en la superficie del receptor por arriba de los  $68 \text{ }^\circ\text{C}$ . Por lo que los valores de  $A$  y  $B$  obtenidos del ajuste para este flujo son los siguientes:

$$\begin{aligned}A &= 0.385 \text{ [s}^{-1}\text{]} \\B &= 68.3 \text{ }^\circ\text{C} \\T_0 &= 26 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

donde:

$A$  es el factor de evolución del tiempo del estado transitorio.

$B$  representa la temperatura del estado estacionario que se alcanza con un flujo volumétrico de  $4 \text{ l/min}$

$T_0$  es la temperatura inicial del proceso de calentamiento en el receptor.

### Prueba realizada con un gasto volumétrico de $3 \text{ l/min}$

Esta prueba tuvo una duración de  $1 \text{ h}$  en su totalidad y de  $20 \text{ min}$  para cada proceso de calentamiento y enfriamiento del receptor. El nivel de radiación solar directa fue en promedio de  $650 \text{ W/m}^2$ . La variación de la temperatura en la superficie se observa en la figura 5.12 y en donde  $T_1$  presenta valores promedio de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  mientras que para  $T_6$  los valores son cercanos a  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ .

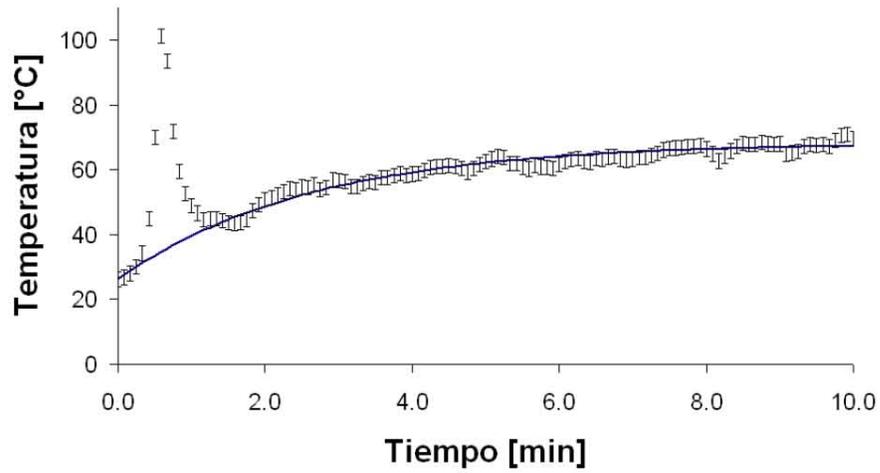


Figura 5.11: Temperatura promedio experimental y temperatura teórica en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 4$  [l/min].

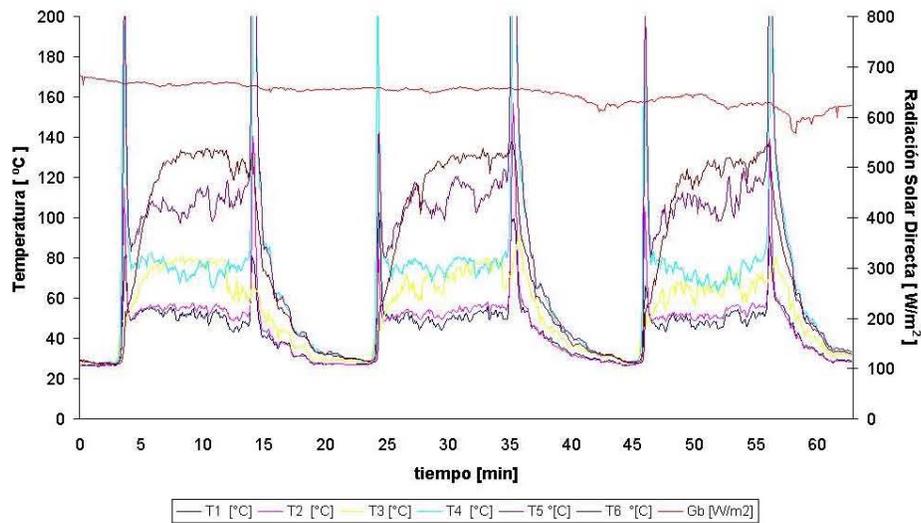


Figura 5.12: Temperaturas en la superficie del receptor  $\dot{V} = 3$  [l/min].

La temperatura promedio presenta valores por arriba de  $76\text{ }^{\circ}\text{C}$  misma que se observa en la figura 5.13 y nuevamente los picos que se ven corresponden al enfoque y desenfoco del COSPAA-90-I.

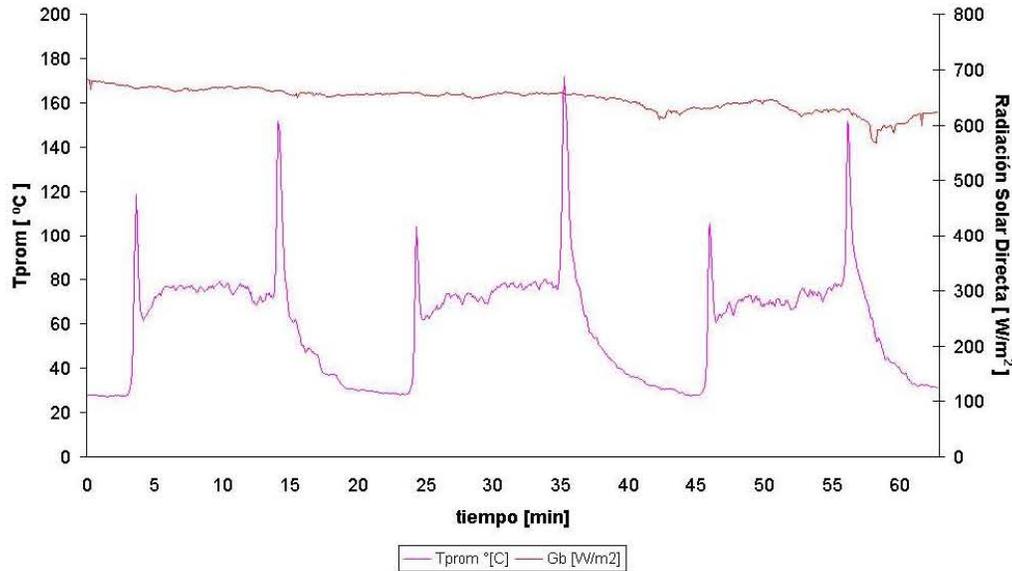
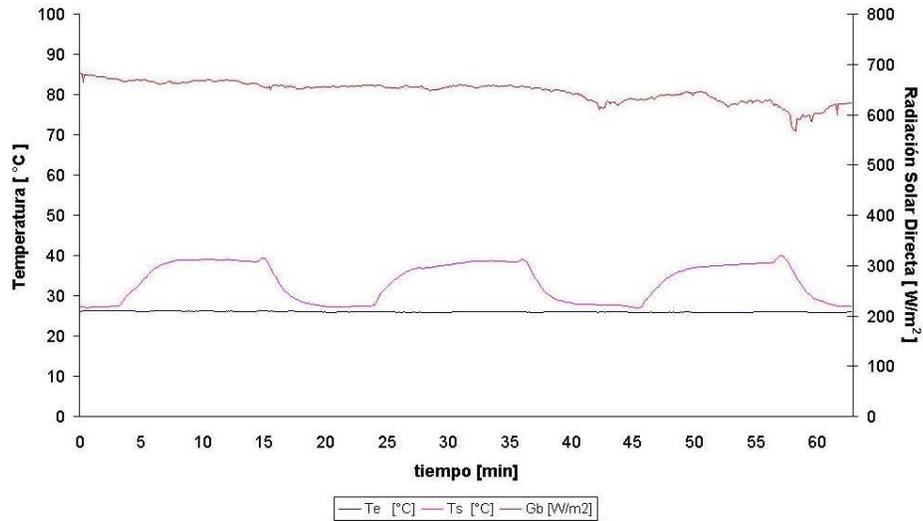
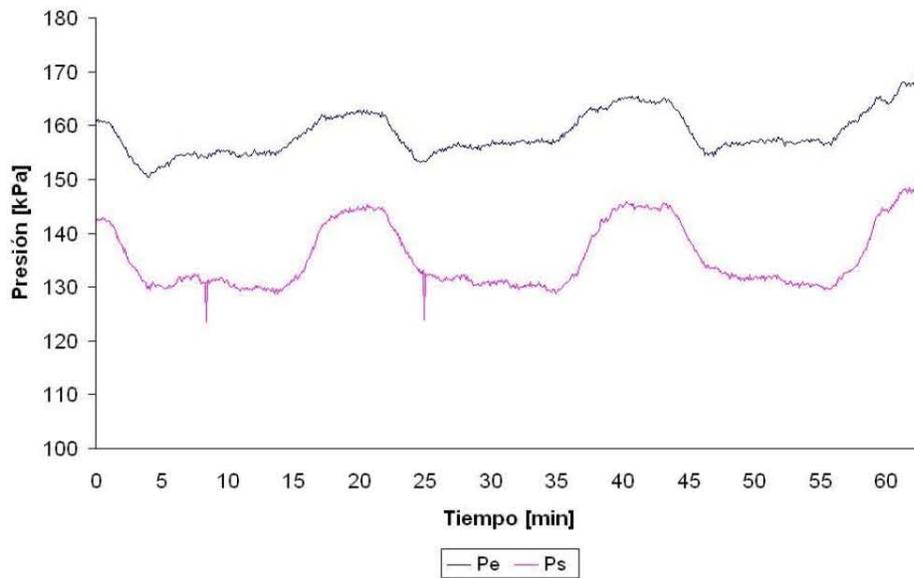


Figura 5.13: Temperatura promedio en la superficie del receptor  $\dot{V} = 3\text{ [l/min]}$ .

Las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del receptor (figura 5.14) presentan los valores de  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  y de  $39\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectivamente, registrando una diferencia de temperaturas de  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Las presiones a la entrada y a la salida del receptor se pueden ver en la figura 5.15 y en donde se puede apreciar que a la entrada del flujo de agua la presión toma un valor promedio de  $156\text{ kPa}$  en las tres pruebas de calentamiento y se observa también que para el caso anterior estos valores son consistentes, mientras que para la presión a la salida del receptor disminuye a valores promedio de  $130\text{ kPa}$  manteniéndose estos valores en las tres pruebas de calentamiento. Para este caso se tiene una caída de presión aproximadamente de  $26\text{ kPa}$ , valor muy parecido al caso anterior.

Para esta prueba experimental también se observa coherencia y consistencia en los procesos de calentamiento y enfriamiento del receptor en cada una de las pruebas experimentales.

Figura 5.14: Temperatura de entrada y de salida en el receptor,  $\dot{V} = 3$  [l/min].Figura 5.15: Presión de entrada y salida en el receptor,  $\dot{V} = 3$  [l/min].

### Ajuste del modelo matemático con los datos experimentales

En la figura 5.16 se puede observar la consideración adoptada para el ajuste lineal de la evolución del proceso de calentamiento para el estado transitorio, de la temperatura de salida del agua  $T_s$ , que atraviesa el receptor con respecto a la temperatura promedio en la superficie del receptor  $T$ , los triángulos en la figura corresponden a los datos experimentales obtenidos para un flujo de  $3 \text{ l/min}$ . Esta consideración se utilizó en el modelo matemático (expresión 3.29) por medio de la expresión 3.1.

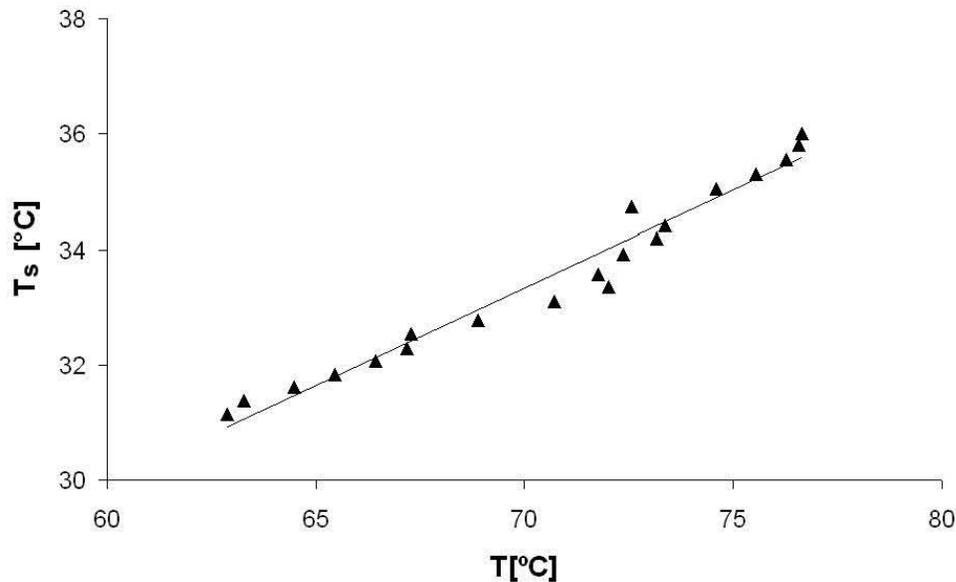


Figura 5.16: Ajuste lineal de la temperatura de salida con respecto a la temperatura promedio en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 3 \text{ [l/min]}$ .

De la figura 5.13 se acotó el primero de los procesos de calentamiento del receptor, al cual se ha ajustado la temperatura promedio experimental del receptor con la temperatura teórica obtenida del modelo matemático (expresión 3.29) mismo que se observa en la figura 5.17, donde la temperatura experimental está representada por las barras de error y la temperatura teórica por la línea continua, en esta figura también se observa un excelente ajuste de los datos experimentales con respecto al resultado teórico. En este caso, el estado estacionario para un flujo de  $3 \text{ l/min}$  se alcanza en tiempo aproximado de  $6 \text{ min}$  y con temperatura promedio en la superficie

del receptor por arriba de los  $77\text{ }^{\circ}\text{C}$  como se mencionó anteriormente. Los valores de A y B obtenidos del ajuste para este flujo son los siguientes:

$$A = 1.4\text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$B = 77\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_0 = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$$

donde:

A es el factor de evolución del tiempo del estado transitorio.

B representa la temperatura del estado estacionario que se alcanza con un flujo volumétrico de  $3\text{ l/min}$

$T_0$  es la temperatura inicial del proceso de calentamiento en el receptor.

