



**LACYQS**  
Laboratorio Nacional de Sistemas  
de Concentración Solar y Química Solar

# Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar

## Informe Técnico Final

Proyecto: CONACYT LN-56918

Responsable Académico: Dr. Claudio A. Estrada Gasca

Período reportado: Febrero - Diciembre de 2010

### Elaborado por:

UNAM: Claudio A. Estrada Gasca, Camilo A. Arancibia Bulnes, Antonio Jiménez González y Carlos A. Pérez Rábago; UNISON: Rafael Cabanillas López, José Manuel Ochoa de la Torre y Víctor Hugo Benítez Baltazar; INAOE: Sergio Vázquez y Montiel y Fermín Granados Agustín.

### Extracto:

Este documento es el informe técnico final del proyecto Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar que fue aprobado por el CONACYT en mayo del 2007, y corresponde al 4to informe técnico parcial. Se presentan la terminación y puesta en operación de las tres instalaciones que se construyeron: el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo, la Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales y el Campo de Pruebas de Helióstatos. Las dos primeras instalaciones se encuentran ubicadas en el Centro de Investigación en Energía de la UNAM en Temixco, Morelos, la tercera instalación se encuentra en terrenos de la Universidad de Sonora en Hermosillo, Sonora.



# Contenido

1.	Introducción	3
2.	Actividades propuestas	3
3.	Horno Solar de Alto Flujo Radiativo	6
3.1	Terminación y Puesta a punto del Horno Solar de Altos Flujos Radiativos	7
3.1.1	Caracterización del helióstato	
3.1.2	Caracterización del atenuador	
3.1.3	Concentrador. Alineación de espejos	
3.1.4	Mesa con movimiento tridimensional (Jirafa)	
3.1.5	Sistema de refrigeración	
3.1.6	Sistema de control	
3.2	Operación del Horno Solar de Altos Flujos Radiativos	14
3.2.1	Toma de imágenes sobre pantalla lambertiana	
3.2.2	Forma de la radiación solar concentrada en la zona focal	
3.2.3	Fundición de placa de acero	
4.	Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales (PSTFAR)	19
4.1	Terminación de la Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales	19
4.1.1	Terminación de la planta piloto	
4.1.2	Terminación del Laboratorio de Caracterización de Procesos Fotocatalíticos en Línea	
4.1.3	Terminación de Laboratorio de Síntesis y Caracterización de Fotocatalizadores Nanoestructurados	
4.1.4	Unidad de Diseños Avanzados e Ingeniería equipada con centro de maquinado y equipo de soldadura	
4.2	Puesta a punto y operación de las instalaciones del subproyecto Planta Solar Fotocatalítica	25
4.2.1	Degradación fotocatalítica del plaguicida Carbarilo.	
4.2.2	Preparación de fotocatalizadores	
5.	Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH)	28
5.1	Diseño del CPH	28
5.2	Terminación del Campo de Pruebas de Helióstatos	28
5.2.1	Diseño y construcción de la Torre y el Laboratorio	
5.2.2	Desarrollo de helióstatos	
5.3	Instrumentación y operación del CPH	34
5.3.1	Instrumentación y control del CPH	
5.3.2	Operación del CPH. Caracterización de helióstatos	
6.	Conclusión	40
	Apéndices	41
A.1.	Personal Participante	41
A.2.	Formación de Recursos Humanos	43
A.3.	Publicaciones	45
A.4.	Lista de Equipo en proceso de propiedad intelectual	47
A.5.	Actividades de Difusión y Divulgación	48

## 1. Introducción

Como se establece en el proyecto aprobado, el propósito del Laboratorio Nacional de Infraestructura en Sistemas de Concentración Solar y Química Solar, que hemos denominado LACYQS (Laboratorio de Concentración Y Qímica Solar) por simplicidad, es constituir una red de grupos de investigación que, a través del diseño, construcción y operación de tres instalaciones solares, avance en el desarrollo de dichas tecnologías en México, generando conocimiento científico y tecnológico, así como formando recursos humanos de alto nivel en el área. A saber, estas tres instalaciones solares son: un Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR), una Planta Solar Piloto para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales (PSTFAR) y un Campo de Pruebas para Helióstatos (CPH).

En los Informes Técnicos 1-3 hemos dado cuenta del avance del proyecto en períodos anteriores. Actualmente se han concluido los tres subproyectos. Se terminaron todas las obras civiles, la compra de equipos científicos y la fabricación de equipos de diseño especial. Se ha realizado toda la instrumentación de los sistemas y la implementación de los diferentes sistemas de control. Todo esto ha permitido poner en operación a los tres instalaciones y evaluar su comportamiento. En las secciones siguientes del presente informe se reporta lo anterior con detalle.

## 2. Actividades propuestas

Las actividades para el desarrollo de las tres instalaciones solares se plantearon por etapas, de acuerdo al cronograma de la Tabla 1, el cual incluye el período de ampliación de la duración del proyecto a 8 semestres aprobado por CONACYT.

Tabla 1. Cronograma del proyecto.

Etapa	Nombre	Duración (meses)	Semestre							
			1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
1	Construcción del HSAFR	24	x	x	x	x	x			
2	Instrumentación de HSAFR	12				x	x	x	x	
3	Puesta en operación del HSAFR	12					x	x	x	x
4	Construcción de la PSTFAR	18	x	x	x	x				
5	Instrumentación de la PSTFAR	12				x	x	x	x	
6	Puesta en operación de la PSTFAR	12					x	x	x	x
7	Construcción del CPH	24	x	x	x	x	x	x	x	x
8	Instrumentación del CPH	12				x	x	x	x	x
9	Puesta en Operación de la CPH	12					x	x	x	x

En concordancia con el proyecto sometido, estas etapas se componen de las siguientes actividades:

### Etapa 1. Construcción del HSAFR

- a) Diseño y construcción del edificio para la instalación del HSAFR
- b) Construcción del concentrador del HSAFR
- c) Adquisición e instalación del helióstato
- d) Diseño, construcción e instalación del atenuador

### Etapa 2. Instrumentación del HSAFR

- a) Instalar en la zona focal de HSAFR una mesa de posiciones con tres grados de libertad que es controlada a través de una computadora.
- b) Instalar un sistema de circuito cerrado de televisión para monitorear la zona focal.
- c) Instalar un sistema de acondicionamiento de temperatura para los reactores.
- d) Equipar la zona focal con extensiones y conectores para diferentes tipos de termopares, así como un sistema de adquisición de datos para múltiples canales.
- e) Equipar el HSAFR con cámaras de infrarrojo y CCD, para determinar las distribuciones de temperatura y de flujo radiativo.
- f) Equipar al HSAFR con una pequeña estación meteorológica.

### Etapa 3. Puesta en operación HSAFR

- a) Construcción y puesta en operación de reactores foto-químicos.
- b) Implementación de un sistema de cómputo centralizado que permita operar todas las acciones del HSAFR.
- c) Instalación de un motor Stirling de 4 kW eléctricos.

### Etapa 4. Construcción de la PSTFAR

- a) Construcción en obra civil de 118 m<sup>2</sup> para una planta fotocatalítica en la plataforma solar del CIE-UNAM, esto es, adecuación de un espacio físico en plataforma con instalaciones eléctricas, hidráulicas y de voz y datos
- b) Construcción de un laboratorio de caracterización de procesos fotocatalíticos de 80 m<sup>2</sup> para mediciones en línea
- c) Construcción de un laboratorio de síntesis y caracterización de fotocatalizadores nanoestructurados de 100 m<sup>2</sup> para su aplicación en procesos fotocatalíticos

### Etapa 5. Instrumentación de la PSTFAR

- a) Instrumentación del espacio físico de 118 m<sup>2</sup> para la instalación de la planta solar fotocatalítica.
- b) Instrumentación del laboratorio de caracterización de procesos fotocatalíticos de 80 m<sup>2</sup> para mediciones en línea.
- c) Instrumentación del laboratorio de síntesis y caracterización de fotocatalizadores nanoestructurados de 100 m<sup>2</sup> para su aplicación en procesos fotocatalíticos.
- d) Equipamiento de la unidad de desarrollo tecnológico existente en el CIE con centros de maquinado y equipo de soldadura.

### Etapa 6. Puesta en operación PSTFAR

- a) Puesta en marcha y operación de planta solar fotocatalítica.
- b) Puesta en marcha y operación del laboratorio de caracterización de procesos fotocatalíticos para mediciones en línea.
- c) Puesta en marcha y operación del laboratorio de síntesis y caracterización de fotocatalizadores nanoestructurados para su aplicación en procesos fotocatalíticos.
- d) Puesta en marcha y operación de 1 centro de maquinado horizontal, 1 centro de maquinado vertical, y un equipo de soldadura en la unidad de desarrollo tecnológico.

### Etapa 7. Construcción del CPH

- a) Diseño del campo de prueba de helióstatos

- b) Adquisición e instalación de 15 helióstatos en el campo de pruebas
- c) Diseño y construcción de la torre central para el CPH

Etapa 8. Instrumentación del CPH

- a) Instalar un sistema de circuito cerrado de televisión en la torre central.
- b) Equipar la torre con extensiones y conectores para medición de temperatura, así como un sistema de adquisición de datos de múltiples canales.
- c) Equipar la torre con cámaras CCD, para determinar las distribuciones de flujo radiativo en el receptor.
- d) Equipar el CPH con una estación meteorológica.

Etapa 9. Puesta en operación del CPH

- a) Caracterización de los helióstatos base del CPH.
- b) Implementación de un sistema de mantenimiento de los helióstatos.
- c) Puesta en operación del CPH

Algunas de estas etapas han sido ajustadas y varias actividades se tuvieron que recalendarizar. Sin embargo, el proyecto se terminó el 31 de diciembre del 2010. En las secciones siguientes se presenta el desglose de las actividades realizadas en el período de Febrero a Diciembre del 2010.

### 3. Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR)

De acuerdo a lo planteado en la primera etapa del LNSCSQS), el subproyecto del HSAFR consiste esencialmente de un concentrador, un heliostato, un atenuador, una mesa con movimiento tridimensional para receptores, un sistema de control de todas las componentes y una serie de espacios físicos para albergar todos estos equipos. El concentrador cuenta ahora con 211 espejos esféricos de forma hexagonal de 40 cm de diámetro que se montan sobre una estructura que les permite alinearse. El heliostato que se tiene en operación mide 36 m<sup>2</sup> y está compuesto por 25 facetas planas. El espacio físico consta de un edificio de 120 m<sup>2</sup> de superficie y un espacio exterior de 100 m<sup>2</sup>.