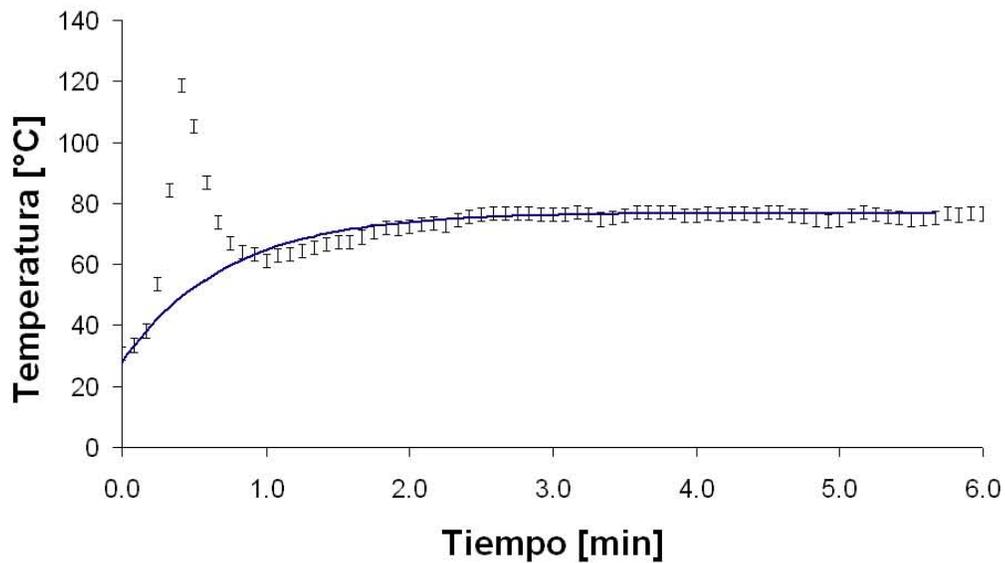


Figura 5.17: Temperatura promedio experimental y temperatura teórica en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 3\text{ [l/min]}$ .

### Prueba realizada con un gasto volumétrico de 2 l/min

La duración con este gasto volumétrico fue de 63 min, con intervalos de tiempo de 20 min para cada una de las pruebas individuales. En este caso se registró un valor promedio de la radiación solar directa de  $760 \text{ W/m}^2$  y la temperatura en la superficie del receptor varió desde  $51 \text{ }^\circ\text{C}$  para  $T_1$  hasta  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  para  $T_6$ , lo cual se observa en la figura 5.18, mientras que el valor de la temperatura promedio fue por arriba de  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  en el primer proceso de calentamiento (figura 5.19) y disminuyendo gradualmente hasta  $77 \text{ }^\circ\text{C}$  en la tercera prueba individual. Los picos observados también son debidos al proceso de enfoque y desenfoco.

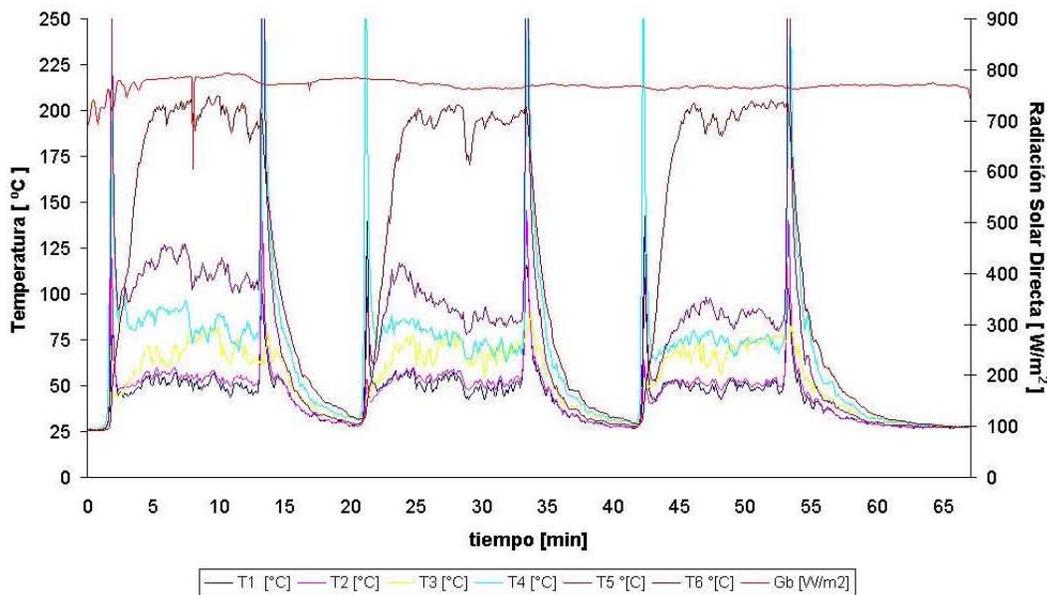


Figura 5.18: Temperaturas en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 2 \text{ [l/min]}$ .

Para las temperaturas del agua de circulación (figura 5.20) se tiene que a la entrada se presenta una temperatura casi constante de  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  y a la salida una temperatura promedio de  $41 \text{ }^\circ\text{C}$ , experimentando un aumento de temperatura de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , dato consistente para las tres pruebas individuales.

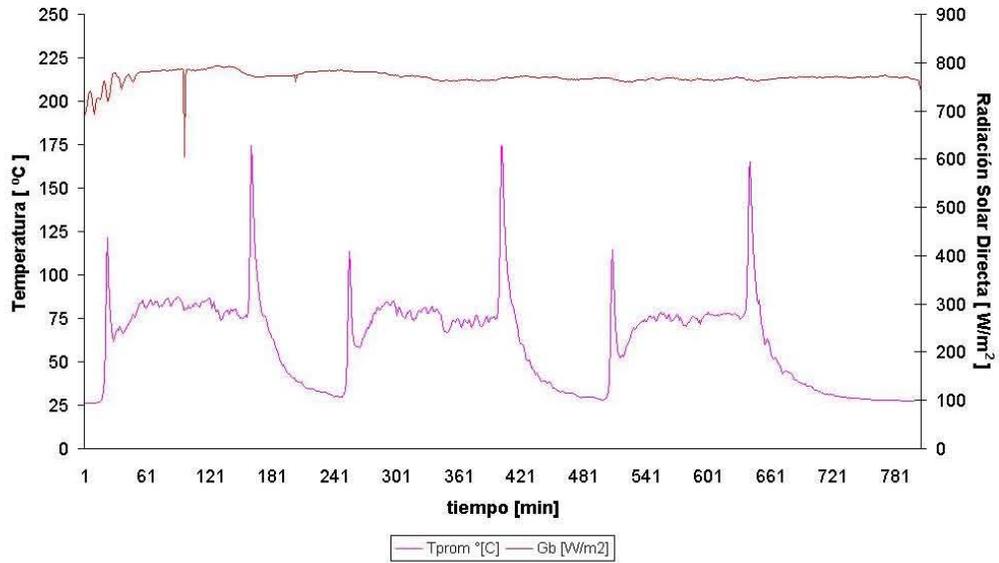


Figura 5.19: Temperatura promedio en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 2$  [l/min].

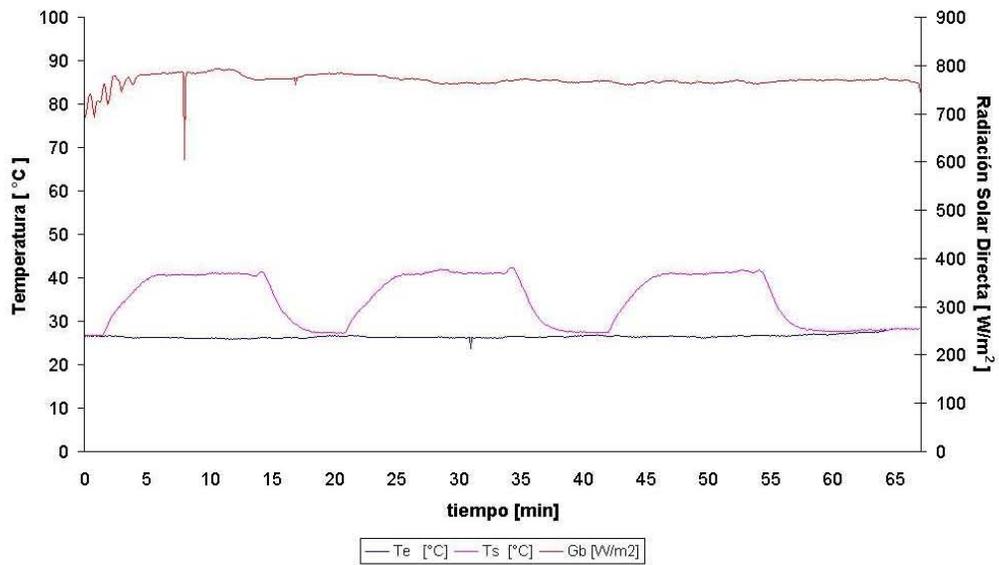


Figura 5.20: Temperatura de entrada y salida en el receptor,  $\dot{V} = 2$  [l/min].

En la figura 5.21 se presentan las presiones a la entrada y a la salida del receptor. A diferencia de los casos anteriores la presión que se tiene a la entrada es cercano a  $5 \text{ kPa}$ , llegando hasta valores de  $35 \text{ kPa}$  para la presión de salida, muy por debajo de los casos de 4 y 3 l/min. En este caso en particular se presenta un aumento en la presión de salida con respecto a la de entrada de  $30 \text{ kPa}$ .

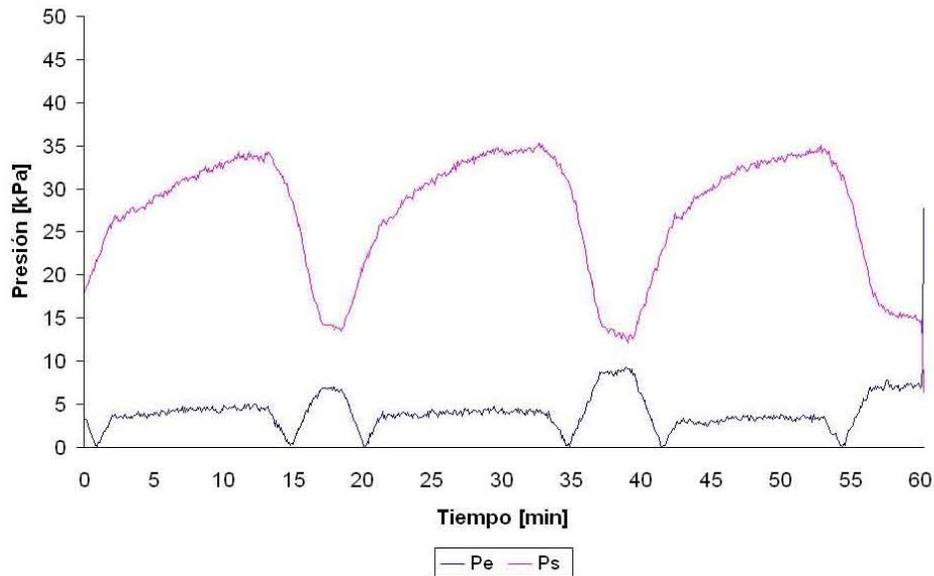


Figura 5.21: Presión de entrada y salida en el receptor,  $\dot{V} = 2 \text{ [l/min]}$ .

### Ajuste del modelo matemático con los datos experimentales

De la figura 5.19 se acotó el tercero de los procesos de calentamiento del receptor, al cual se ha ajustado la temperatura promedio experimental del receptor con la temperatura teórica obtenida del modelo teórico (expresión 3.29) mismo que se observa en la figura 5.22, para esta figura la temperatura experimental está representada por las barras de error y la temperatura teórica por la línea continua, observando también un excelente ajuste de los datos experimentales con respecto a la temperatura del resultado teórico. El estado estacionario para un flujo de  $2 \text{ l/min}$  se alcanza en tiempo aproximado de  $5.5 \text{ min}$  y con temperatura promedio teórica en la superficie del receptor cercana a  $77 \text{ }^\circ\text{C}$ .

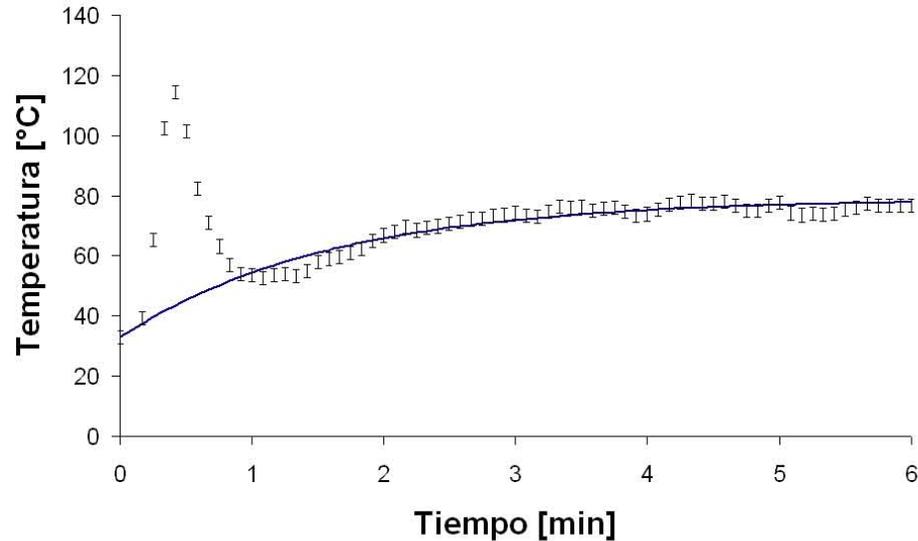


Figura 5.22: Temperatura promedio experimental y temperatura teórica en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 2$  [l/min].

Los valores de  $A$  y  $B$  obtenidos del ajuste para este flujo son los siguientes:

$$A = 1.2 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$B = 76.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 33 \text{ }^\circ\text{C}$$

donde:

$A$  es el factor de evolución del tiempo del estado transitorio.

$B$  representa la temperatura del estado estacionario que se alcanza con un flujo volumétrico de 2 l/min

$T_0$  es la temperatura inicial del proceso de calentamiento en el receptor.