En el desarrollo de esta instalación se realizaron un gran número de tareas donde participaron diferentes grupos de trabajo de diferentes instituciones. En el período, se terminaron los diseños mecánicos del concentrador y del heliostato. Se fabricaron (cortaron, generaron, esmerilaron y pulieron) 260 espejos del concentrador. Se depositaron las películas reflectoras en los 260 espejos del concentrador. Se fabricaron todas las piezas mecánicas del concentrador y del heliostato. Se instaló toda la estructura metálica de soporte del concentrador. Como se comentó en el primer informe técnico, el concentrador solar tiene cinco ópticas diferentes (cinco grupos de espejos esféricos con diferentes radios de curvatura: 7.5, 8, 8.5, 9 y 9.5 m). En esta primera etapa del laboratorio se instalaron 211 espejos del concentrador que corresponden a las dos primeras ópticas. Se diseñó la metodología de alineación de los espejos del concentrador y se alinearon. La figuras 1 y 2 muestran dos fotografías del estado actual del HSAFR.



Fig. 1. Vista exterior del HSAFR donde se aprecia el heliostato, el atenuador y el concentrador.

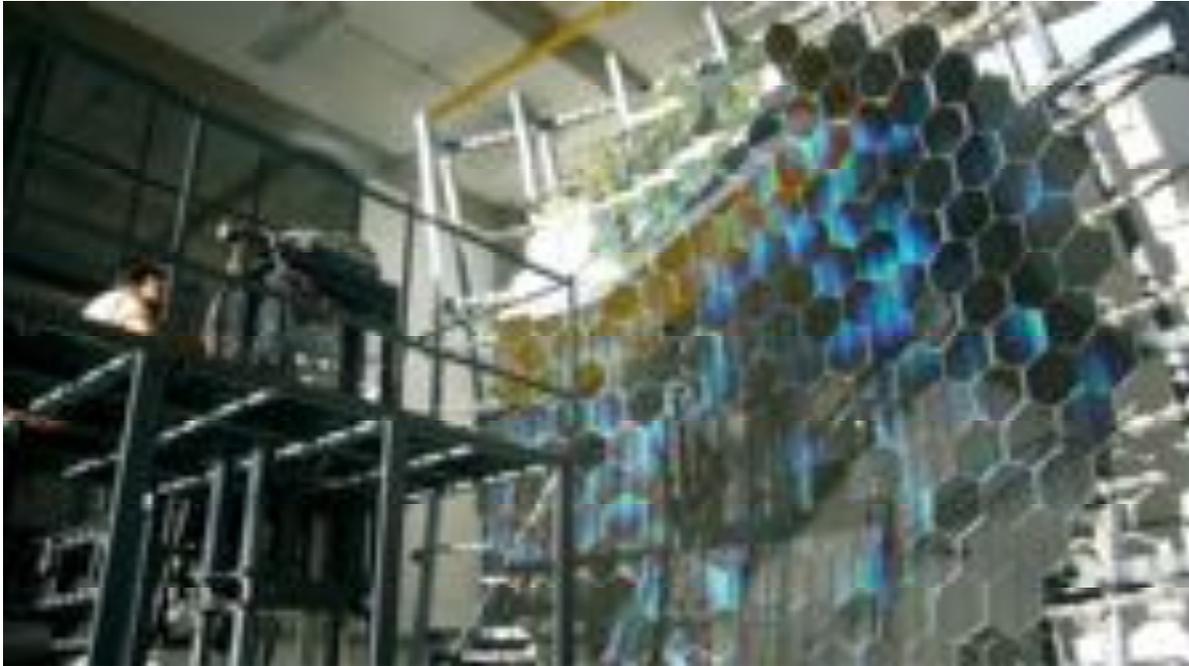


Fig. 2. Vista interior del HSAFR donde se aprecia el concentrador faceteado y la mesa de movimiento tridimensional.

### **3.1 Terminación y Puesta a Punto del Horno Solar de Altos Flujos Radiativos**

En esta sección se describe los diferentes componentes principales que constituyen el HSAFR, su terminación y la puesta a punto de algunos de ellos, a saber, el heliostato, el atenuador, el concentrador, la mesa con movimiento tridimensional, el sistema de refrigeración y el sistema de control.

#### **3.1.1 Caracterización del Heliostato**

Como ya se ha comentado en informes pasados, no fue posible llevar a cabo la adquisición de heliostatos comerciales para el proyecto, por ello se tomó la decisión de desarrollarlos en México. Esto alargó los tiempos de ejecución, pero se tuvo la ventaja de dar a los participantes una experiencia muy valiosa y única en el diseño de estos dispositivos, misma que redundará en un mayor desarrollo de capacidades nacionales en esta tecnología.

Para el caso del HSAFR, el heliostato planteado debe de ser de 81 m<sup>2</sup> para garantizar el mayor número de horas de operación alrededor del medio día solar. Sin embargo, por problemas en la fabricación de los componentes para este heliostato, se decidió instalar uno de los heliostatos de 36 m<sup>2</sup> (H36), diseñado y fabricado para el sub-proyecto del CPH, y con unas ligeras modificaciones en la alineación de las facetas y en el sistema de control del seguimiento solar. Permitted operar el HSAFR con sus dos primeras ópticas (7.5 y 8 m de radio de curvatura), las cuales representan el 60% de la óptica total del instrumento. El H36 se compone de 25 facetas de 1.2 x 1.2 m con 6 mm de espesor. Dichas facetas para el caso del HSAFR se alinean para formar un solo plano, con ello se garantiza que todos los rayos reflejados se introducen al recinto paralelos al eje focal del concentrador. La Figura 3 muestra una fotografía del heliostato H36 del HSAFR.



Fig. 3. Helióstato de 36 m<sup>2</sup> de 25 facetas alineadas en un mismo plano del HSAFR.

Para comprobar el sistema de seguimiento del helióstato, al helióstato se le bloquearon todas las facetas, dejando solo una pequeña área expuesta a la luz solar, y se tomaron una secuencia de las imágenes solares proyectadas por el helióstato en la cortina cerrada del HSAFR. Las imágenes se tomaron durante un período de 4 horas alrededor del medio día solar. Aunque se observó un ligero movimiento de deriva por el lazo de control de retroalimentación de los motores, se mantuvo el seguimiento dentro de un rango menor a 2 mrad. En la figura 4 se muestra una secuencia de 6 imágenes tomadas a intervalos regulares donde se ve la imagen solar formada en la cortina del HSAFR.

### 3.1.2 Caracterización del Atenuador

Para el control de la potencia concentrada por el HSAFR en la zona focal del concentrador, se emplea un atenuador que bloquea una parte proporcional de la radiación solar reflejada por el helióstato y que pasa por la apertura del recinto donde se aloja el concentrador. El área bloqueada por el atenuador requirió ser caracterizada, para con ello generar un programa de control que automatiza la apertura proporcional del atenuador y por consiguiente la regulación en igual forma de la potencia concentrada. En la figura 5 se muestra una secuencia de fotografías del atenuador con los diferentes porcentajes de apertura.

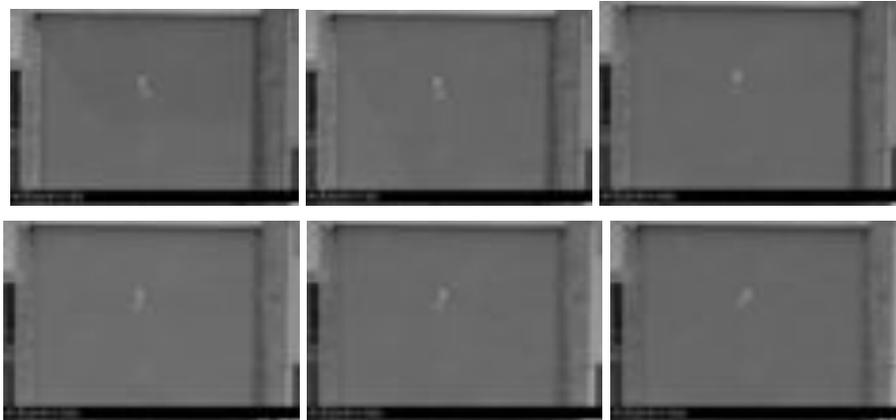


Fig. 4. Prueba de seguimiento del helióstato a lo largo de 4 horas.

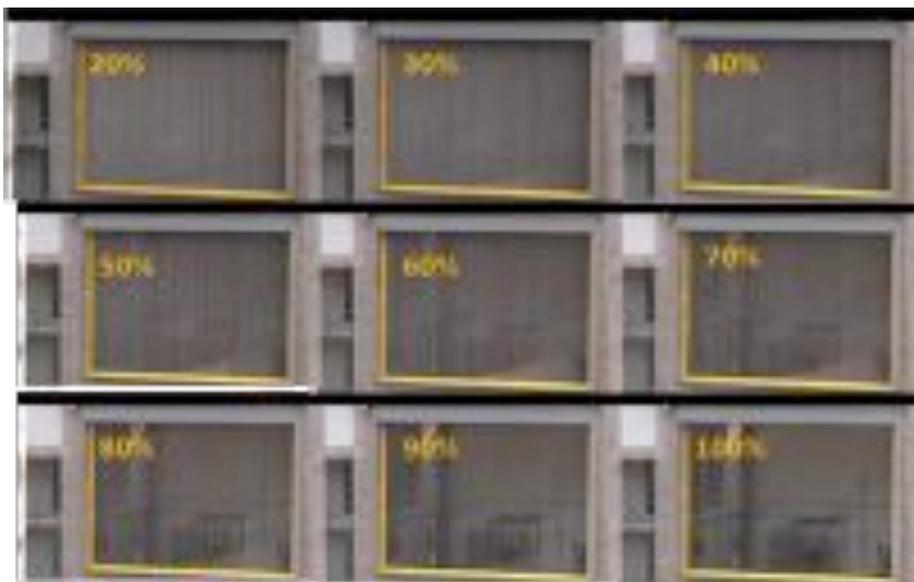


Fig. 5. Secuencia de fotografías mostrando diferentes porcentajes de apertura de atenuador.

### 3.1.3 Concentrador. Alineación de espejos

Los espejos hexagonales del concentrador del HSAFR fueron instalados uno a uno, sujetándolos a la malla-soporte fija en la estructura del concentrador. Se inició con el espejo central del concentrador, el llamado espejo K10, localizado en el vértice de concentrador. Éste se alineó utilizando un rayo láser localizado en el centro de curvatura a 7.5 metros del espejo, ver figura 6. Al láser se le puso un objetivo de microscopio con el propósito de que generara una onda esférica de luz coherente, ésta al alcanzar el espejo hexagonal debe regresar al centro de curvatura de donde partió. Los espejos tienen en su mecanismo de soporte un sistema que les permite moverse para alinearse y fijarse. Así, una vez que el rayo reflejado por el K10 coincidía con el orificio de donde salía el rayo láser, entonces se fijaba, esto también definió el eje óptico del sistema. Para cada uno de los espejos colocados sobre el concentrador, el haz luminoso de retorno del láser debe caer sobre un punto en una pantalla localizada en el centro de curvatura del espejo y perpendicular al eje óptico

del sistema. Como estos puntos de retorno se pueden calcular teóricamente, entonces se generó una pantalla con el patrón de retorno de las ondas esféricas para cada uno de los espejos. La figura 7 muestra el patrón de retorno del rayo láser para cada espejo correspondiente al primer cuadrante de los espejos de radios de curvatura de 7500 mm. La figura 8 muestra una fotografía de la pantalla con el patrón de retorno de un grupo de espejos alineados con esta metodología. Las alineaciones de los espejos con esta técnica se realizaron en el noche. Durante el día y con el uso del heliostato se concentraba radiación solar con un blanco localizado en la zona focal del concentrador para verificar tamaños de imagen y calidad de la alineación; en una sección posterior se muestra esta toma de imágenes. Con este procedimiento se alinearon los 211 espejos montados.

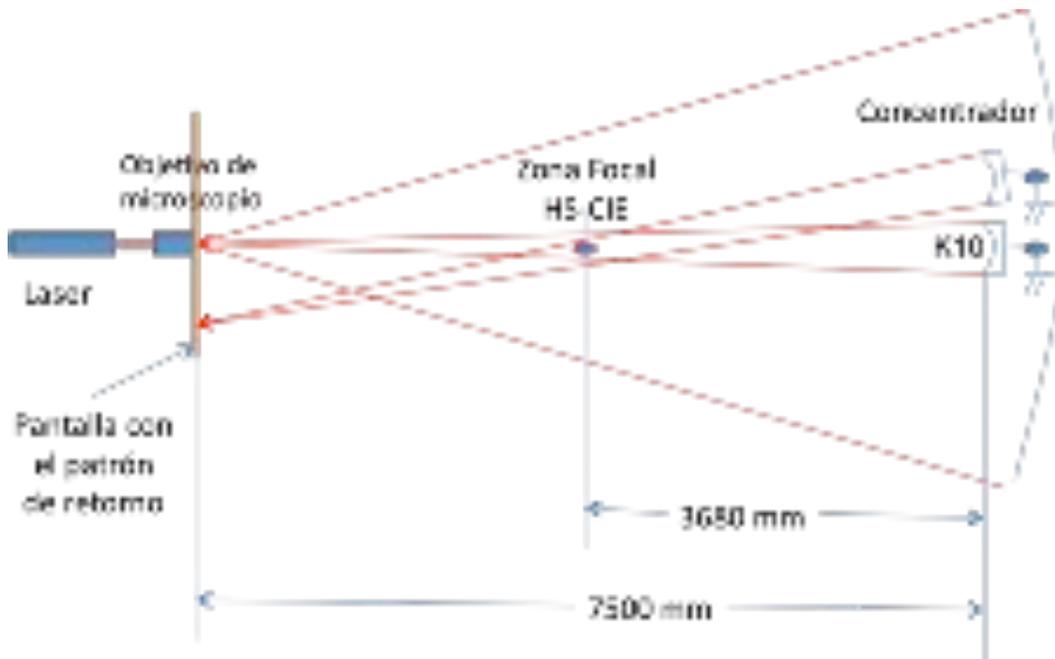


Fig. 6. Metodología de alineamiento de los espejos hexagonales del concentrador.

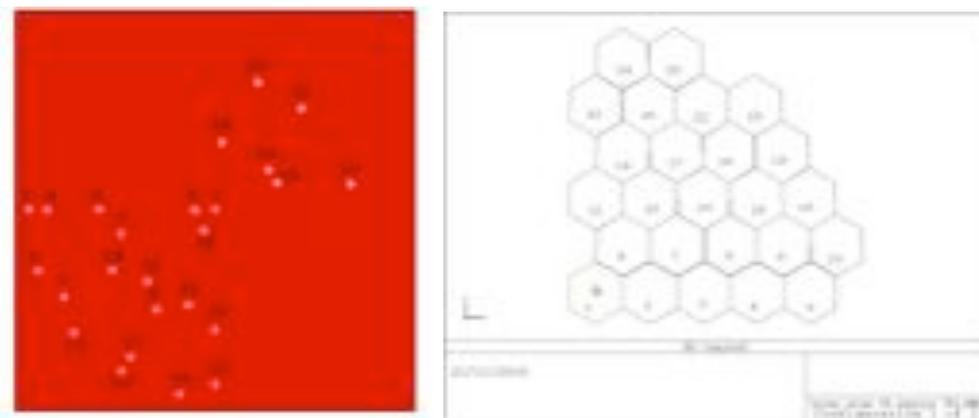


Fig. 7. (Izq.) pantalla con patrón de retorno del rayo láser para cada espejo del primer cuadrante de espejos de 7500 mm de radio de curvatura (der.).



Fig. 8. Fotografía de la pantalla con el patrón de retorno de los rayos láseres de un grupo de espejos de 7500 mm de radio de curvatura.

### 3.1.4 Mesa con movimiento tridimensional (Jirafa)

Se diseñó y construyó una mesa sobre la cual se montan los dispositivos experimentales. La mesa tiene la capacidad de proporcionar un movimiento con precisión de una décima de milímetro en cualquiera de las tres direcciones. Esto posibilita tener un gran control en el posicionamiento de los receptores/reactores en la zona focal del HSAFR. La figura 9 presenta dos fotografías de la mesa con movimiento tridimensional con capacidad de carga de 250 Kg.



Fig. 9. Fotografías de la mesa con movimiento tridimensional y capacidad de carga de 250 Kg. También se aprecia la plataforma de experimentación del Horno.

### 3.1.5 Sistema de Refrigeración

El sistema de refrigeración del HSAFR, tiene como finalidad el regular y operar los receptores/reactores y cualquier experimento que requiera una temperatura controlada, evaluando, con precisión, tanto la temperatura de suministro de agua, como, el flujo másico que se suministra a los experimentos. Con ello se puede calcular la cantidad de energía que se extrae a través de los receptores/reactores que se colocan en la mesa de experimentación del HSAFR, o bien, se ofrecen las condiciones idóneas para operar cualquier experimento.

En la figura 10 se muestra un diagrama del sistema de refrigeración consistente de dos depósitos de agua, dos bombas hidráulicas, varias electroválvulas y diversos sensores de temperatura, presión y flujo másico.

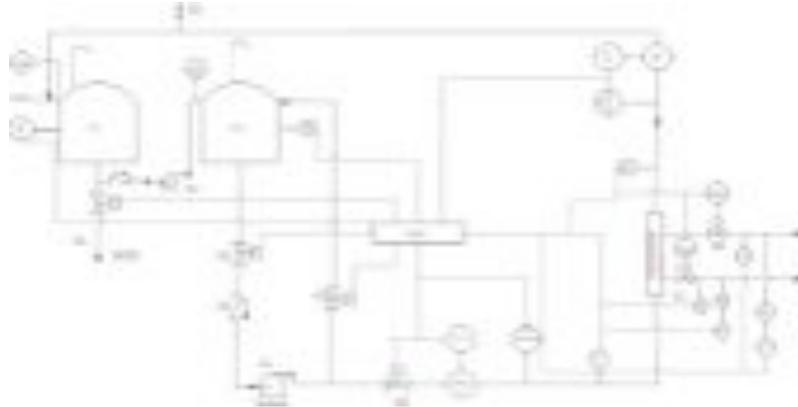


Fig. 10. Diagrama del sistema de Refrigeración del HSAFR.

### 3.1.6 Sistema de Control

El sistema de control del HSAFR permite controlar todas y cada una de sus componentes; la cortina, el atenuador, el helióstato, la mesa con movimiento tridimensional, el sistema de refrigeración, así como tomar datos de los diversos sensores ubicados en los dispositivos experimentales, y de las estaciones solarimétrica y meteorológica. El sistema de control central se coordina a través de lo que se denomina una maquina de estados, la cual manda llamar a los principales sistemas del HRFSF de uno en uno o en conjunto, sin que exista interferencia en el procesamiento a la hora de la ejecución de cada uno de los programas. Esto se hizo de esta manera para tener gran versatilidad, ver figura 11.

Este sistema de control se ejecuta a través de un sistema SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos por sus siglas en inglés) en el cual se presentaran todos los subsistemas del HRFSF, a saber:

- Helióstato: Selección del tipo de control de seguimiento que se desea ejecutar, arranque y paro, ajuste del offset del seguimiento y paro de seguridad.
- Atenuador: Control de la apertura y cierre regulada del atenuador.
- Sistema de adquisición de datos (DAQ): adquisición de parámetros experimentales (temperatura, presión, caudal, radiación, etc.).
- Adquisición de imágenes de los experimentos y su procesamiento para determinar la distribución de radiación que se encuentra en la zona focal del HRFSF.
- Mesa de coordenadas, que posiciona los experimentos dentro y fuera de la zona focal.
- Control del sistema de refrigeración: encendido y paro de las bombas de refrigeración.