### Prueba realizada con un gasto volumétrico de 1 l/min

La duración de la prueba fue de 73 min, con intervalos de tiempo de 23 min para cada una de las pruebas individuales. La radiación solar directa en promedio fue de  $760 \text{ W/m}^2$  al inicio y de  $730 \text{ W/m}^2$  para la última prueba individual, de esta forma se presentaron temperaturas de superficie promedio en la superficie del receptor (figura

5.23) de  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  en  $T_1$  y de  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$  en  $T_6$ , por lo que la temperatura promedio fue de  $81\text{ }^{\circ}\text{C}$  (figura 5.24).

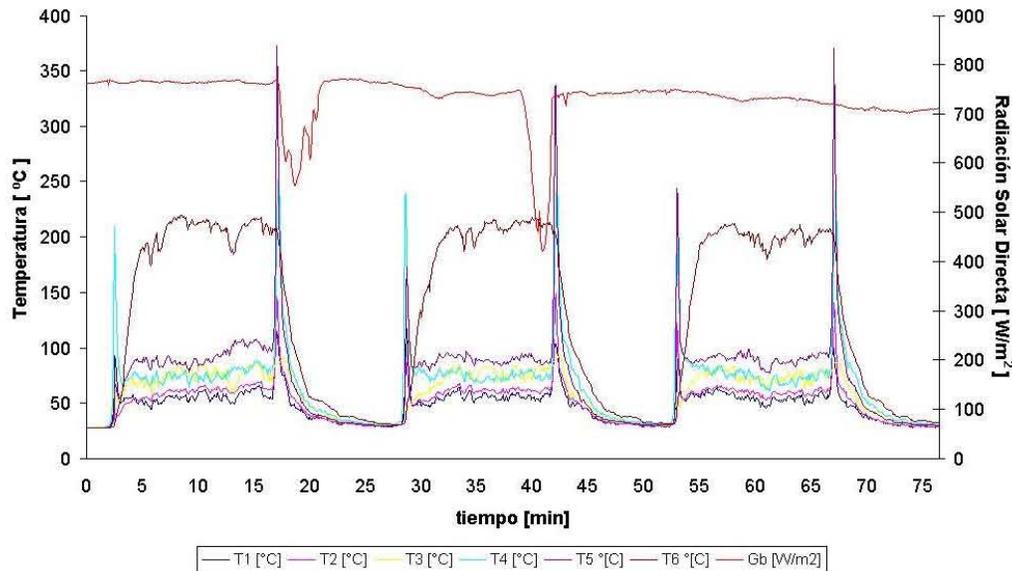
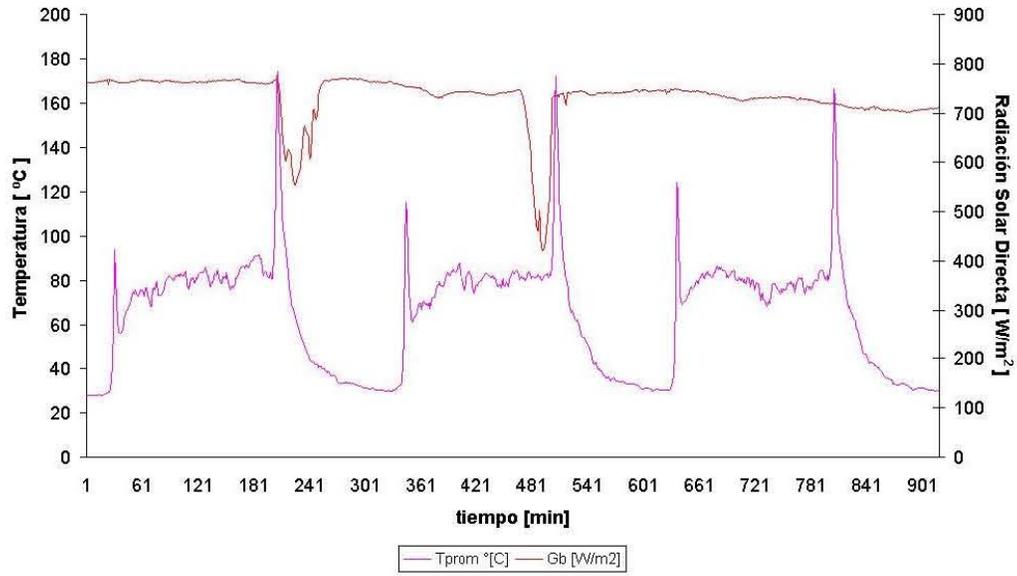
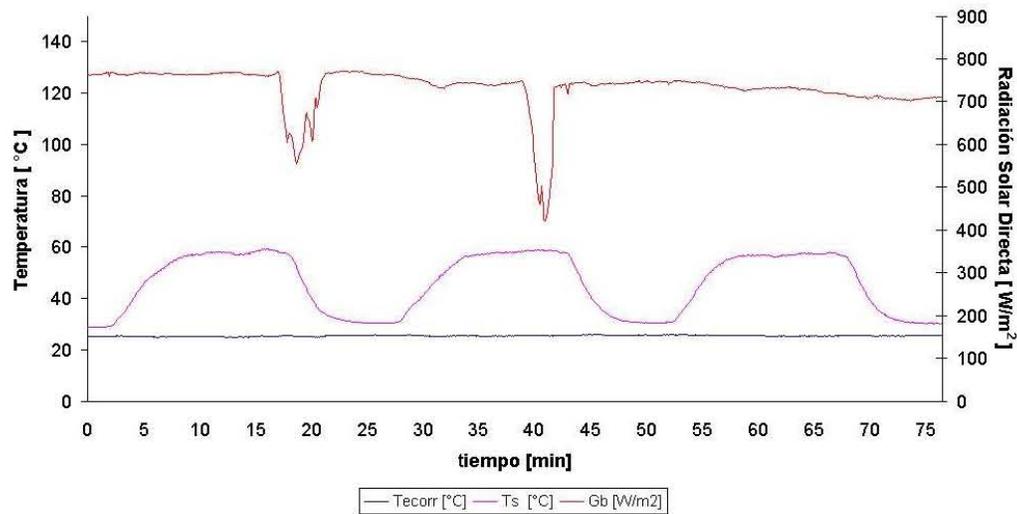


Figura 5.23: Temperaturas en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 1\text{ [l/min]}$ .

Las temperaturas que experimentó el agua de circulación se observan en la figura 5.25. A la entrada se tiene un valor casi constante de  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que a la salida se tiene un valor promedio de  $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dando por consiguiente una diferencia de temperatura de  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ , siendo este valor el mayor de los valores para los diferentes gastos volumétricos.

De acuerdo a la figura 5.26 se observan las presiones de entrada y de salida en el receptor. Para la presión de entrada los valores son muy parecidos en las tres pruebas de calentamiento, los cuales toman un valor promedio de  $80\text{ kPa}$  en el calentamiento del receptor, pero los valores de la presión de salida toman valores muy erráticos que van en promedio desde  $68$  y hasta  $100\text{ kPa}$  para el proceso de calentamiento, mostrando así una misma tendencia para los tres procesos, lo cual sugiere ocurrir debido a la disminución de flujo volumétrico y al aumento de las temperaturas del receptor con respecto a los flujos anteriores.

También se observa coherencia y consistencia en los resultados para las distintas temperaturas en las tres pruebas experimentales individuales.

Figura 5.24: Temperatura promedio en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 1$  [ $l/min$ ].Figura 5.25: Temperatura de entrada y salida en el receptor,  $\dot{V} = 1$  [ $l/min$ ].

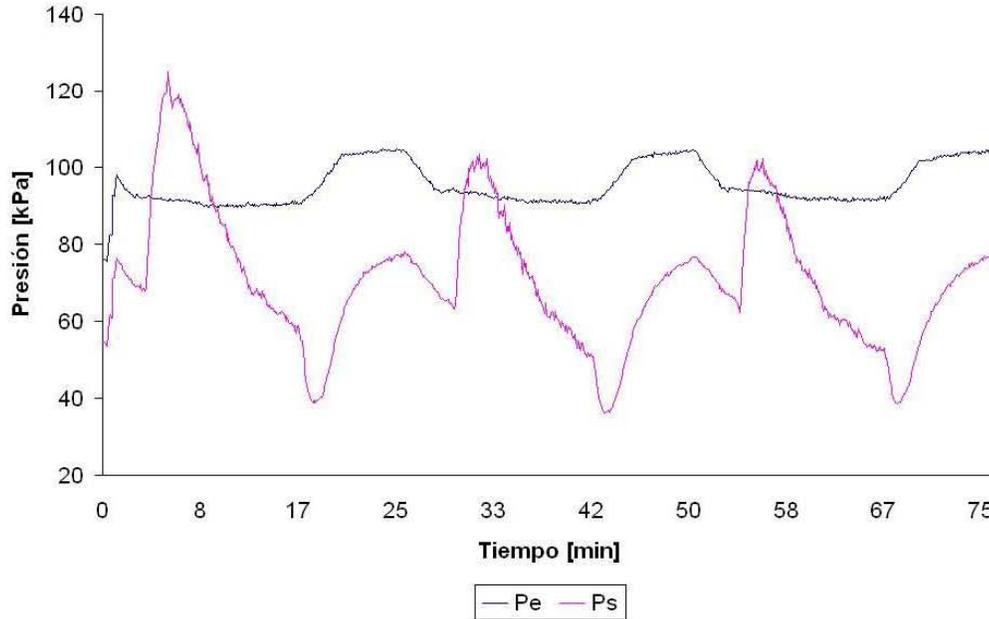


Figura 5.26: Presión de entrada y salida en el receptor,  $\dot{V} = 1$  [l/min].

### Ajuste del modelo matemático con los datos experimentales

De la figura 5.24 se acotó el primero de los procesos de calentamiento del receptor, al cual se ha ajustado la temperatura promedio experimental del receptor con la temperatura teórica obtenida del modelo teórico (expresión 3.29) mismo que se observa en la figura 5.27, y en donde se observa que la temperatura experimental está representada por las barras de error y la temperatura teórica por la línea continua, observando también un excelente ajuste de los datos experimentales con respecto a la temperatura del resultado teórico. En este caso el estado estacionario para un flujo de 1 l/min se alcanza en tiempo aproximado de 5 min y con temperatura promedio teórica en la superficie del receptor por encima de 80 °C.

Los valores de A y B obtenidos del ajuste para este flujo son los siguientes:

$$A = 1.2 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$B = 76.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 29 \text{ }^\circ\text{C}$$

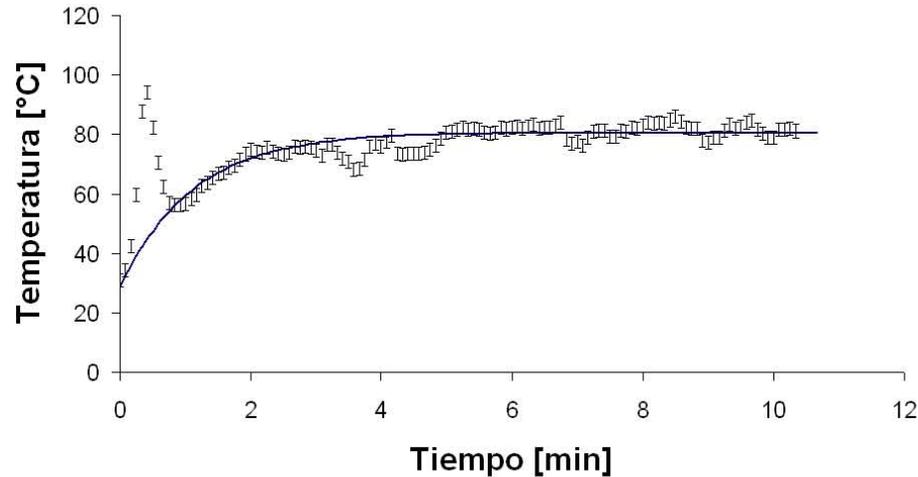


Figura 5.27: Temperatura promedio experimental y temperatura teórica en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 1$  [l/min].

donde:

$A$  es el factor de evolución del tiempo del estado transitorio.

$B$  representa la temperatura del estado estacionario que se alcanza con un flujo volumétrico de 1 l/min

$T_0$  es la temperatura inicial del proceso de calentamiento en el receptor.

### Prueba realizada con un gasto volumétrico de 0.3 l/min

Para esta prueba se utilizó un flujo de agua de 0.3 l/min, siendo este un valor muy bajo en comparación con los anteriores. En este caso el mantener las condiciones de flujo representa una gran dificultad en la operación del sistema, debido a que la bomba centrífuga está diseñada para trabajar con flujos mayores a 50 l/min, por lo que para esta prueba en concreto no se pudieron realizar las pruebas de repetitividad como en los casos anteriores. Se realizaron tres pruebas experimentales en días diferentes siendo la tercera prueba la que arrojó los mejores resultados. A continuación se describen los datos experimentales obtenidos en la tercer prueba con un flujo de 0.3 l/min.

De acuerdo a la figura 5.28 se pueden observar las temperaturas registradas por los termopares en la superficie del receptor. Como se dijo anteriormente, al disminuir el flujo de agua que atraviesa el receptor se tiene un aumento en la temperatura de la superficie del receptor, la cual toma valores promedio de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $T_1$  y llegando hasta valores promedio de  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $T_6$ .