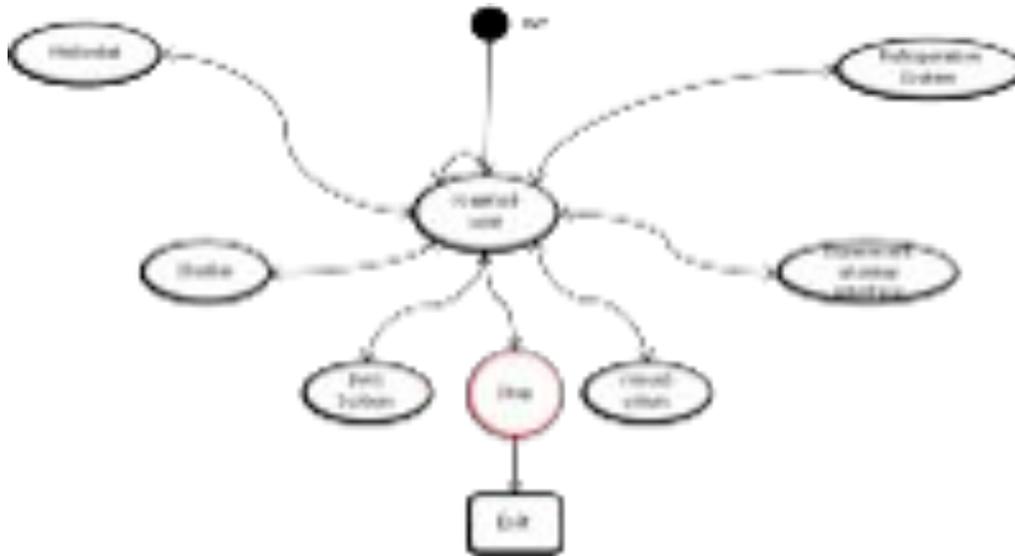


Fig. 11. Esquema y diagrama de la máquina de estados del Control Central del HSAFR.

Estos subsistemas se distribuyen dentro del edificio del HRFSSF como se muestra en la figura 12. Allí se muestra como los subsistemas de control (representados por los recuadros azules) y de adquisición (representados por los recuadros naranja) se encuentran interconectados con la computadora central (recuadro verde) a través de conexiones de red.



Fig. 12. Esquema de control y adquisición de datos del HRFSSF

Para el diseño de la arquitectura del sistema de control y adquisición de datos e imágenes para el HRFSSF se evaluó que la mejor opción para la integración del control y la adquisición de datos era a través de National Instruments sobre la plataforma de programación de LabView. Todo el control y adquisición de datos se coordina a través una computadora central y cada subsistema se programa de manera determinística, procesando cada uno de los códigos directamente en el controlador destinado para esa tarea, teniendo protocolos de comunicación entre todos los componentes a través de la red. La figura 13 muestra el panel

frontal del sistema de control SCADA del HSAFR tal y como aparece en la pantalla del computador. Este control gráfico le permite al operador del HSAFR ejecutar todas cada uno de los subsistemas de control y adquisición de datos.



Fig. 13. Panel frontal del sistema SCADA del Control Central del HSAFR.

### 3.2 Operación del Horno Solar de Altos Flujos Radiativos

En esta sección se presentan varios experimentos encaminados a poner en operación el HSAFR y empezar el proceso de su caracterización. El primero es la toma de imágenes concentradas en un blanco lambertiano, el segundo es la determinación experimental de la zona focal del Horno Solar y el tercero es la fundición de una placa metálica.

#### 3.2.1 Toma de imágenes sobre pantalla lambertiana

Se diseñó y construyó un dispositivo que actúa como pantalla de placa plana refrigerada, que permite la incidencia de radiación solar concentrada sin que se dañe la pantalla y permite tomar imágenes.

Por las ópticas del concentrador de 7.5 y 8.0 m, las cuales se componen por 211 espejos, con una distancia focal equivalente de 3.68 m, se espera que el diámetro de la imagen esté alrededor de los 10 cm. Por ello se construyó la placa con superficie lambertiana circular con un diámetro de 20 cm. Dicha superficie es un reflector perfectamente difuso, donde el brillo aparente es igual en todas las direcciones de vista. Este es el requerimiento para poder tomar imágenes con cámaras CCD's y calcular las distribuciones fotónica incidentes en la placa.

En la figura 14 se presenta el esquema de la óptica del concentrador y su fotografía donde se aprecia la ubicación de una cámara CCD en el vértice de dicha óptica. En la figura 15 se muestra el arreglo experimental con la pantalla refrigerada en la zona focal del concentrador y sobre la mesa de experimentación.

Una vez que se tuvo a punto la pantalla refrigerada y se ajustó la mancha del concentrador en el centro de la pantalla, se abrió el atenuador a 10% y 20%. La figura 16 muestra el análisis de las imágenes viendo tanto su tamaño como su distribución en ambos ejes del plano focal. Como se puede apreciar la distribución es

bastante similar en ambos ejes indicando simetría en la imagen y muy buena alineación de los espejos. Particularmente para el caso de la apertura del atenuador del 20% la imagen formada tiene un diámetro menor a 10 cm.

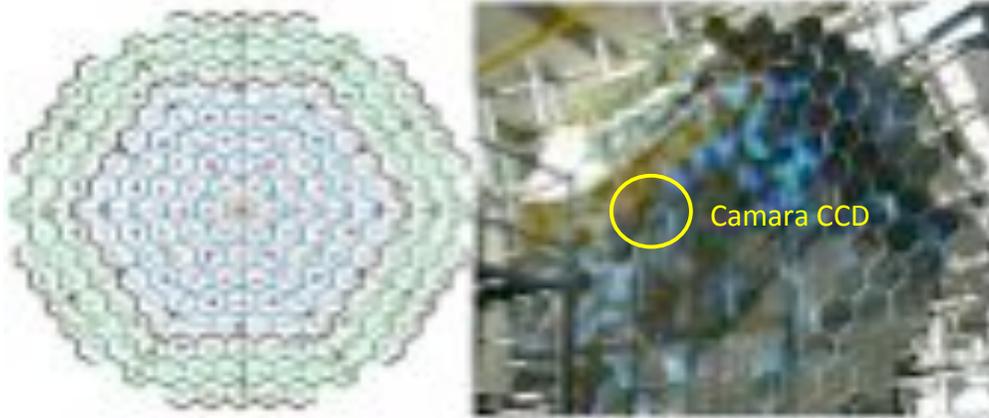


Fig. 14 Esquema e imagen del concentrador, donde se observa la cámara CCD en el vértice de la óptica.



Fig. 15 Arreglo experimental de la pantalla refrigerada en la zona focal del concentrador.

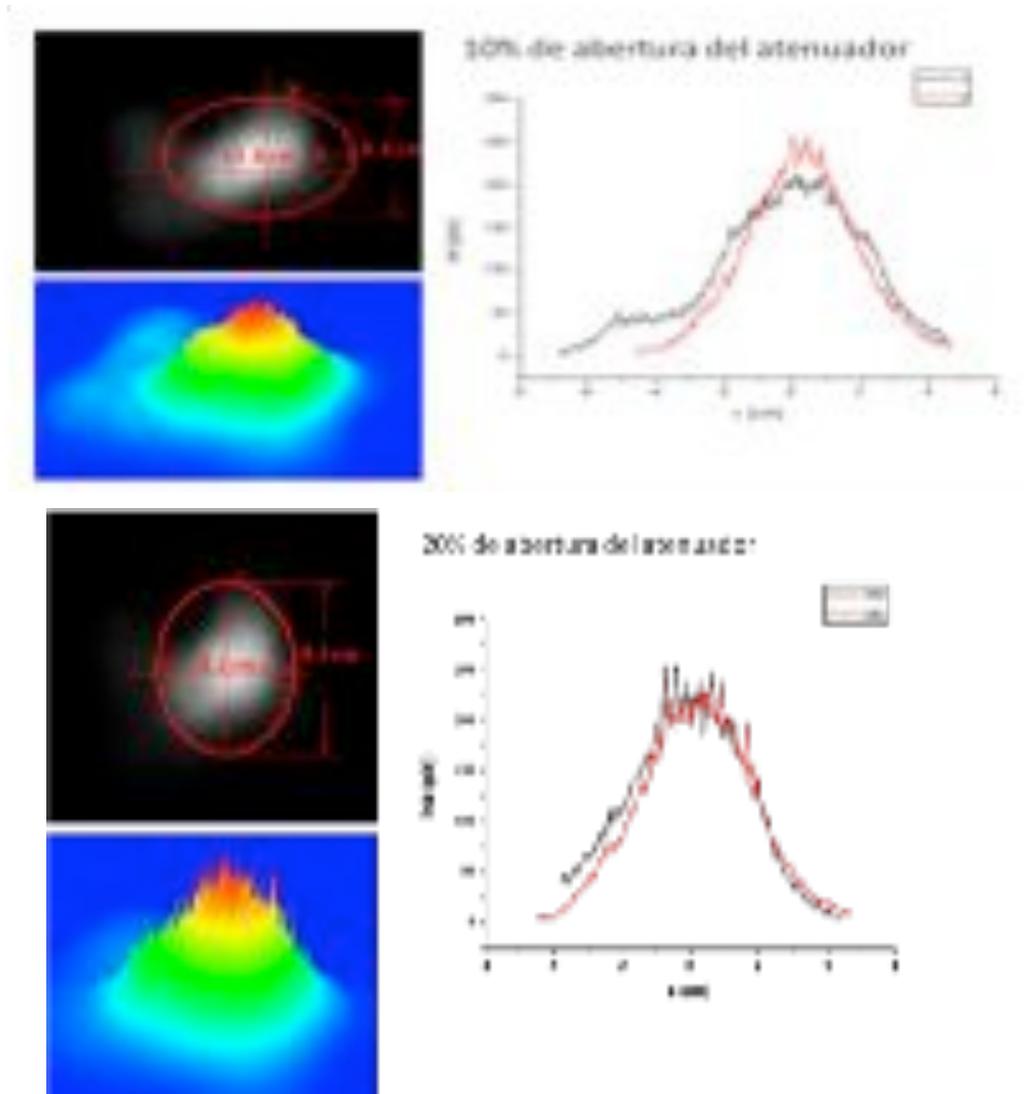


Fig. 16 Análisis de imágenes para determinar distribución de intensidad y dimensiones en ejes x-y.

### 3.2.2 Forma de la radiación solar concentrada en la zona focal

Para determinar la forma de la radiación solar concentrada en la zona focal, se colocó al norte de la mesa de experimentación del HSAFR, a la altura del eje focal del concentrador, una maquina generadora de humo, la cual proporciona una cortina de humo que permite visualizar la incidencia de los rayos concentrados que inciden en la zona focal del sistema, ver figura 17.