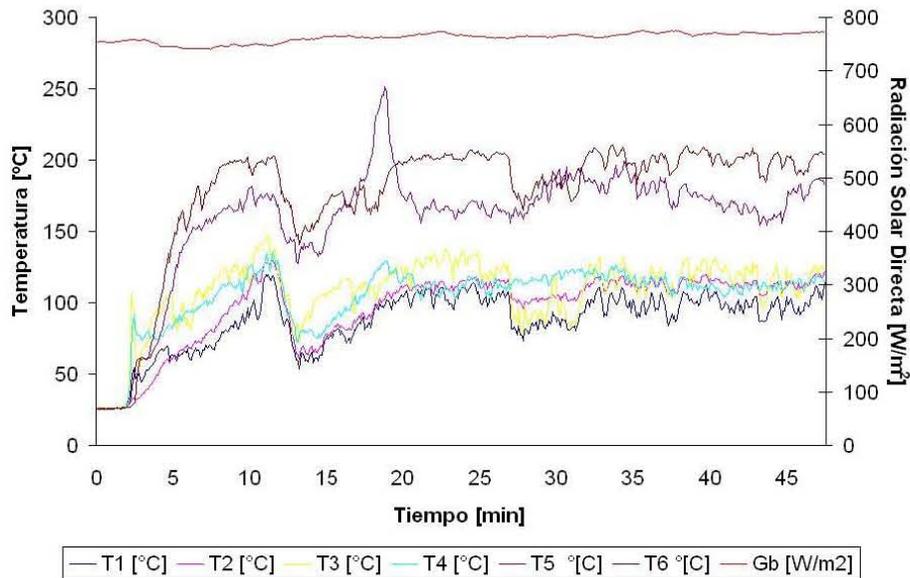
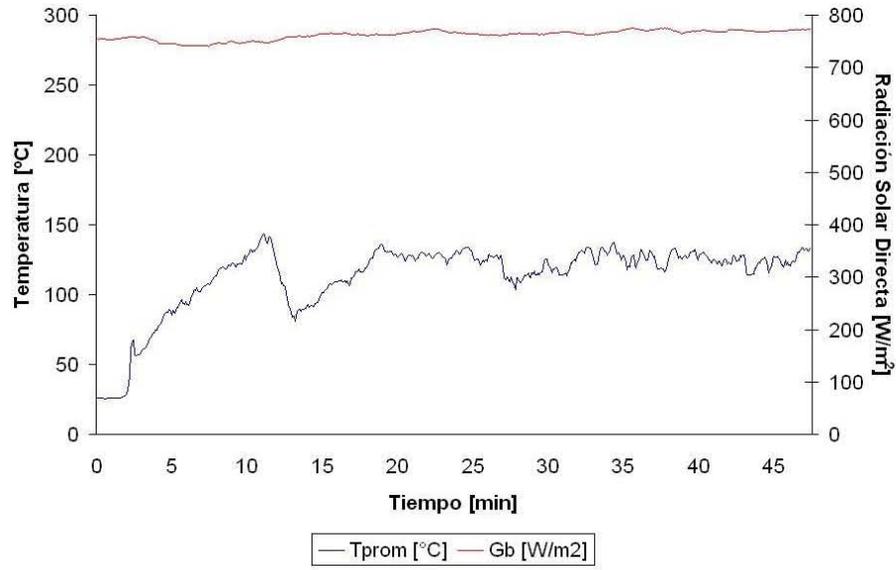
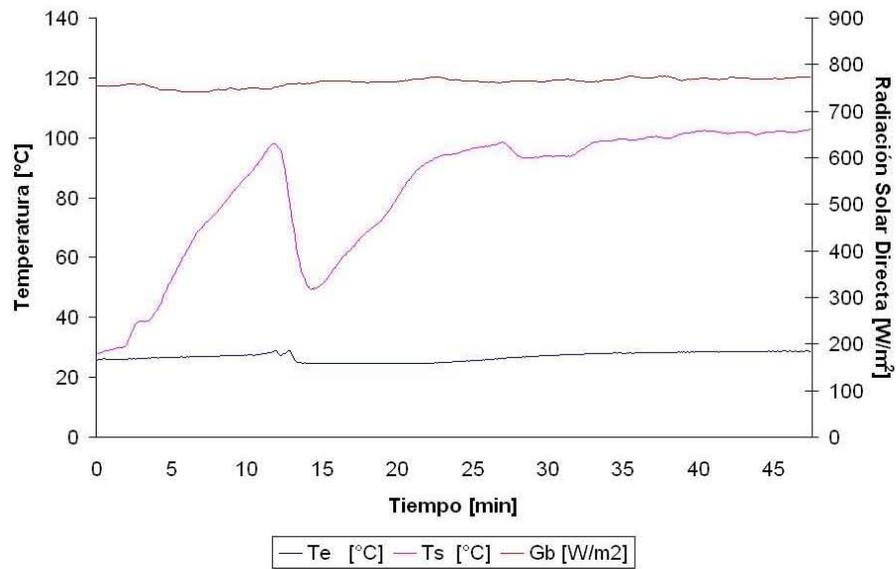


Figura 5.28: Temperaturas de termopares en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 0.3\text{ [l/min]}$ .

De esta forma, la temperatura promedio en la superficie del receptor alcanza valores en promedio de  $134\text{ }^{\circ}\text{C}$  la cual se puede observar en la figura 5.29.

En el caso de las temperaturas a la entrada y a la salida del receptor (las cuales se observan en la figura 5.30) se puede observar que a la entrada del receptor, la temperatura se mantiene casi constante tomando valores promedio de  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pero la temperatura de salida experimenta grandes cambios en un tiempo de 5 min subiendo desde  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y hasta  $97\text{ }^{\circ}\text{C}$ , después sufre una caída drástica de hasta  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , debida a una inestabilidad en el flujo volumétrico. Después, al estabilizarse nuevamente el flujo se puede observar otro aumento de la temperatura en la salida a partir del minuto 15 y llegando a valores en promedio de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por lo que en la salida de la válvula de estrangulación se obtiene vapor saturado a una temperatura promedio de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  en un tiempo de producción de vapor aproximadamente a 20 min.

Figura 5.29: Temperaturas promedio en la superficie del receptor,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min].Figura 5.30: Temperatura de entrada y de salida en el receptor,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min].

Las presiones a la entrada y a la salida del receptor se presentan en la figura 5.31. Debido a que se alcanzan valores de hasta  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  de temperatura en la superficie del receptor los cambios físicos que experimenta el agua son también de consideración, por lo que la presión a la entrada alcanza valores promedio de  $157\text{ kPa}$  los cuales se mantienen constantes, mientras que la presión a la salida del receptor toma valores desde  $50$  y alcanzando picos cercanos a  $279\text{ kPa}$  para el proceso de calentamiento, siendo estos valores los más grandes obtenidos de todos los flujos estudiados. Esto puede deberse al cambio de fase que el agua sufre debido a la temperatura del receptor en la superficie.

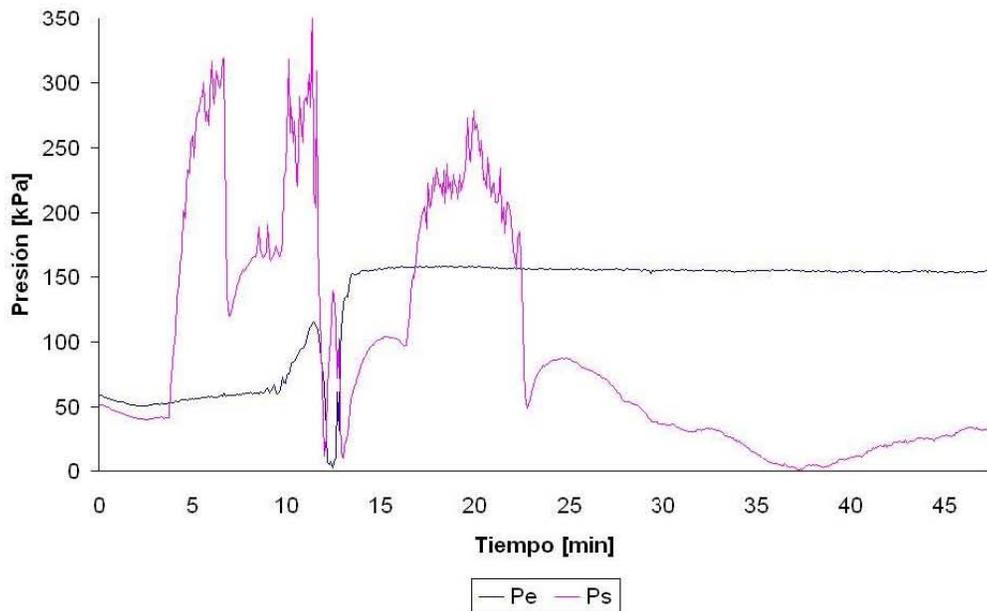


Figura 5.31: Presión a la entrada y a la salida del receptor,  $\dot{V} = 0.3\text{ [l/min]}$ .

Como se indicó anteriormente, para mantener el equilibrio de la temperatura en la salida del receptor a esta tasa de flujo obteniendo así vapor saturado a la salida del circuito hidráulico es un proceso difícil de controlar. Las figuras 5.32, 5.33, 5.34 y 5.35 muestran la secuencia de la producción de vapor obtenida para este flujo.



Figura 5.32: Producción de vapor, secuencia 1,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min].



Figura 5.33: Producción de vapor, secuencia 2,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min].



Figura 5.34: Producción de vapor, secuencia 3,  $\dot{V} = 0.3$  [l/min].



Figura 5.35: Producción de vapor, secuencia 4,  $\dot{V} = 0.3$  [ $l/min$ ].

De acuerdo a las pruebas experimentales de repetitividad realizadas al COSPAA-90 con distintos flujos volumétricos se ha encontrado que el sistema presenta coherencia, consistencia y confiabilidad en su funcionamiento y operación, garantizando así que las pruebas subsecuentes se puedan realizar de manera correcta. Así mismo al comparar los datos experimentales de la temperatura promedio en la superficie del receptor con la temperatura teórica se puede observar un excelente ajuste.

En la tabla 5.2 se presenta el resumen de los resultados obtenidos del ajuste del modelo matemático. En la primer columna se presenta el flujo volumétrico seguido de la radiación directa promedio en cada prueba, en la tercer columna se tiene la temperatura inicial en el proceso de calentamiento del receptor. En la cuarta columna se observa el valor del factor de evolución del tiempo para el estado transitorio, que para un flujo de  $4$   $l/min$  presenta un valor de 0.38 mientras que para un flujo de  $1$   $l/min$  el valor alcanza 1.2; por último se tiene el factor B, el cual representa la temperatura del estado estacionario, tomando un valor de 68.3 para  $4$   $l/min$  hasta 76.9 para  $1$   $l/min$ .

Tabla 5.2: Resultados obtenidos del ajuste del modelo matemático para los diferentes flujos estudiados.

$V$ [ $l/min$ ]	$G_b$ [ $\frac{W}{m^2}$ ]	$T_0$ [ $^{\circ}C$ ]	$A$ [ $s^{-1}$ ]	$B$ [ $^{\circ}C$ ]
4	700	26	0.385	68.3
3	650	28	1.4	77
2	760	33	1.2	76.9
1	730	29	1.2	76.9

### 5.3. Experimento 3. Pruebas de variación de temperatura a la entrada del receptor

A continuación se presentan las pruebas realizadas en este experimento.

En la figura 5.36 y hasta la figura 5.38 se pueden observar las pruebas realizadas al COSPAA-90-I con variación de temperatura a la entrada del receptor, utilizando gastos volumétricos de 5, 4, 3, 2 y 1  $l/min$ . La prueba experimental duró en total 4  $h$  con intervalos de tiempo de 42  $min$  para cada flujo utilizado. El promedio de la radiación solar directa fue de  $920 W/m^2$  en toda la prueba. En la figura 5.36 se observan las variaciones de las temperaturas en la superficie del receptor y donde para la temperatura  $T_1$  (ver figura 4.14) se tienen valores cercanos a  $67 ^\circ C$ , mientras que para  $T_6$  se tienen valores de hasta  $240 ^\circ C$ .

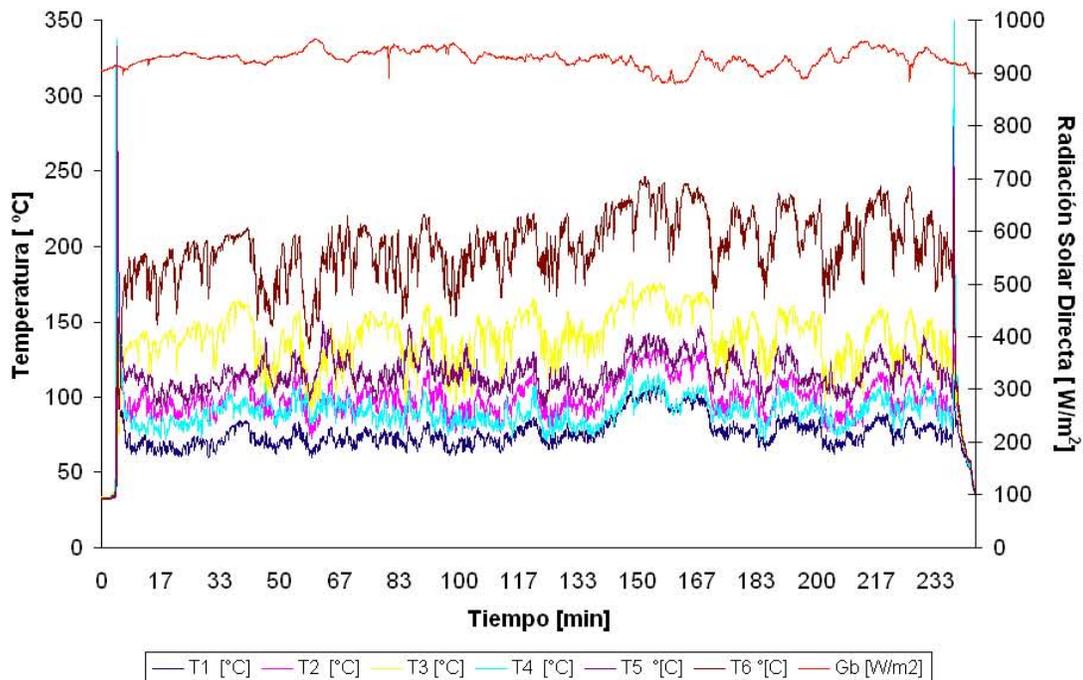


Figura 5.36: Temperaturas en la superficie del receptor.

En la figura 5.37 se observa la variación de la temperatura promedio en la superficie del receptor, los picos observados al inicio y al final de la prueba corresponden

al enfoque y del desenfoco del concentrador con respecto al sol. Esta temperatura promedio alcanza valores hasta de  $153\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

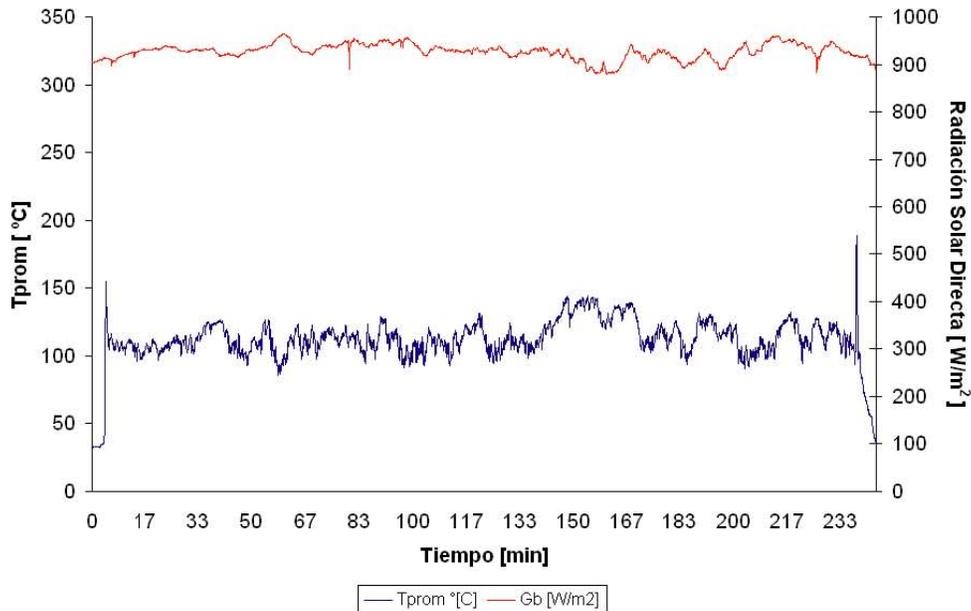


Figura 5.37: Temperatura promedio en la superficie del receptor.