Las ópticas del concentrador de 7.5 y 8 m de radio de curvatura, tienen en su conjunto un ángulo de borde de  $33.2^\circ$ . Se procedió a la visualización de la forma en que los rayos solares se concentran en la zona focal del concentrador permitiendo abrir el atenuador a un 20 % de su capacidad. La figura 18 muestra el resultado de la visualización, mostrando claramente las trayectorias de los rayos solares con un ángulo de borde de  $32.9^\circ$ . Esto representa un error menor al 1%.



Fig. 17 Arreglo experimental para determinar la zona focal y la forma de los rayos incidentes.



Fig. 18. Visualización de la incidencia de rayos solares concentrados en la zona focal a través de la cortina de humo.

### 3.2.3 Fundición de Placa de Acero

Para evaluar la capacidad del HSAFR para alcanzar altas temperaturas, se planeó un experimento destructivo, colocando una placa de acero al carbón de 19 cm x 19 cm y 19 mm de espesor en la zona focal del concentrador. La temperaturas del punto de fusión esta por arriba de los 1500 °C. Una vez alineado el heliostato, se abre un 10% el atenuador, se ajusta la mancha en el centro de la placa y posteriormente se abre la totalidad del atenuador. Cabe destacar, que la placa de acero se colocó de manera vertical sin ningún tipo de aislamiento térmico, como se observa en la figura 19.

En la cara posterior de la placa y en contacto con ella, se colocó un termopar Tipo T, el cual registró la temperatura de pared posterior de la placa. Con una abertura del 100% del atenuador y una radiación solar directa de 865 W/m<sup>2</sup> se perforó la placa de acero de 19 mm de espesor en un tiempo de 525 segundos. El

registro de las temperaturas se observa en la figura 20 y la perforación de la placa en las fotografías de la figura 21.



Fig. 19. Arreglo experimental destructivo de fundición de placa con atenuador abierto al 10%.

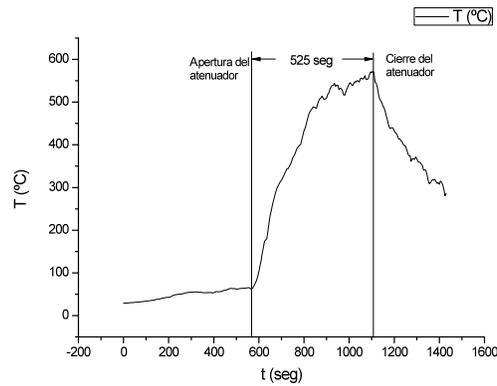


Fig. 20 Temperatura de pared posterior de la placa en la prueba de fundición de acero al carbón.



Fig. 21 Fotografías después de la perforación de la placa de 19 mm de espesor.

## 4. Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales (PSTFAR)

Como se propuso originalmente, el subproyecto de Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales consta de tres partes principales: a) la propia Planta Piloto ubicada en la plataforma solar del CIE-UNAM de 118 m<sup>2</sup> equipada con instalaciones eléctricas, hidráulicas y de voz y datos, b) el Laboratorio de Caracterización en Línea de procesos fotocatalíticos de 80 m<sup>2</sup> y c) el Laboratorio de Síntesis y Caracterización de Fotocatalizadores nanoestructurados de 100 m<sup>2</sup>, las cuales son construcción nueva de obra civil y de nuevo equipamiento. En este informe se reporta la terminación y puesta en marcha de cada parte componente.

### 4.1 Terminación de la Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales

#### 4.1.1 Terminación de la Planta Piloto

Durante esta etapa se recibieron los dos reactores fotocatalíticos adquiridos a la empresa española ECOSYSTEM para: a) Fotocatálisis Homogénea por medio de procesos foto-Fenton y b) Fotocatálisis homogénea por medio de procesos foto-Fenton apoyada por un reactor biológico. Ambos reactores fotocatalíticos incluyen como parte importante colectores solares CPC de 1 sol de concentración. Asimismo, en el Taller Mecánico del CIE UNAM fue diseñado y construido c) un reactor fotocatalítico integrado con colectores solares de 2 soles de concentración para ser operado con el fotocatalizador de TiO<sub>2</sub>. Con el propósito de desarrollar la tecnología en el diseño de reactores fotocatalíticos, se diseñaron y fabricaron un troquel para manufactura de los colectores dólares CPC y una roladora para rectificación de la sección involuta de colectores CPC. Los tres reactores fotocatalíticos anteriormente mencionados fueron instalados en el espacio designado para la Planta Solar Fotocatalítica en la parte posterior del edificio del HSAFR. De manera individual, cada reactor fotocatalítico fue instrumentado con sensores de pH, temperatura, presión, Carbón Orgánico disuelto (COD), bombas magnéticas para recirculación de la solución, sensor de flujo, sensor óptico de carbón orgánico total y sistema de control para adquisición de datos. Paralelamente se tendieron las redes para la adquisición automática de datos de cada uno de los reactores fotocatalíticos mencionados anteriormente, con lo cual será posible y de manera simultánea registrar cada una de las variables que caracterizan el proceso de degradación fotocatalítica (pH, T, presión, oxígeno disuelto (OD), velocidad de flujo y carbón orgánico total). Con estas actividades se considera que se ha concluido con la infraestructura prometida en este rubro, ver figuras 22, 23 y 24.



Fig. 22. Captadores solares para Fotocatálisis Homogénea por medio de procesos foto-Fenton. (Izq.) Comprados, (Der.) Fabricados en el CIE.



Fig. 23. Reactor fotocatalítico para Fotocatálisis Heterogénea con  $\text{TiO}_2$  diseñado y fabricado en el CIE-UNAM.



Fig. 24. Vista de la Planta Solar Fotocatalítica localizada a espaldas del HSAFR.

#### **4.1.2 Terminación del Laboratorio de Caracterización de Procesos Fotocatalíticos en Línea**

Durante esta última etapa, el Laboratorio de Caracterización de Procesos Fotocatalíticos en Línea fue equipado primeramente con mobiliario (vitrinas, mesas, anaqueles, refrigerador, campana de extracción de humos y aire acondicionado), material de vidrio (matraces, probetas, embudos de adición, tubos de ensayo, viales, gradillas, etc.), líneas de voz y datos, y con equipo analítico (microscopio óptico, equipo para Demanda Química de Oxígeno (DQO), equipo Shimadzu para determinación de Carbón Orgánico Total (COT) y

espectrofotometría óptica. Se acondicionó el laboratorio con los reactivos químicos necesarios para llevar a cabo las pruebas analíticas requeridas por los procesos de fotodegradación. Adicionalmente se instalaron dos computadoras ligadas a los equipos analíticos para registrar tanto las variables que caracterizan el proceso de degradación fotocatalítica (pH, T, presión, oxígeno disuelto (OD), velocidad de flujo y carbón orgánico disuelto) como las proporcionadas por los equipos analíticos de este laboratorio (DQO, COT y espectrofotometría óptica). Con estas actividades se considera que se ha concluido con la infraestructura prometida en este rubro, ver figuras 22, 23 y 24.



Fig. 25. Fotografías del Laboratorio de Caracterización de Procesos Fotocatalíticos en Línea.

#### **4.1.3 Terminación de Laboratorio de Síntesis y Caracterización de Fotocatalizadores Nanoestructurados**

##### **Laboratorio de Síntesis de Fotocatalizadores**

En el Laboratorio de Síntesis de Fotocatalizadores se fabricaron e instalaron dos mesas de laboratorio en acero inoxidable Al T-304 y una en cemento y azulejo equipada con campana de humos. Asimismo se terminaron de acondicionar vitrinas para almacenamiento de material de vidrio y parte de reactivos químicos. Se instalaron muflas para tratamientos térmicos en aire de los materiales fotocatalíticos que se sintetizarán en este. Al final de esta etapa, este laboratorio fue equipado con balanza analítica, equipo de depósito químico sol-gel, horno de vacío para tratamientos térmicos de fotocatalizadores nanoestructurados en atmósferas controladas, equipo de espectroscopia de infrarrojo Bruker modelo Equinox 55, refrigerador y anaqueles para almacenamiento de reactivos químicos, ver figuras 26.

##### **Laboratorio de Caracterización de Fotocatalizadores Nanoestructurados**

El Laboratorio de Caracterización de Fotocatalizadores Nanoestructurados esta contiguo al Laboratorio de Síntesis de Fotocatalizadores, por lo que la caracterización experimental de materiales fotocatalíticos preparados en el primer laboratorio es inmediata. Durante esta etapa, el Laboratorio de Caracterización de Fotocatalizadores Nanoestructurados fue equipado con mesas de laboratorio en acero inoxidable Al T-304, anaqueles con estructura metálica para almacenamiento de equipo de control, fuentes de voltaje y corriente,

osciloscopio, generadores de señal, equipos adquirentes de datos, y almacenamiento en general (partes de vacío, refacciones, partes eléctricas, material etc.).



Fig. 26. Vista del interior del Laboratorio de Síntesis de Fotocatalizadores Nanoestructurados.

Con relación al equipo analítico, el Microscopio Electrónico de Barrido por Emisión de Campo FE SEM S-5500 fue instalado y calibrado por parte de la compañía Hitachi, alcanzando una resolución espacial de 0.4 nm en muestras preparadas por dicha compañía. Adicionalmente se llevó a cabo la instalación de un Microscopio Electrónico de Tunelaje (STM) parcialmente construido en el CIE y parcialmente comprado. El STM es parte de un proyecto CONACYT que incluye un conjunto de dispositivos de espaciamiento cercano que lo complementan un dispositivo Kelvin para determinación de la Función de Trabajo y un Generador Termoiónico para generación de potencia eléctrica. Estos tres equipos fueron montados durante esta etapa en una mesa antivibratoria capaz de filtrar el ruido de baja frecuencia por tráfico pesado, tráfico de gente, operación de motores, etc. Durante esta etapa también se llevó a cabo la reparación de la fuente de alto voltaje del analizador ALPHA 110 (Thermo VG Scientific), con lo que el Sistema de Superficies equipado con la Espectroscopia de Fotoemisión con rayos-X (XPS) está nuevamente en operación.

Finalmente, el laboratorio fue equipado con la electrónica correspondiente para poder llevar a cabo medición de curvas  $I(t)$ ,  $V(t)$ ,  $I$  vs  $V$  y respuesta espectral, para lo cual fue implementado un monocromador para operar en el rango 240-110 nm y una fuente de luz en ese mismo rango.