En la figura 5.38 se tienen las temperaturas a la entrada y a la salida del agua que fluye a través del receptor, mismas que empezaron con un valor de  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  y de  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectivamente y variándose la primera en forma consecutiva de  $36$ ,  $39$ ,  $42$  y  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  para un flujo de  $5\text{ l/min}$ . Después al cambiar a un flujo de  $4\text{ l/min}$ , la temperatura de entrada comenzó en  $49.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y variándose en forma consecutiva en  $46$ ,  $42$  y hasta  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El flujo de  $3\text{ l/min}$  empezó con una temperatura a la entrada de  $39$  y variándose ésta en  $46$ ,  $51$  y hasta  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La prueba realizada con  $2\text{ l/min}$  se realizó con una temperatura inicial a la entrada del receptor de  $70$  y variándose en  $64$ ,  $55$  y  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por último la prueba de  $1\text{ l/min}$  tuvo comienzo con una temperatura a la entrada de  $45$ , variándose ésta en  $52$  y  $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La temperatura ambiente comenzó en  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  alcanzando un valor de hasta  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  al término de la prueba.

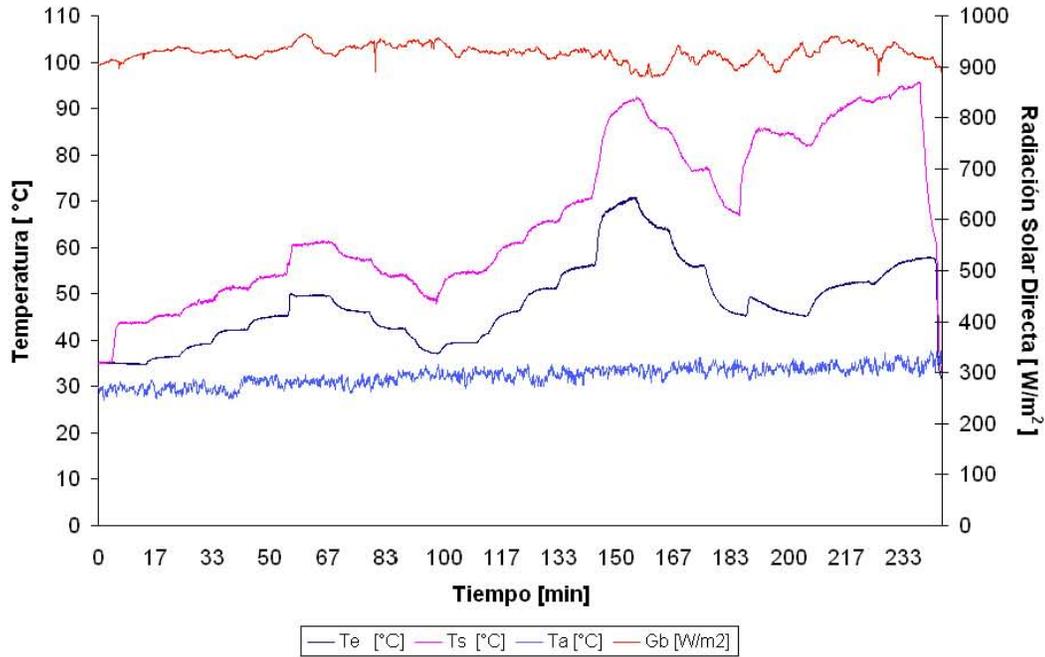


Figura 5.38: Temperatura ambiente, de entrada y salida en el receptor.

### Tablas de los puntos seleccionados

De las pruebas realizadas en el experimento 3 se han seleccionado cinco puntos para el estado estacionario de la temperatura de entrada al receptor para un flujo de 5  $l/min$  lo cual se observa en la tabla 5.3 y cuatro puntos para los flujos volumétricos 4, 3 y 1  $l/min$  (tablas 5.4 hasta 5.6 respectivamente) En la primera columna y de izquierda a derecha de cada tabla se observa lo siguiente: temperatura de entrada en el receptor, temperatura ambiente, radiación solar directa, calor útil, área del concentrador, temperatura de entrada menos la temperatura ambiente entre la radiación solar directa, eficiencia térmica del receptor.

Tabla 5.3: Puntos seleccionados,  $\dot{V} = 5 \text{ l/min}$ .

$T_e$ [°C]	$T_a$ [°C]	$G_b$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$Q_u$ [kW]	$U_g$ [kW/m <sup>2o</sup> C]	$(T_e-T_a)/G_b$ [°C/kW]	$\eta_t$ %
±2.2	±2.2	±0.5 %	±0.0178	±0.0061		±0.28 %
34.8	30.4	0.9256	3.22	0.16	4.75	40.19
36.4	29.5	0.9329	3.21	0.16	7.39	39.75
39.1	31.1	0.9271	3.17	0.17	8.62	39.50
42.3	27.8	0.9312	3.15	0.14	15.57	39.08
45.3	29.2	0.9357	3.14	0.17	17.20	38.76

Tabla 5.4: Puntos seleccionados,  $\dot{V} = 4 \text{ l/min}$ .

$T_e$ [°C]	$T_a$ [°C]	$G_b$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$Q_u$ [kW]	$U_g$ [kW/m <sup>2o</sup> C]	$(T_e-T_a)/G_b$ [°C/kW]	$\eta_t$ %
±2.2	±2.2	±0.5 %	±0.0335	±0.0055		±0.37 %
37.5	33.0	0.9493	3.26	0.18	4.74	39.67
42.5	31.6	0.9415	3.19	0.18	11.58	39.14
46.1	32.4	0.9387	3.17	0.17	14.59	39.01
49.7	31.3	0.9458	3.12	0.16	19.45	38.11

Tabla 5.5: Puntos seleccionados,  $\dot{V} = 3 \text{ l/min}$ .

$T_e$ [°C]	$T_a$ [°C]	$G_b$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$Q_u$ [kW]	$U_g$ [kW/m <sup>2o</sup> C]	$(T_e-T_a)/G_b$ [°C/kW]	$\eta_t$ %
±2.2	±2.2	±0.5 %	±0.0468	±0.0128		±0.58 %
39.4	33.3	0.9342	3.16	0.17	6.53	39.07
45.7	31.0	0.9273	3.07	0.16	15.85	38.24
50.8	30.1	0.9359	3.02	0.21	22.12	37.27
55.9	30.2	0.9324	2.97	0.17	27.56	36.79

### Ecuaciones de la eficiencia térmica del receptor de los puntos seleccionados

En la tabla 5.7 se muestran las ecuaciones de eficiencia térmica del receptor de los puntos seleccionados para los diferentes flujos volumétricos,

donde:  $\xi = (T_e - T_a/G_b)$ .

Tabla 5.6: Puntos seleccionados,  $\dot{V} = 1 \text{ l/min}$ .

$T_e$ [°C]	$T_a$ [°C]	$G_b$ [kW/m <sup>2</sup> ]	$Q_u$ [kW]	$U_g$ [kW/m <sup>2</sup> °C]	$(T_e - T_a)/G_b$ [°C/kW]	$\eta_t$ %
$\pm 2.2$	$\pm 2.2$	$\pm 0.5 \%$	$\pm 0.047$	$\pm 0.0285$		$\pm 0.46 \%$
45.7	34.8	0.9231	2.82	0.17	11.81	35.29
52.2	32.8	0.9351	2.81	0.22	20.75	34.71
57.7	33.0	0.9175	2.70	0.25	26.92	33.99

Tabla 5.7: Ecuaciones de eficiencia térmica del receptor.

$\dot{V} \text{ l/min}$ $\pm 0.034 \text{ [l/min]}$	Ecuación
5	$\eta_t = -0.1007\xi + 40.532$
4	$\eta_t = -0.1012\xi + 40.254$
3	$\eta_t = -0.1118\xi + 39.86$
1	$\eta_t = -0.0842\xi + 36.334$

De los resultados presentados en las tablas 5.4 hasta 5.7 se obtienen las curvas de eficiencia térmica del receptor en estado permanente.

Como se recordará anteriormente, en esta prueba se varió la temperatura del agua a la entrada del receptor por medio de un precalentador construido para tal fin (Figura 4.5). Para el flujo de  $5 \text{ l/min}$ , se realizó esta variación en cinco ocasiones, cuatro veces para los flujos de  $3$  y  $2 \text{ l/min}$  y tres veces para el flujo de  $1 \text{ l/min}$ .

En la figura 5.39 se puede observar la curva de la eficiencia térmica del receptor para los flujos volumétricos estudiados. Empezando desde arriba con marcas de serie en forma de triángulo se tiene un flujo de  $5 \text{ l/min}$ , después el de  $4 \text{ l/min}$  con una marca de serie en forma de cuadrado, el flujo de  $3 \text{ l/min}$  con la marca en forma de rombo y el de  $1 \text{ l/min}$  con marca en forma de círculo. El mayor valor de eficiencia térmica del receptor se presenta con un flujo de  $5 \text{ l/min}$  con un valor de  $40.19 \%$ , asociado a una temperatura de entrada del receptor de  $34.8 \text{ °C}$ . Después le sigue el flujo de  $4 \text{ l/min}$  que presenta un valor de  $39.67 \%$  con una temperatura de entrada de  $37.5 \text{ °C}$ . Enseguida se observa para el flujo de  $3 \text{ l/min}$ , un valor de  $39.07 \%$  asociado a una temperatura de entrada de  $39.4 \text{ °C}$ . Y por último se tiene que con un flujo de  $1 \text{ l/min}$ , el valor de la eficiencia térmica del receptor es de  $35.29 \%$  con una temperatura de entrada de  $45.7 \text{ °C}$ .

Notando así que a medida que el flujo volumétrico decrece la eficiencia térmica del receptor también decrece.

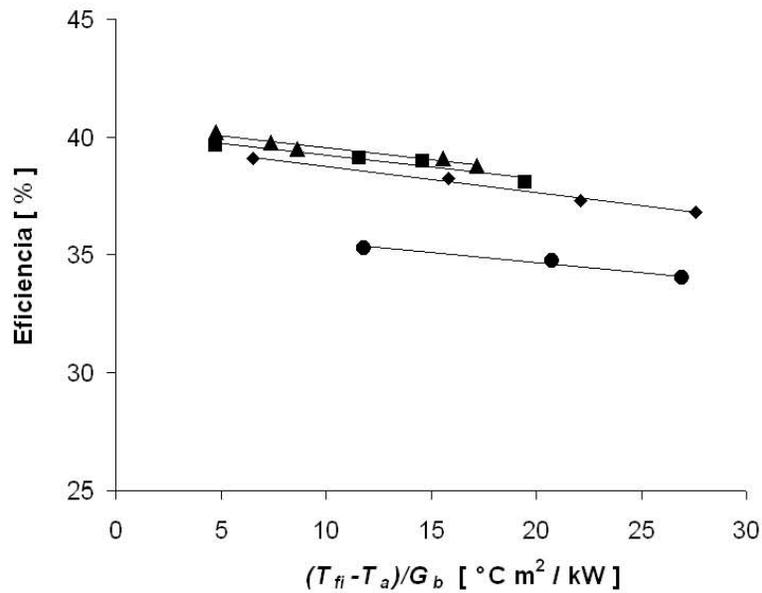


Figura 5.39: Curvas de eficiencia térmica para los flujos volumétricos estudiados, estado permanente.

En la figura 5.40 se presenta la evolución del coeficiente global de pérdidas de calor para el estado estacionario y el cual se deriva de los valores promedio de las tablas 5.3 hasta 5.6. Para un flujo volumétrico de  $5 \text{ l/min}$  se tiene un valor promedio de  $Ug = 0.16 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}$ , seguido de 0.17 con  $4 \text{ l/min}$ , después 0.18 para con  $3 \text{ l/min}$ , y por último un valor de 0.21 con  $1 \text{ l/min}$  de gasto volumétrico. De esta forma se observa que a medida que el flujo volumétrico que atraviesa el receptor decrece, el coeficiente global de perdidas de calor aumenta debido a que también se tiene un aumento en la temperatura promedio en la superficie del receptor, por lo que las pérdidas de calor desde el receptor hacia el ambiente también aumentan y por consiguiente se experimenta un decrecimiento en la eficiencia térmica del receptor a menores flujos volumétricos como se observó en la figura 5.39.

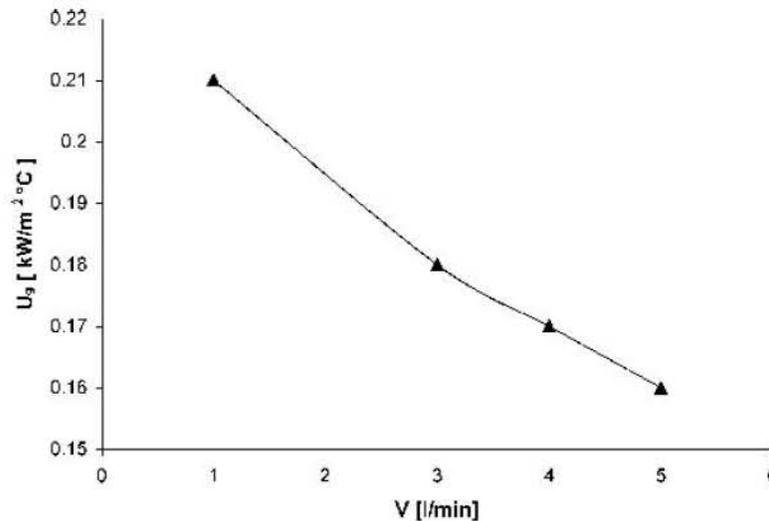


Figura 5.40: Coeficiente global de pérdidas de calor, estado permanente.