Con base en lo descrito anteriormente, se considera que se construye una infraestructura analítica muy adecuada para llevar a cabo el estudio de materiales fotocatalíticos micro y nanoestructurados de primer nivel. Con toda la infraestructura analítica aquí descrita, que resulta ser más que la comprometida en este proyecto, se considera que se ha concluido con creces con la infraestructura prometida en este rubro, ver figuras 27.



Fig. 27. Vista interior del Laboratorio de Caracterización de Fotocatalizadores Nanoestructurados. Microscopio Electrónico de Barrido Hitachi FE SEM S-5500.



Fig. 28. Equipo de Superficies XPS.



Fig. 29 (Izq.) Microscopio Electrónico de Tunelaje (STM), (Der.) Dispositivo Kelvin y Celda Termoiónica.

#### **4.1.4 Unidad de Diseños Avanzados e Ingeniería equipada con centro de maquinado y equipo de soldadura**

Durante esta última etapa fue posible realizar parte de la obra civil de la Unidad Diseños Avanzados e Ingeniería (antes Unidad de Desarrollo Tecnológico), la cual contempla un área de 120 m<sup>2</sup> y se encuentra localizada en el Taller Mecánico del CIE. Dicha unidad contempla tanto la parte de diseño y armado de prototipos como la parte de maquinado en centros de maquinado CNC. En este período fue posible adquirir e instalar un centro de maquinado CNC (fresa) de la marca Lagun Republic computarizado. También fue posible equipar esta unidad con mesa de trabajo, taladro, herramienta básica de corte y una planta de soldar Miller Syncrowave LX 350 tipo TIG para soldadura en aceros inoxidable y aluminio. Con estas actividades se considera que se ha concluido con la infraestructura prometida en este rubro, ver figura 30.



Fig. 30. Vista de la Unidad de Diseños Avanzados e Ingeniería y Centro de Maquinado CNC (fresadora).

## **4.2 Puesta a punto y operación de las instalaciones del subproyecto Planta Solar Fotocatalítica**

El subproyecto de Planta Solar Fotocatalítica incluyó, como ya se mencionó, tres partes principales: a) la Planta Solar Fotocatalítica propiamente dicha, b) el Laboratorio de Caracterización de Procesos Fotocatalíticos en Línea y c) el Laboratorio de Síntesis y Caracterización de Fotocatalizadores Nanoestructurados. Se llevó a cabo la instalación y calibración de todos los equipos comprometidos en el proyecto, incluso fue posible llevar a cabo la fabricación e instalación de equipo adicionales no comprometido en el proyecto de Laboratorio Nacional tales como: STM, Dispositivo Kelvin, Generador Termoiónico, FTIR, Sistema de superficies XPS y equipo de análisis de propiedades ópticas y eléctricas, que complementan en muy buena manera los Laboratorios de Síntesis y Caracterización de Fotocatalizadores Nanoestructurados. Gran parte de la infraestructura analítica fue desarrollada en el CIE-UNAM, esto es, colectores Solares CPC de 2 soles de concentración, un reactor fotocatalítico, mesas de laboratorio, anaqueles, microscopio STM, Generador Termoiónico, Dispositivo Kelvin y Sistema de Superficies XPS.

Con la calibración y puesta en marcha de cada uno de los laboratorios, incluyendo la Planta Solar Fotocatalítica, y de los equipos comprometidos en este subproyecto, se considera que se cumplen y alcanzan los objetivos y metas comprometidos en este rubro. En las siguientes subsecciones presentamos algunos resultados de la puesta en operación de los equipos.

### **4.2.1 Degradación fotocatalítica del plaguicida Carbarilo.**

Se realizó la fotodegradación del plaguicida Carbarilo, catalogado como prioritario por su nivel de toxicidad y persistencia por la Agencia de Protección Ambiental (EPA USA), utilizando dos sistemas de la planta piloto. En el primero se usó el reactor fotocatalítico para procesos foto-Fenton apoyado por un reactor biológico integrado con colectores CPC de 1 y 2 soles de concentración. En el segundo se usó un reactor fotocatalítico para procesos con TiO<sub>2</sub> con colectores CPC de 2 soles de concentración.

Con los datos obtenidos en ambos casos se lleva a cabo el estudio cinético del proceso de degradación del contaminante. Para el reactor biológico se preparan cepas de microorganismos. Para determinación de la concentración remanente de contaminante previamente se realiza una curva de calibración (absorbancia a 280 nm para el plaguicida en función de la concentración del carbarilo) utilizando el Espectrofotómetro UV-VIS. Por medio del equipo Hanna se determina la Demanda Química de Oxígeno y por medio del equipo Shimadzu el Carbón Orgánico Total. Se realiza la curva de degradación C/Co v.s. tiempo de exposición a la radiación y Energía Disponible Acumulada. Se lleva a cabo el registro de datos provenientes de los sensores (pH, T, presión, oxígeno disuelto (OD), velocidad de flujo y carbón orgánico total) instalados en los reactores fotocatalíticos. Se lleva a cabo el estudio cinético de degradación del contaminante, esto es, velocidad de la reacción y constante cinética global del proceso de degradación.

La figura 31 izq. muestra la curva de degradación del carbarilo utilizando foto-Fenton. Claramente se ve que el uso del colector solar de 2 soles degrada mejor el compuesto tóxico. La figura 31 der. Muestra la curva de degradación del carbarilo usando TiO<sub>2</sub>. La figura 32 izq. Muestra la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la figura 32 der. El pH durante la degradación del plaguicida.

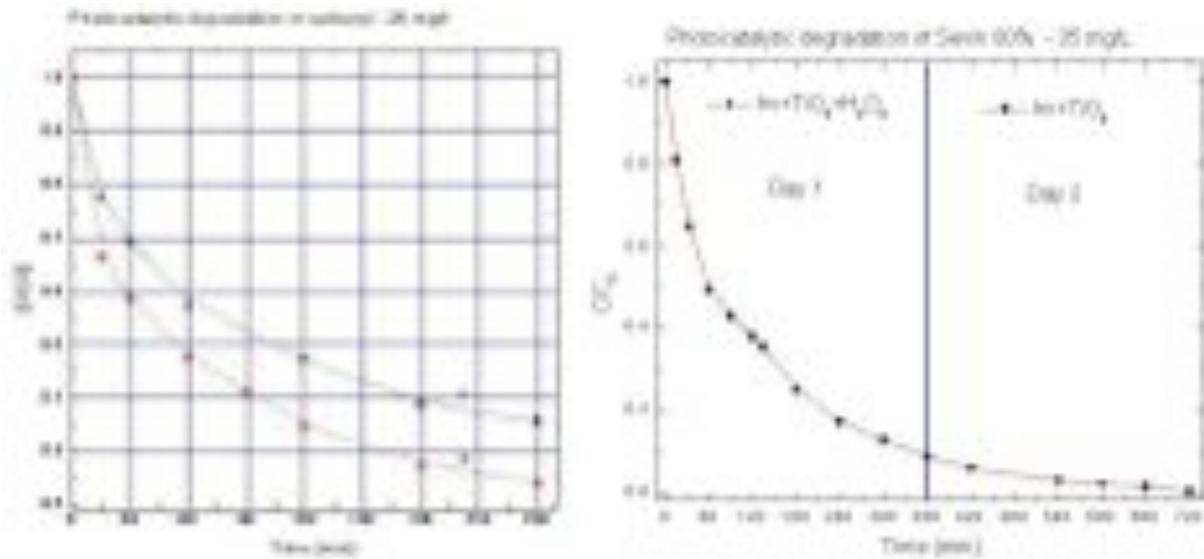


Fig. 31. Curva de degradación del plaguicida carbarilo. (Izq.) Foto-Fenton con CPC de 1 y 2 soles. (Der). Dióxido de Titanio con CPC de 2 soles.

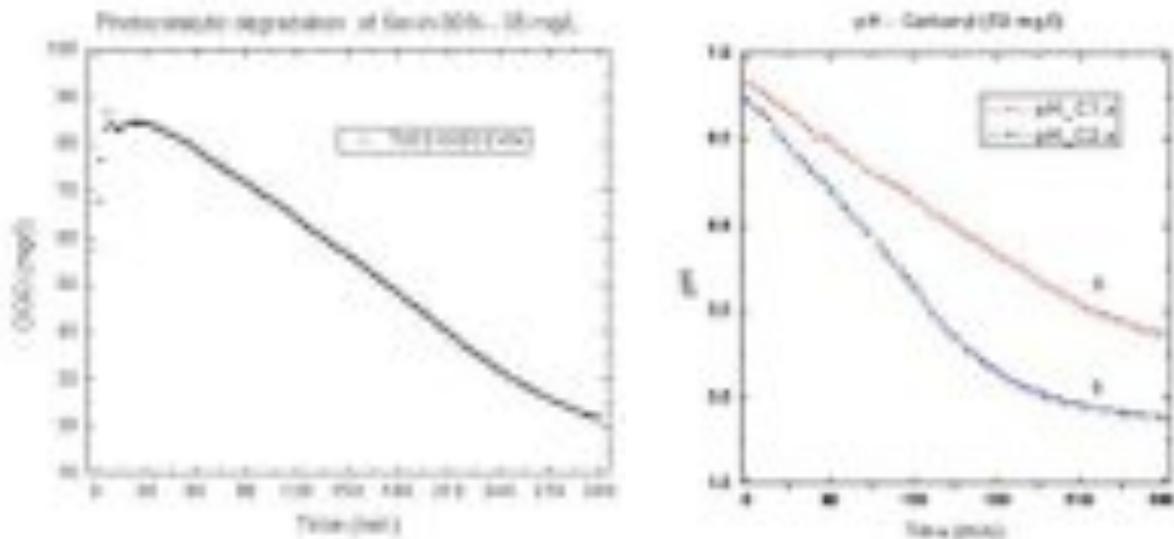


Fig. 32. Curva de Demanda Química de Oxígeno y pH durante la degradación del plaguicida carbarilo

## 4.2.2 Preparación de fotocatalizadores

### Laboratorios de Síntesis

Se organizó el laboratorio de síntesis en a) área de química básica y manejo de reactivos, b) área de depósito químico sol-gel y c) área de tratamientos térmicos de materiales fotocatalíticos. Posteriormente se pusieron en marcha los equipos aquí instalados tales como equipo de depósito químicos sol-gel, cámara de tratamientos

térmicos en atmosfera controlada ( $N_2$ ,  $O_2$ , y  $Ar_2$ ), muflas para tratamientos térmicos en aire y equipo FTIR y se verifico que dichos equipos funcionaran correctamente.

Se prepararon materiales fotocatalíticos principalmente de  $TiO_2$  y  $Fe_2O_3$  inmovilizados sobre sustratos de vidrio pyrex por el método de depósito químico sol-gel. Principalmente se controla el espesor de película sol-gel por en número de inmersiones del sustrato en una solución precursora de esta técnica de depósito. Posteriormente, mediante un tratamiento térmico se alcanza la fase cristalina fotocatalíticamente activa, la cual es controlada mediante difracción de rayos-x, espectroscopía FTIR y estudios de conductividad en oscuridad, fotoconductividad y fotosensibilidad.

#### Laboratorios de Caracterización de Fotocatalizadores Nanoestructurados

En el Laboratorios de Caracterización de Fotocatalizadores Nanoestructurados se instaló y calibró el Microscopio Electrónico de Barrido por Campo de Emisión (FE SEM S-5500), tanto en el modo de reflexión con el detector de electrones secundarios como en el modo de transmisión con el detector STEM. La instalación la realizó personal de la compañía Hitachi, quienes impartieron un curso de capacitación de una semana a tres técnicos académicos del CIE que posteriormente apoyarían a los investigadores con los servicios de microscopía electrónica. Se realizaron mediciones en muestras de carbono con nanopartículas de paladio donde fue posible alcanzar una resolución espacial de 0.4 nm. Se aprendió a utilizar el microscopio en el análisis de morfología superficial y captura de imágenes, así como también a realizar labores de mantenimiento consistentes en limpieza del sistema de enfriamiento, proceso de desgacficamiento del filamento del FE-SEM S-5500 y horneado del microscopio para alcanzar condiciones de ultra vacío. Asimismo se aprendió la rutina de inserción de muestras del sistema de vacío del microscopio, encendido y manejo del haz electrónico, manejo de corrientes y altos voltajes del microscopio, manejo de lentes y aumentos para alcanzar alta resolución, corrección de efecto de carga y astigmatismo, manejo de software y evaluación de imágenes, etc. Terminado el curso de capacitación se procedió a llevar a cabo los servicios de medición de microscopía a los investigadores internos y externos al CIE-UNAM.

Con el equipo FE SEM S-5500 en operación se han realizado servicios de medición de microscopía electrónica en un número importante de muestras de materiales fotocatalíticos puros e impurificados, micro y nanoestructurados ( $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $ZnO$ ) catalíticos ( $MoS_2$ ,  $MoO_2$ ,  $MoO_3$ ,  $SnO_2$ , etc), y semiconductores mono y policristalinos ( $Si$ ,  $CdTe$ ,  $CuInGaSe$ ,  $CdS$ ,  $Bi_2S_3$ , etc) así como también en heteroestructuras y multicapas, ver figura 33.

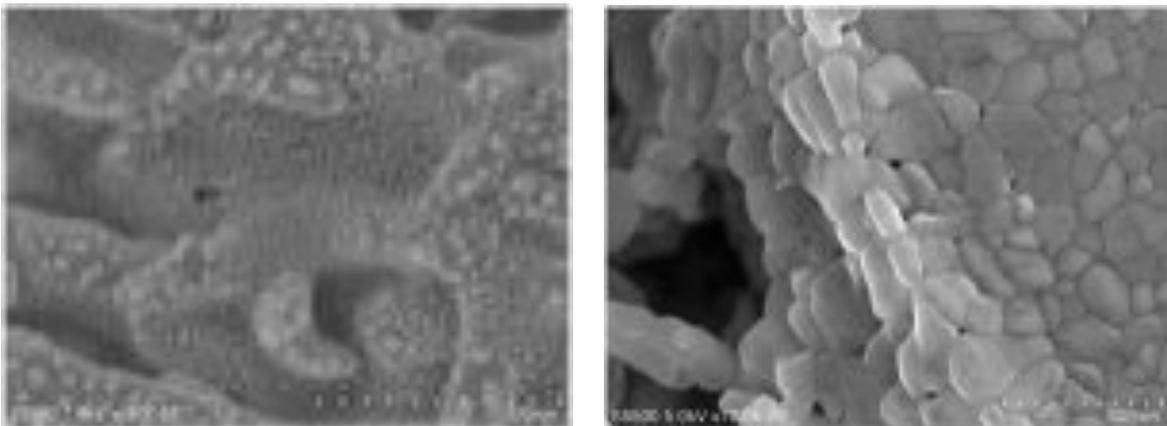


Fig. 33. Fotografías de (izq.) nanopartículas de paladio y (der.) películas delgada de  $TiO_2$  tomadas con el FE SEM S-5500 .

## **5. Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH)**

De acuerdo a lo planteado en la primera etapa del LNCSYQS, el proyecto del CPH consiste de un conjunto de helióstatos desplegados sobre el terreno, una torre con cabina de experimentación y de una sala de control. La torre cuenta con un blanco Lambertiano para proyectar las imágenes producidas por los helióstatos. El desarrollo de cada una de estas instalaciones involucró un gran número de tareas realizadas por diferentes grupos de trabajo, las cuales se resumen a continuación.

Una de las primeras actividades que se realizaron después de la firma del convenio específico de colaboración entre la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad de Sonora para la realización del proyecto LNCSQS, fue la gestión de la asignación de un terreno para el CPH. En ese sentido el académico responsable de la coordinación del proyecto por parte de la UNISON identificó y gestionó la asignación de un terreno localizado en el campo agrícola de la Universidad.

El terreno donde se encuentra el CPH cuenta con un área total de 20 Has y se está ubicado en el Km 21 de la Carretera Hermosillo- Bahía Kino, en el acceso de entrada del Departamento de Agronomía de la UNISON. El terreno es relativamente plano y sin obstrucciones visuales, lo que lo hizo adecuado para la instalación del CPH y permitirá en el futuro su ampliación, según lo vayan requiriendo las actividades de los proyectos planteados por los usuarios del CPH. Esto último es un requisito importante para cumplir uno de los objetivos del proyecto, esto es, el de impulsar la formación de una red nacional de investigadores que trabajen en el desarrollo de la tecnología de concentración solar que necesariamente requerirán de mayores espacios.

### **5.1 Diseño del CPH**

El diseño del CPH propiamente dicho se encuentra descrito en el segundo informe anual y fue llevado a cabo por el CIE-UNAM, en colaboración con SENER, IMDEA y la UNISON. Consistió esencialmente en determinar la distribución de helióstatos en el terreno y la altura de la torre. Dichos parámetros se determinaron con base en simulaciones ópticas del comportamiento del campo, buscando maximizar la concentración de la energía solar reflejada por los helióstatos hacia la torre. Los resultados obtenidos son función de los dos parámetros que se fijaron, que fueron el tamaño y tipo de helióstato y la cantidad de potencia total a ser captada por el campo y puesta en el receptor. El helióstato se definió de tamaño mediano (36 m<sup>2</sup>) y con factor de concentración de 25. La potencia se fijó en 2 MWt. Esto determinó la altura de la torre en 36 m de altura. Inicialmente se había determinado una altura mayor (ver segundo informe técnico), pero se decidió reducirla, al verificar que la disminución tendría muy poco impacto en la eficiencia de la instalación pero sí reduciría mucho los costos.

El haber diseñado el CPH basado en helióstatos medianos obedece a razones prácticas: de este modo la instalación es suficientemente versátil para probar desde mini-helióstatos (del orden de 1 m<sup>2</sup>) hasta helióstatos grandes (140 m<sup>2</sup>).

### **5.2 Terminación del Campo de Pruebas de Helióstatos**

#### **5.2.1 Diseño y Construcción de la Torre y el Laboratorio**

Para realizar el diseño arquitectónico de las instalaciones se contó con el apoyo de un grupo de académicos del Departamento de Arquitectura y Diseño de la UNISON. Este proceso involucró una serie de etapas por parte de los académicos participantes. Primero se llevó a cabo el desarrollo de un anteproyecto del Campo, incluyendo la torre y edificios anexos, de acuerdo a los resultados arrojados por el diseño del campo descrito

más arriba. Para definir los requerimientos de espacios e instalaciones, el anteproyecto requirió varias iteraciones de interacción entre el grupo de arquitectura de la UNISON y los académicos responsables del proyecto. Se llegó a una propuesta final, la cual consta de 1 torre central con altura final de 35 m, sala de control, sala de juntas, cubículos de investigadores, zona secretarial, área de descanso, servicios sanitarios y café, laboratorio de instrumentación, almacén, patio de armado, plataformas de experimentación y áreas exteriores (ver Fig. 1).



Figura 1 . Proyecto arquitectónico. Vista frontal del CPH.

Con base en el anteproyecto aceptado por el Comité Técnico del proyecto, se procedió a la elaboración del proyecto ejecutivo que incluye todos los planos y documentos necesarios para la construcción. Para cumplir con los objetivos planteados en el Proyecto LNCSQS, Actualmente se han construido la torre y un edificio anexo, con el cuarto de control, sala de juntas y servicios sanitarios, además de las instalaciones básicas necesarias para su operación (ver Fig. 2). En el proyecto constructivo está contemplada una ampliación posterior de las instalaciones para incluir las otras áreas mencionadas en el párrafo anterior.



Figura 2. Proyecto arquitectónico del CPH, ilustrando las áreas que corresponden al proyecto LNCSQS. Las demás áreas están planeadas para el LNCSQS 2da Etapa.

La construcción de la torre y del cuarto de control se llevó a cabo durante la segunda mitad de 2010 (ver Figs. 3, 4 y 5) y se encuentra concluida. Esta obra estuvo bajo la responsabilidad de la Subdirección de Obras de la UNISON, la cual contó con el apoyo del personal académico adscritos a los Departamentos de Arquitectura e Ingeniería Civil participantes en el proyecto.



Figura 3. Proceso de construcción de la torre del CPH.



Figura 4. Edificio del cuadro de control del CPH.



Figura 5. Cabina de experimentación en lo alto de la torre.