Con los resultados obtenidos en el experimento 1 y 3 se ha obtenido la caracterización térmica del COSPAA-90-I para los flujos volumétricos 5, 4, 3 y 1  $l/min$ , por medio de lo cual se obtiene una eficiencia térmica máxima de 40.19% con niveles de radiación solar directa promedio de  $920 W/m^2$  a una temperatura promedio en la superficie del receptor de  $153 ^\circ C$ . Al comparar este valor con respecto a los valores proporcionados en la tabla 1.5, se observa que la eficiencia térmica del receptor del COSPAA-90-I está muy por debajo de la eficiencia térmica de los sistemas desarrollados en otros lugares, así como el valor de la temperatura promedio que se alcanza en la superficie del receptor. Cabe mencionar que el disco parabólico del COSPAA-90-I no fue diseñado originalmente como concentrador solar, además que los receptores de los sistemas desarrollados mundialmente son del tipo de cavidad y funcionan para motores Stirling, por lo que no circula el fluido de trabajo como en el caso del receptor del COSPAA-90-I.

Otro factor que influye en la baja eficiencia térmica del receptor es la baja conductividad térmica de su material (acero inoxidable A-304) comparada con la alta conductividad térmica de los receptores fabricados en cobre, como es el caso de los receptores citados en la bibliografía [33].

Por lo que al cambiar el material del receptor del COSPAA-90-I se podrían obtener mayores eficiencias térmicas de conversión al existir una mejor transferencia de calor desde la superficie del receptor hacia el fluido de circulación, mismo que también deberá ser cambiado por otro fluido de transferencia de calor con mejores propiedades térmicas como la conductividad térmica, el calor específico, etc que las del agua.

## 6

# Conclusiones y recomendaciones

Con el objetivo principal de este trabajo el cual fue diseñar, construir y caracterizar térmicamente un sistema de concentración solar de disco parabólico con montura ecuatorial a partir de una antena de telecomunicaciones de desecho y de acuerdo al estudio realizado se han llegado a las conclusiones que se describen en los siguientes párrafos:

### Conclusiones del diseño mecánico

La METAC tiene mayores ventajas con respecto a una estructura ASP siendo éstas las siguientes:

- Esta estructura será capaz de soportar vientos fuertes sin tener que llegar a una posición de resguardo como es el caso de la estructura ASP.
- El movimiento aparente en el seguimiento del sol se realiza en una sola dirección, debido al montaje ecuatorial.
- Debido a la configuración de la estructura, este movimiento se puede realizar con motores de baja potencia acoplados a un pequeño reductor, en comparación con los grandes motores y reductores de la estructura ASP.
- El empotramiento al suelo para la METAC es más simple debido a que las zapatas que sostienen al sistema son compactas con respecto a las de la estructura ASP.

- Para la construcción de los elementos que trabajan a tensión y compresión en la METAC se llegó a la conclusión que tubos cuadrados son más fáciles de trabajar en el taller mecánico del CIE en lugar de utilizar tubo industrial o tubo mecánico, por lo que se utilizó PTR de acero al carbón calibre 14.
- El único elemento estructural ( $\overline{EF}$ ) que trabaja en flexión se construyó a partir de una barra hueca de acero al carbón con espesor de 6 [mm], en lugar de utilizar una viga tipo I la cual resulta extremadamente pesada. Así, se obtuvo un elemento fácil de diseñar, fabricar y ensamblar.
- Con lo anterior se demostró que es posible construir una estructura con montura ecuatorial para disco parabólico más simple en su operación y más barata en su construcción que la montura tradicional tipo azimutal de un solo poste sin sacrificar la resistencia mecánica de sus elementos.

## Conclusiones de la caracterización térmica del concentrador-receptor

Las conclusiones en la caracterización térmica del sistema de concentración solar son las siguientes:

- Para determinar la reflectancia del concentrador se deben realizar pruebas a baja radiación solar directa, que en este caso fueron del orden de  $500 W/m^2$  y utilizando el receptor diseñado para trabajar sin remoción de calor.
- Al descubrir el receptor se puede observar un acentuado incremento en las temperaturas de la superficie del mismo, alcanzando éstas hasta  $210\text{ }^\circ\text{C}$  en un tiempo corto de 30 s, este gran incremento de temperaturas ocurre debido a que no hay remoción de calor. Por otra parte como este receptor está construido de lámina de cobre, presenta una alta conductividad térmica y permite suponer una temperatura relativamente uniforme.
- En los primeros instantes de la prueba de calentamiento se tiene un comportamiento lineal muy bien definido para la variación de temperatura del receptor con respecto al tiempo, por lo que se puede calcular el cambio en energía interna del receptor.
- Con base en los resultados experimentales obtenidos se determinó un valor medio de la reflectancia del concentrador de 0.81.

- Al comparar el valor de la reflectancia obtenido para la antena de telecomunicaciones de desecho del COSPAA-90-I contra los valores de reflectancia de los sistemas desarrollados mundialmente se observa que este valor está aproximadamente un 10 % por debajo de los sistemas Vanguard (0.935), MDAC (0.91), German-Saudi (0.92) y SBP (0.94), pero está dentro del rango de los sistemas CPG (de 0.85 a 0.78) y AISIN/Miyako (de 0.85 a 0.78).
- Se puede mencionar entonces que el valor de 0.81 es muy aceptable para una superficie que originalmente no esta diseñada para trabajar como concentrador solar.

Las pruebas de repetitividad realizadas al COSPAA-90-I arrojaron conclusiones importantes:

- Trabajando con niveles promedio de radiación solar directa de  $720 W/m^2$ , se alcanzaron temperaturas en la superficie del receptor entre  $135 ^\circ C$  y  $210 ^\circ C$ .
- La temperatura promedio en la superficie del receptor alcanzó valores desde  $68 ^\circ C$  hasta  $150 ^\circ C$  para flujos de 4 y de 1 l/min respectivamente.
- La temperatura a la salida del agua que fluye a través del receptor alcanzó valores aproximados entre  $35 ^\circ C$  y  $100 ^\circ C$  con 4 y 0.3 l/min respectivamente.
- En las pruebas de repetitividad observó la consistencia de los experimentos, debido a que se alcanzaron temperaturas similares en la superficie del receptor, así como en la temperatura de salida del agua en cada prueba individual en los distintos flujos volumétricos.
- Acotando el proceso de calentamiento del receptor para los diferentes flujos volumétricos, se obtuvo un excelente ajuste de la temperatura promedio experimental del receptor con la temperatura del modelo matemático.
- Los estados estacionarios se alcanzan en tiempos aproximados desde 10 y hasta 5 min con 4 y 1 l/min.
- De los resultados obtenidos en el modelo matemático, la constante B representa la temperatura del estado estacionario que se alcanza con un flujo volumétrico dado y la constante A es el factor de evolución del tiempo del estado transitorio.

- Al disminuir el flujo hasta  $0.3 \text{ l/min}$ , se obtiene producción de vapor a la salida del receptor a una temperatura cercana a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  durante aproximadamente 20 min, sin embargo, el sistema mostró una gran inestabilidad para mantener flujos bajos debido a que se utilizó una bomba para grandes flujos volumétricos.
- Debido a que la producción de vapor se alcanza con un flujo volumétrico muy bajo, se concluye que no es recomendable producir vapor en forma directa por lo que se deberá recircular el agua a un mayor flujo volumétrico.
- Aún cuando la producción de vapor se alcanza con flujo volumétrico bajo, se ha demostrado que es posible obtener calor de proceso industrial utilizando una antena parabólica de desecho como concentrador solar.

Las pruebas realizadas variando la temperatura a la entrada del receptor arrojaron las siguientes conclusiones:

- Al seleccionar cinco puntos para el estado estacionario de la temperatura de entrada al receptor para un flujo de  $5 \text{ l/min}$  y cuatro puntos para los flujos volumétricos 4, 3 y  $1 \text{ l/min}$  se obtuvo la curva de la eficiencia térmica del receptor.
- Las eficiencias térmicas máximas fueron de 40.19 %, 39.67 %, 39.07 % y 35.29 % para los flujos de 5, 4, 3 y  $1 \text{ l/min}$  respectivamente. Notando así, que a medida que el flujo volumétrico decrece la eficiencia térmica del receptor también decrece.
- Se encontró el coeficiente global de pérdidas de calor para el estado estacionario del receptor, obteniendo valores de 0.16, 0.17, 0.18 y  $0.21 \text{ kW/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$  para los flujos de 5, 4, 3 y  $1 \text{ l/min}$  respectivamente. De esta forma se ha observado que a medida que el flujo volumétrico decrece, el coeficiente global de pérdidas de calor aumenta debido a que se presenta un aumento en la temperatura promedio en la superficie del receptor, por lo que las pérdidas de calor desde el receptor hacia el ambiente aumentan.
- Al comparar el valor de la eficiencia térmica con respecto a los valores proporcionados en la tabla 1.5, se observa que la eficiencia térmica del receptor del COSPAA-90-I está muy por debajo de la eficiencia térmica de los sistemas desarrollados mundialmente, así como el valor de la temperatura promedio que se alcanza en la superficie del receptor. Debido a que el material del receptor

es de acero inoxidable, el cual presenta una conductividad térmica muy baja comparándola con la conductividad térmica de los receptores fabricados en cobre, como es el caso de los receptores citados en la bibliografía.

En resumen podemos decir que es posible obtener calor de proceso industrial utilizando una antena parabólica de desecho como concentrador solar.

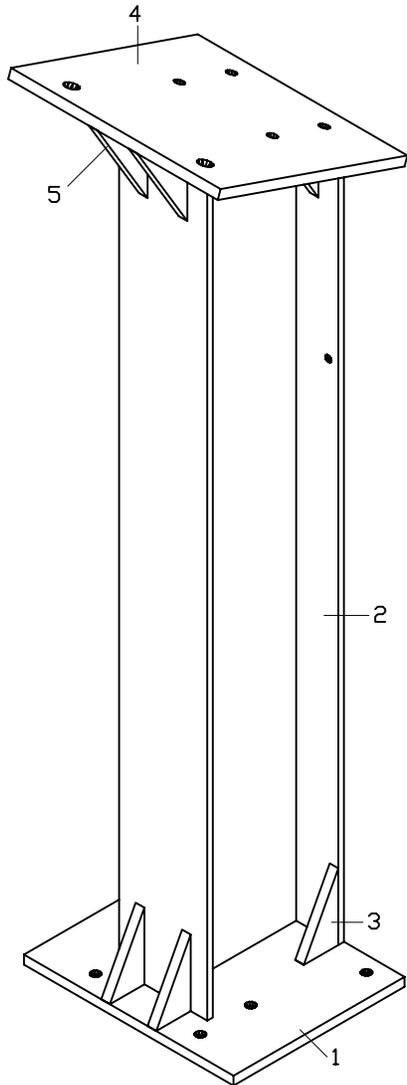
### **Recomendaciones para estudios futuros**

- Para reducir el espacio ocupado por la METAC, se recomienda construir zapatas para el soporte de la estructura.
- Para lograr un aumento en la eficiencia térmica del sistema concentrador-receptor del COSPAA-90-I se deberá realizar un análisis detallado de transferencia de calor al receptor con el objeto de optimizar la eficiencia térmica.
- Se deberá proponer el uso de otro material en la construcción del receptor, por ejemplo lámina de cobre, con lo cual se tendría una mejor transferencia de calor desde la superficie del receptor hacia el fluido.
- Debido a que no es viable producir vapor en forma directa en este sistema de concentración solar, se recomienda realizar un sistema de recirculación del agua que atraviesa el receptor.
- Otra posible forma para mejorar la producción de vapor con este tipo de sistema, es colocar arreglos en serie y en paralelo sistemas de concentración solar, logrando así que a mayores flujos volumétricos se obtengan aumentos de temperatura del agua hasta alcanzar temperaturas de ebullición.
- Se recomienda realizar un análisis económico del sistema comparándolo así con sistemas convencionales de producción de calor de proceso industrial, con el fin de obtener la viabilidad económica del proyecto en posibles aplicaciones industriales.

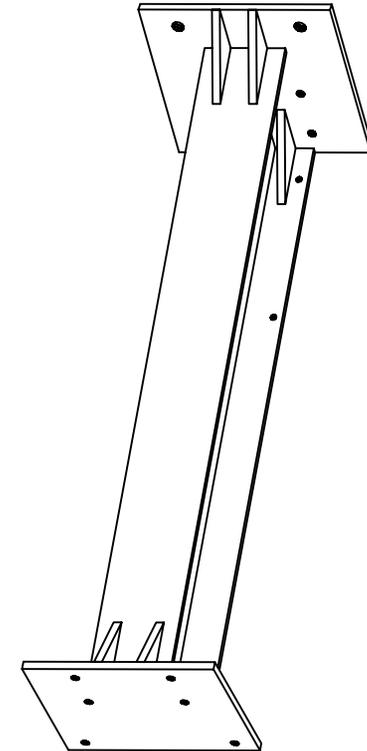
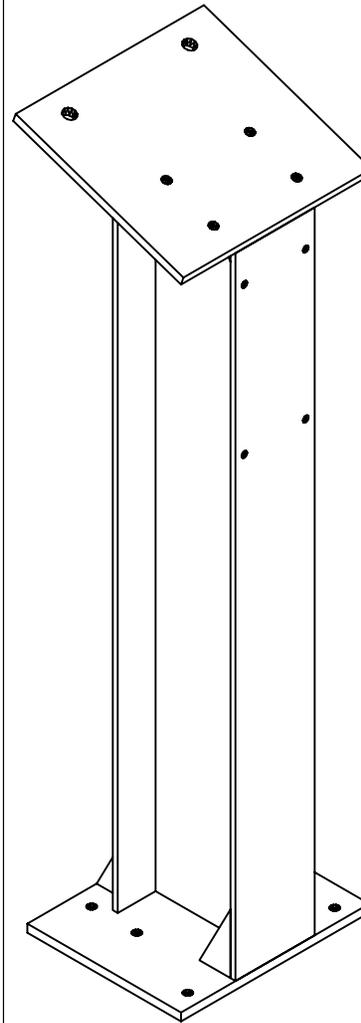
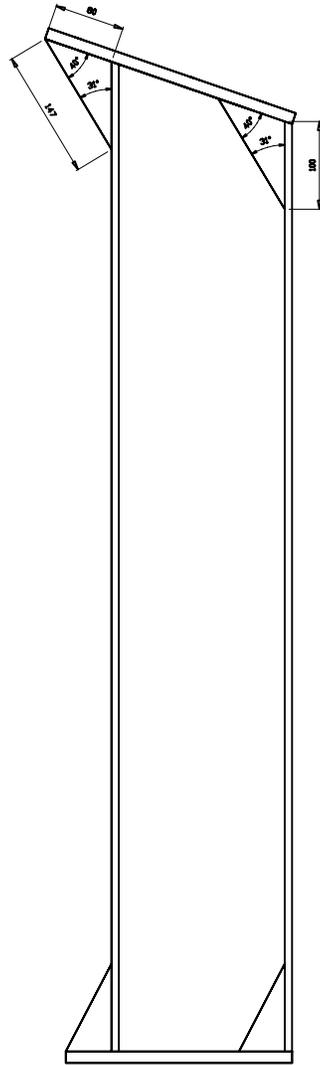
# Apéndice A

Muestra de planos de fabricación

Isométrico



Vista lateral



**CIE UNAM**

**CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA  
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

**COORDINACION DE CONCENTRACION  
SOLAR DSE**

NOMBRE:

**BASE A**

DIBUJO No.

**COSPAA-90-II-A-03**

REVISION:

**A**

REV.



PARA REVISION

C A M B I O S

FECHA

07/05/03

EXCEPTO INDICACIONES:

TOLERANCIAS DECIMALES: +1 mm

TOLERANCIAS ANGULARES: ± 1'

ACOTACIONES EN mm

DIBUJO

ARMANDO ROJAS MORIN

FECHA

07/05/03

REVISO

JESUS QUIRONES AGUILAR

FECHA

APROBO

DR. CLAUDIO A. ESTRADA GASCA

FECHA

# Vista de planta

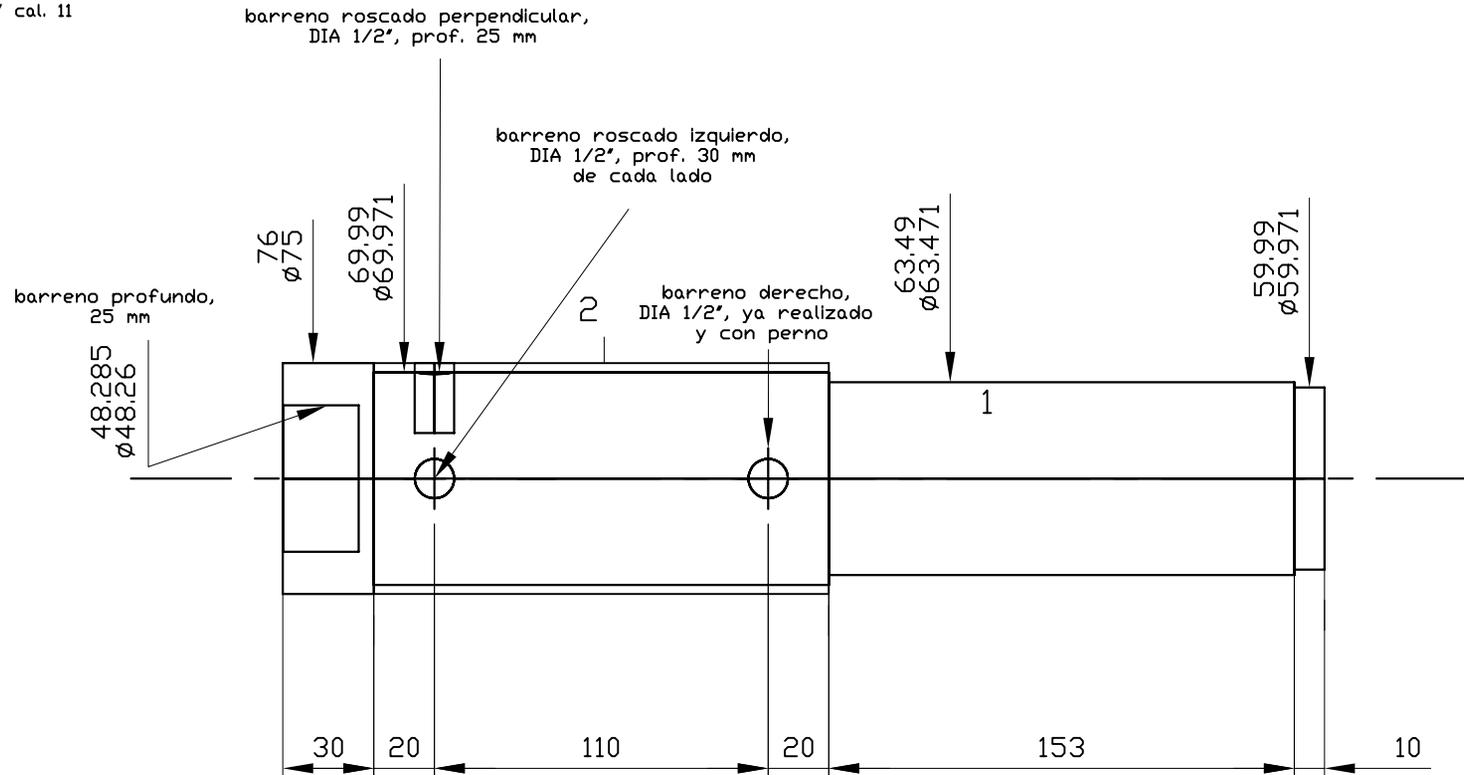
**Notas:**

1. Del arreglo original flecha y PTRÁ desmontar las piezas por separado, realizar el barreno profundo de 25 mm en la cara izquierda de la flecha.
2. Volver a montar el arreglo, colocando exclusivamente el perno en el barreno derecho.
3. Realizar el barreno profundo perpendicular, así como el roscado de los tres barrenos. Esto se realizará en ambas piezas montadas (Flecha y PTRÁ).

**Material a utilizar:**

Pieza 1. Redondo de acero 1045, DIA 3"

Pieza 2. PTR 3"x3" cal. 11



**CIE UNAM**  
CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA  
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

COORDINACION DE CONCENTRACION  
SOLAR DSE

NOMBRE: **FLECHA DEL NODO A**

DIBUJO No. **COSPAA-90-II-NA-01** REVISION: **A**

REV.	C A M B I O S	FECHA	EXCEPTO INDICACIONES:
△	PARA REVISION	03/04/03	TOLERANCIAS DECIMALES: +1 mm TOLERANCIAS ANGULARES: ± 1' ACOTACIONES EN mm
			DIBUJO ARMANDO ROJAS MORIN
			FECHA 03/04/03
			REVISO JESUS QUIRONES AGUILAR
			FECHA
			APROBO DR. CLAUDIO A. ESTRADA GASCA
			FECHA

## Vista horizontal

Nota:

Realizar 7 barrenos pasados DIA 1/2" y 2 barrenos pasados broca de 3/4" a la placa de acero (pieza 1).

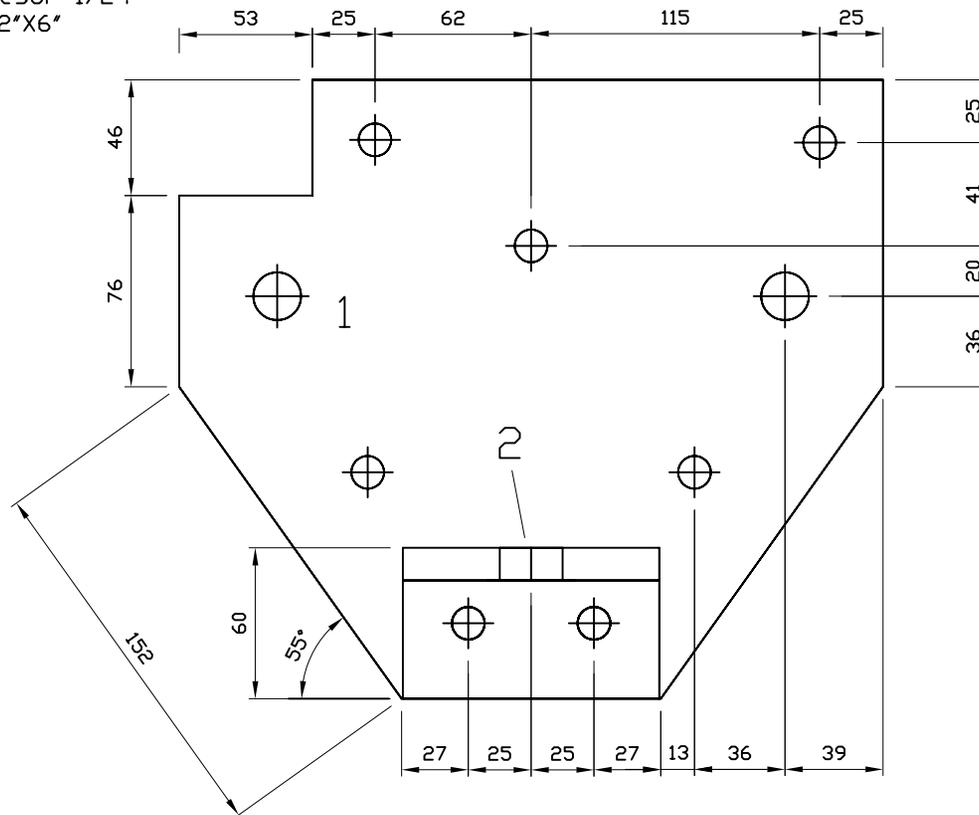
Realizar y colocar el ángulo de hierro como se indica en el plano frontal (pieza 2).

Realizar 2 piezas simétricas

Material a utilizar:

1. Placa de acero, espesor 1/2".

2. Angulo de hierro 1/2"X6"



**CIE UNAM**

CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA  
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

COORDINACION DE CONCENTRACION  
SOLAR DSE

NOMBRE:

NODOS B1 y B2

DIBUJO No.

COSPAA-90-II-NB-01

REVISION:

A

REV.



PARA REVISION

C A M B I O S

FECHA

04/04/03

EXCEPTO INDICACIONES:

TOLERANCIAS DECIMALES: -1 mm

TOLERANCIAS ANGULARES: ± 1'

ACOTACIONES EN mm

DIBUJO

ARMANDO ROJAS MORIN

FECHA

04/04/03

REVISO

JESUS QUIRONES AGUILAR

FECHA

APROBO

DR. CLAUDIO A. ESTRADA GASCA

FECHA

# Plano isométrico

## Notas:

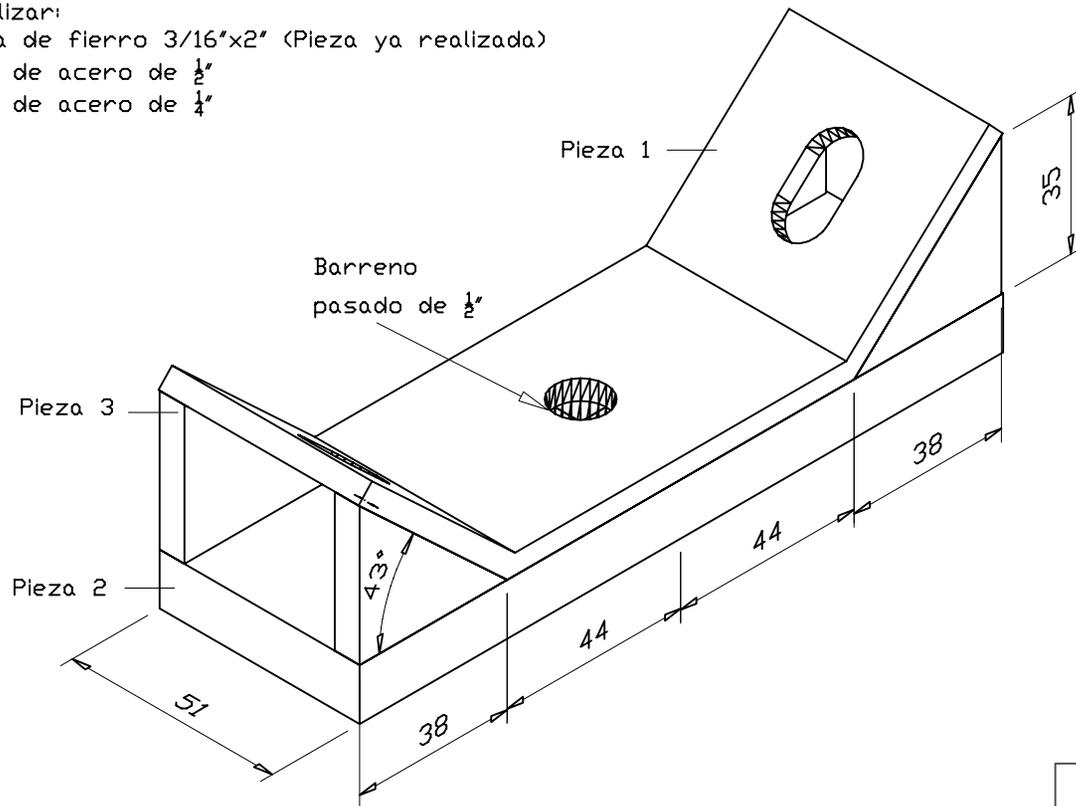
1. Realizar la placa base (pieza 2).
2. Realizar 4 cartabones (pieza 3).
3. Soldar la placa base y los cartabones a la solera (pieza 1).
4. Realizar barreno de pasado de  $\frac{1}{2}$ " al arreglo después de soldar.

## Material a utilizar:

Pieza 1. Solera de fierro 3/16"x2" (Pieza ya realizada)

Pieza 2. Placa de acero de  $\frac{1}{2}$ "

Pieza 3. Placa de acero de  $\frac{1}{4}$ "



<b>CIE UNAM</b>			
CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO			
COORDINACION DE CONCENTRACION SOLAR DSE			
DIBUJO		NOMBRE:	
ARMANDO ROJAS MORIN	FECHA 22/04/03	SOLERA CBs	
REVISO	FECHA	DIBUJO No.	
JESUS QUIRONES AGUILAR		COSPAA-90-II-S-CBs-04	
APROBO	FECHA	REVISION:	
DR. CLAUDIO A. ESTRADA GASCA		A	

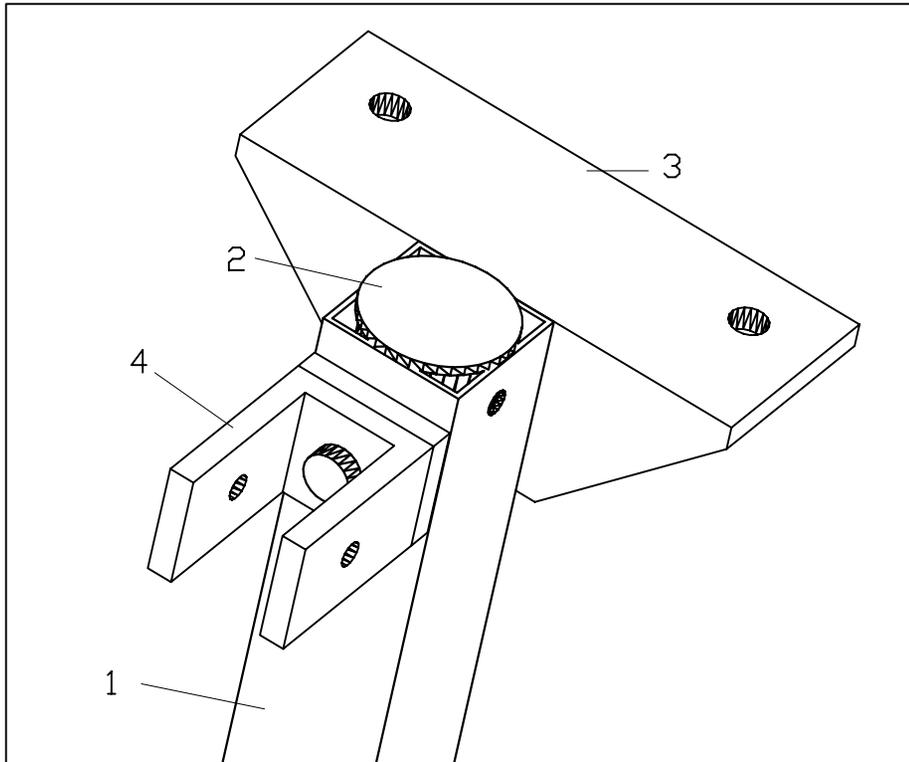
REV.	C A M B I O S	FECHA	EXCEPTO INDICACIONES:
$\Delta$	PARA REVISION	22/04/03	TOLERANCIAS DECIMALES: -1 mm TOLERANCIAS ANGULARES: $\pm 1'$ ACOTACIONES EN mm
			DIBUJO
			ARMANDO ROJAS MORIN
			REVISO
			JESUS QUIRONES AGUILAR
			APROBO
			DR. CLAUDIO A. ESTRADA GASCA

## Isométrico

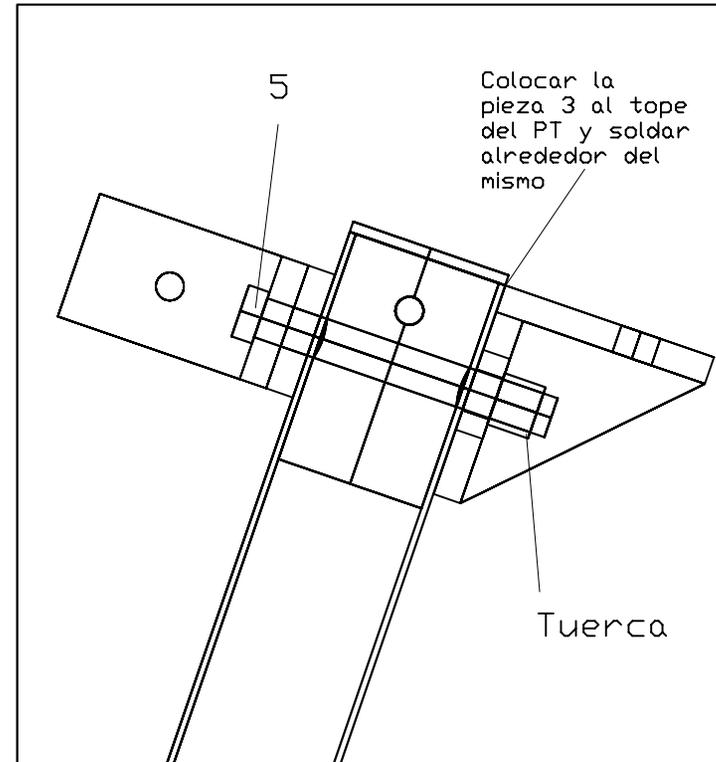
### Notas:

1. Colocar las piezas 1, 2, 3 y 4 (pieza 1 del plano C0SPAA-90-II-PT-07) como se observa en el plano e insertar un perno de acero inoxidable de  $\frac{3}{4}$ " X 6" (pieza 5) y atornillar éste con tuerca a las mismas piezas como se muestra en el plano.
2. Soldar alrededor del borde de las piezas 1 y 3.

## Isométrico



## Vista lateral



<b>CIE UNAM</b>	
CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO	
COORDINACION DE CONCENTRACION SOLAR DSE	
NOMBRE: <b>ENSAMBLE DEL POSTE TENSADO</b>	
DIBUJO No.	<b>COSPAA-90-II-PT-08</b>
REVISION:	<b>A</b>

REV.	CAMBIOS	FECHA	EXCEPTO INDICACIONES:
$\triangle$	PARA REVISION	03/04/03	TOLERANCIAS DECIMALES: +1 mm TOLERANCIAS ANGULARES: $\pm 1^\circ$ ACOTACIONES EN mm
			DIBUJO ARMANDO ROJAS MORIN
			FECHA 03/04/03
			REVISO JESUS QUIÑONES AGUILAR
			FECHA
			APROBO DR. CLAUDIO A. ESTRADA GASCA
			FECHA

# Bibliografía

- [1] Programa Energía y Medio Ambiente Hacia el Desarrollo Sustentable, SENER-SEMARNAT 2002.
- [2] International Energy Agency (IEA), Key world energy statistics, 2002 Edition.
- [3] Villalonga, J. C., Greenpeace Solar, Revista Construir, Año 12, No. 60, 2001.
- [4] <http://www.galeon.com/energiasolar>
- [5] Díaz, A., Desarrollo Tecnológico de Captación Solar para Acondicionamiento de Aire, Sección de Graduados, ESIME, IPN.
- [6] Zimmerman, J., "General Electric Point Focus Solar Concentrator Status," parabolic Dish Solar Thermal Power Annual Power Review, Pasadena, CA, January 1981, DOE/JPL 1060-46, May 1981.
- [7] Aprovechamiento de la energía solar en forma térmica para la producción de energía eléctrica, Grupo de Energía Solar, FI, Universidad Nacional de Cuyo.
- [8] Thomas, A., Guyen, H. M., Parabolic trough concentrators: desing, construction and evaluation, Energy Conversion Management 34. 410-416, 1993.
- [9] Becker, M., Klimas, P. C., Second Generation Central Receiver Technologies, C. F. Müller, karlsruhe, 1993.
- [10] <http://www.cai.org.ar/revista/sol1065.html>
- [11] Trieb, F., Langnib, O., Klaib, H., Solar electricity generation a comparative view of technologies, costs and environmental impact, Solar Energy vol. 59, Nos. 1-3, 89-99, 1997.

- 
- [12] R. Almanza, F. Muñoz, Ingeniería de la Energía Solar, El colegio Nacional, México 1994.
- [13] Almanza et al. Ingeniería de la Energía Solar II, Serie Investigación y Desarrollo, IIUNAM, SID/636, 2003.
- [14] <http://www.iingen.unam.mx/C18/Planta%20Solar>
- [15] Almanza, R., Lentz, A. Electricity production at low powers by direct steam generation with parabolic troughs, Solar Energy, 64(1-3), 115-120.
- [16] Trieb, F. Solar Electricity Generation, DLR Institut für technische Thermodynamik, Alemania, 1995.
- [17] Thomas, A. Solar steam generating systems using parabolic trough concentrators, Energy Conversion and Management, 37(2), Pergamon Press, 215-245, 1996.
- [18] Müller, M., Lippke, F., Ratzesberger, R. Direct steam generation in parabolic trough solar power plants, A resume on ISES learned and an outlook on the next steps, Proceedings of ISES Solar World Congress, Budapest, Hungría, pp. 203-208, 1993.
- [19] Keck, T. W., Scheil, W., Benz, R. An innovative Dish/Stirling system, Proceedings of the 25th IECEC, Reno, NV, Vol. 6, pp. 317-322, 1990.
- [20] Droher, J. J., Squier, S. E., Performance of the Vanguard Solar Stirling Engine Module, Electric Power Research Institute, EPRI AP-4608, Julio, 1986.
- [21] Johnston, G., Flux mapping the 400 m<sup>2</sup> "Big Dish" at the Australian National University, Transactions of the ASME, Vol. 117, 290-293, 1995.
- [22] Goldberg, V. R., Proceedings of the 1st. Semi-annual Distributed Receiver System Program, DOE/JPL-1060-33, 1980.
- [23] Kaneff, S., Proceedings of Solar World Congress (ISES), Perth, p. 2 762, 1983.
- [24] Washom, B. J., Vanguard I. Solar parabolic dish-Stirling engine module final report, Advaco Corporation, DOE-AL-16333-2, COE, 1984.
- [25] Rogan, J. E. Proceedings of the Distributed Receiver Solar Thermal Technology Conference, SAND-2454, 1985.
-

- [26] Kinoshita, G. S., The Shenandoah parabolic dish solar collector, SA ND83-0583, 1985.
- [27] Strchan, J. W., An evaluation of the LEC-460 solar collector, SAND8 7-0852, 1987.
- [28] Barber, R. E., Proceedings of the Distributed Receiver Solar Thermal Technology Conference, 1985.
- [29] Jaffe, L. D., Solar Energy, 42, 173, 1988.
- [30] Mancini, T. R., Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 113, 180, 1991.
- [31] Schiel, W., Keck, T., Kerm, J., Schweitzer, A. Proceedings of ASME: International Solar Energy Conference, 1994.
- [32] Kaushika, N. D., Kaneff, S. Proceedings of Advances in Solar Energy Tech. ISES, pp. 1607, 1987.
- [33] Schmidt, G., Schmidt, P., Zewen, H., Moustafa, S. Development of a point focusing collector farm system. Solar Energy, Vol. 31, 294, 1983.
- [34] Kaushika, N. D., Viability aspects of paraboloidal dish solar collector systems. Renewable Energy, Vol. 3, 787, 1993.
- [35] Kaushika, N.D., and Reddy, K.S., Performance of a low cost solar paraboloidal dish steam generating system, Energy Conversion Management 713-726, 2000.
- [36] Jiménez, M.R; F. Hernández y Dorantes, R., 1997. Construcción de un concentrador solar a partir de una antena parabólica. Memorias la XXI Semana Nacional de Energía Solar, Vol. único, pags. 433-438. Editó Gobierno de Chihuahua - ANES. Chihuahua, Chih.
- [37] Claudio A. Estrada, Rubén Dorantes, Eduardo Rincón, A parabolic dish concentrator from telecommunication antenna: optical and thermal study of the receiver, Proceedings of the Solar World Congress, ISES, Jerusalem, Israel 1999.
- [38] Romero, V.J ; Cice2 / Dekgen2: A Software Package for Facilitated Optical Analysis of 3-D Distributed Solar, Energy Concentrators Sandia National Laboratories, SAND91-2238, 1994.

- [39] Claudio A. Estrada, Camilo Arancibia y Nestor Hernández, Determinación de la geometría y dimensiones óptimas de un receptor para un concentrador solar paraboidal con ángulo de apertura de 90 °, Poceedings of the Millennium Solar Forum 2000, México City, pp. 227-231, September 2000.
- [40] Bartel, J.J., and Skavarna, P. E., "10 Mwe Solar thermal Central Receiver pilot Plant," ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 106, 230-238, 1986.
- [41] Georgia Power, "Solar Total Energy", Annual technical Progree report for the period july 1, 1980 through June 30, 1982, Coordinated by E. J. Ney for Georgia power Co., P.O. Box 4545 Atlanta, gA 30302, 1982.
- [42] Carroll, D., "Solar Plant 1," Sun World, Vol. 9, No. 1, pp. 10-11,27, 1985.
- [43] Moustafa, S., et al., "Desing Specifications and Application of a 100 kWe (700 kWt) Cogeneration Solar power Plant," Solar Energy, Vol. 32, No. 2, 236-269, 1984.
- [44] C. Cordy, A strong, low-cost mount for parabolic dish solar collectors, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 117, 205-209, August 1995.
- [45] Peterka, J. A., and Derickson, R. G., "Wind Load Design Methods for Ground-based Heliostats and Parabolic Dish Collectors," SAND92-7009, Sandia Corporation, Albuquerque, NM, Sep 1992.
- [46] Gere, J. M., and Timoshenko, S. P., "Mechanics of Materials", 3rd. ED, PWS-KENT, 1990.
- [47] Baird, D. C., "Experimentation: An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design, 3a. ED. Prentice Hall, 1995.
- [48] Pérez Rábago, C. A., Diseño, construcción y puesta en operación de un calorímetro de cavidad cónica para un concentrador solar de foco puntual (DEF-RAC), Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2003.
- [49] Noyes, G. The effect of component efficiency and operating conditions on the 50 kW Dish Stirling system in Riyadh, Saudi Arabia. Transactions of the ASME, Journal of Solar Energy Engineering. Vol. 112, No.4, 244-246, 1990.
- [50] Stone, K. W., López, C. W., Mc Alister, R. E., Economic performance of the SCE Stirling dish, Transactions of the ASME, Vol. 117, 210-214, 1995.

- [51] Sekiya, H., Tsuchiya, K., Eguchi, K., Wtanabe, H. Performance analysis of solar Stirling power system for terrestrial use. Proceedings of the 1992 ASME International Solar Energy Conference, Maui, Hawaii, pp. 1185-1194, 1992.
- [52] Harris, J., Lenz, T., "Thermal performance of solar concentrator / cavity receiver systems", Solar Energy Vol.34, No.2, pp 135-142, USA, 1985.
- [53] Timoshenko, S. P., Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, New york, 1936.
- [54] Riley, W. F., and Sturges, L. D., "Statics", 2nd. ED, John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [55] Beer, F. P., and Johnston, E. R., "Mecánica de Materiales", 2a. ED, Mc Graw-Hill, 1993.
- [56] Hibbeler, R., "Mecánica vectorial para ingenieros. ESTATICA", 10a. ED, Pearson Education, 2004.
- [57] Nagle, R. K., Saff, E., Snider, A. D., "Ecuaciones difeenciales y problemas con valores en la frontera", 3a. ED, Addison Wesley, 2001.