Posteriormente, el Bufete de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (BADU) de la UNISON llevó a cabo el diseño de la puerta de acceso y una caseta de vigilancia y control vehicular para el conjunto del CPH y edificios anexos.

Finalmente se definieron los requerimientos del blanco Lambertiano. El grupo de arquitectura elaboró una primera propuesta que fue modificada y desarrollada por personal del Departamento de Ingeniería Química y del CIE-UNAM.

### 5.2.2 Desarrollo de helióstatos

Una parte fundamental del proyecto ha resultado ser el desarrollo de helióstatos. Como se ha discutido en informes anteriores, originalmente se había pensado en la adquisición de helióstatos comerciales para ser probados en el CPH. Sin embargo, ya iniciado el proyecto y ante la dificultad para adquirir dichos equipos, se llegó a la conclusión de que era más conveniente llevar a cabo un desarrollo propio. Se consideró que el desarrollo de esta tecnología podía perfectamente llevarse a cabo en México y que esto redituaria en el fortalecimiento de las capacidades tecnológicas de los grupos nacionales. Esto ha resultado cierto y se ha llevado a cabo una importante labor de desarrollo como se describe a continuación.

Fruto de los esfuerzos por parte de diferentes grupos participantes en el proyecto, existen actualmente en el campo 23 helióstatos, de 6 modelos diferentes y sus variantes: UNISON-TX-H6, UNISON-TX-H36, UNISON-MC-H1.5, UNAM-CC-H36 (variantes A, B y C).

- a) UNISON-TX-H6. Fue el primer prototipo desarrollado. Es un helióstato de 6 metros cuadrados de área, diseñado por la oficina de vinculación TxTec de la UNISON. Tiene una montura con dos sistemas corona/tornillo sinfín, desarrollados específicamente para el proyecto. Existe una unidad de estas en el campo (ver Fig. 6).



Figura 6. Helióstato de 6 m<sup>2</sup> UNISON-TX-H6.

- b) UNISON-TX-H36. Este prototipo fue el segundo desarrollado, también por TxTec en colaboración con la empresa Winsmith. Es mecánicamente muy diferente al anterior, empleando un sistema de corona tornillo sinfín para el acimut y un actuador lineal para la elevación. Las facetas de vidrio están soportadas sobre una cantidad grande de ventosas, que mediante tornillos permiten producir una deformación cuasi continua de las primeras. Se desarrollaron e instalaron tres unidades de este tipo (ver Fig. 7).



Figura 7. Helióstato de 36 m<sup>2</sup> UNISON-TX-H36.

- c) UNISON-MC-H1.5. Este helióstato es de tamaño muy pequeño (1.5 m<sup>2</sup>) y fue desarrollado en su totalidad por el Grupo de Mecatrónica del Departamento de Ingeniería Industrial, y se contó con la colaboración del Grupo de Energía del Departamento de Ingeniería Química. Este tipo de helióstato busca el abaratamiento de componentes mecánicas, a través de poner el énfasis en el control de muchos helióstatos pequeños mediante componentes baratas. Se desarrollaron e instalaron un conjunto de 9 helióstatos de este tipo para tener un área total de 13.5 m<sup>2</sup> (ver Fig. 8).



Figura 8. Helióstato de 1.5 m<sup>2</sup> UNISON-MC-H1.5.

- d) UNAM-CC-36 variante A. Este helióstato de 36 m<sup>2</sup> fue desarrollado en colaboración entre el CIE y el CCADET de la UNAM y la empresa Pirámide Estructural del Golfo, tomando como base los sistemas de transmisión seleccionados por TxTec-UNISON, para su helióstato UNISON-TX-H36. La diferencia principal estriba en la estructura mecánica, y en el hecho de que las facetas no son deformables, si no que tienen un marco rígido, pudiéndose alinear independientemente unas de otras. Además, los motores y el sistema de control son diferentes a los utilizados en el UNISON-TX-H36. Se instalaron 8 unidades de este tipo (ver Fig. 9).
- e) UNAM-CC-36 variante B. Este helióstato usa un sistema de transmisión de dos tornillos sin fin/coronas, integradas en una sola carcasa. Estructuralmente muy similar al anterior. Se instaló una unidad.
- f) UNAM-CC-36 variante C. Se utiliza un sistema de transmisión novedoso, totalmente desarrollado en México por el CCADET y el CIE, en colaboración con la empresa Pirámide Estructural del Golfo. Estructuralmente igual a la variante A. Se instaló una unidad.

Cada uno de estos tipos de helióstatos tienen ventajas y desventajas respecto a los otros, por lo cual será una experiencia muy fructífera llevar a cabo pruebas de más largo plazo con ellos para evaluar su desempeño. Esto ha abierto un área de investigación y desarrollo que previamente no existía en México.



Figura 9. Helióstatos de 36 m<sup>2</sup> UNAM-CC-H36.

## 5.3 Instrumentación y operación del CPH

### 5.3.1 Instrumentación y control del CPH

La instrumentación y control del CPH se desarrolló en partes: cada uno de los grupos responsables de los diferentes prototipos de heliostatos desarrolló su propio control, con el único requisito de que estas rutinas de control fueran integrables en una plataforma común. Por lo tanto, cada una de ellas sigue estrategias y filosofías diferentes, las cuales serán puestas a prueba extensivamente en la operación del campo. Esto aportará una gran cantidad de información valiosa para el perfeccionamiento del control de heliostatos, abriendo también un área de investigación (Fig. 10).

La plataforma común que se escogió fue el software Lab View, que por su versatilidad y facilidad de manejo permite una buena interacción entre los diferentes grupos. La versatilidad es importante, pues en el futuro permitirá integrar al sistema de control una serie de componentes para proyectos que se operen en el CPH, como pruebas de receptores térmicos y reactores químicos. Para integrar las diferentes componentes del control se desarrolló un sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), tarea que estuvo a cargo del CIMAT en colaboración con el CIE-UNAM. Este sistema engloba todas las funciones del campo y maneja los heliostatos a través de las rutinas específicas desarrolladas por cada grupo. Incluye funciones de arranque y paro de emergencia, operación automática y manual, de grupos de heliostatos o heliostatos individuales, así como toma de imágenes y de datos de la estación meteorológica.

Físicamente el campo cuenta con comunicación Ethernet con cada uno de los heliostatos, así como comunicación inalámbrica (ver Fig. 10). Esta redundancia permitirá evaluar el desempeño de la comunicación inalámbrica con vistas a que en el futuro todos los nuevos heliostatos que se instalen sean controlados inalámbricamente. Por otro lado, también se hizo la instalación de una red eléctrica para alimentar los motores de los heliostatos y para poder conectar dispositivos experimentales, de limpieza y herramientas eléctricas en

diferentes puntos del campo. Se pretende que todos los helióstatos que se instalen sean alimentados por fotoceldas.

En la Figura 11 se muestra un ejercicio de pruebas de control con tres helióstatos tipo UNAM-CC-H36.



Figura 11. Instalación de gabinete de control en un helióstato.



Figura 11. Pruebas de control en el CPH con tres helióstatos UNAM-CC-H36.

### 5.3.2 Operación del CPH. Caracterización de Helióstatos

Se dio inicio con la operación del CPH a través de la caracterización de los heliostatos. En la comunidad internacional, existen diversas metodologías en desarrollo para la caracterización de heliostatos; la mayoría de ellas basadas en pruebas ópticas. En la actualidad se han implementado en el CPH tres tipos de pruebas, que son complementarias entre sí: seguimiento del sol, observación de la mancha reflejada y deflectometría.

En el método de seguimiento del sol, el sistema a evaluar se opera no como heliostato si no como seguidor solar, de manera que su superficie esté siempre perpendicular a los rayos solares. Se fija en la estructura del heliostato una cámara, la cual está viendo al sol a través de un filtro (Figs. 12 y 13). Idealmente, si el seguimiento es perfecto, el sol estará siempre en el mismo punto de la imagen. De modo que los desplazamientos del disco solar en el campo de visión de la cámara a lo largo del tiempo permiten evaluar con mucha precisión las desviaciones respecto al seguimiento ideal. Este método pone a prueba la mecánica de movimiento del heliostato, mientras que los dos métodos siguientes prueban más bien la óptica del mismo.



Figura 12. Imagen producida en una prueba de seguimiento del sol.

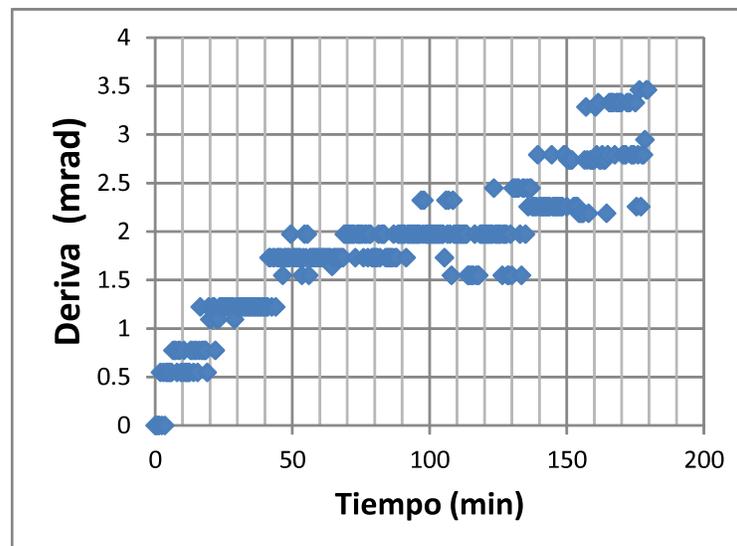


Figura 13. Desviación angular obtenida en una prueba de seguimiento del sol.

Para el método de observación de la mancha reflejada, se dirigen los rayos solares reflejados por el helióstato hacia el blanco Lambertiano y se observa con una cámara fija a nivel de piso la mancha de luz creada en el mismo (ver Figs. 14, 15 y 16). La forma de esta mancha está influenciada por todos los aspectos de la óptica del helióstato, incluyendo la mecánica de la estructura de soporte de las facetas. Mediante comparación de ésta mancha con simulaciones de trazo de rayos es posible obtener valores para el error óptico global del helióstato. También de esta prueba se puede sacar información sobre la calidad del seguimiento, observando la deriva de la mancha sobre el blanco como función del tiempo (Fig. 17).

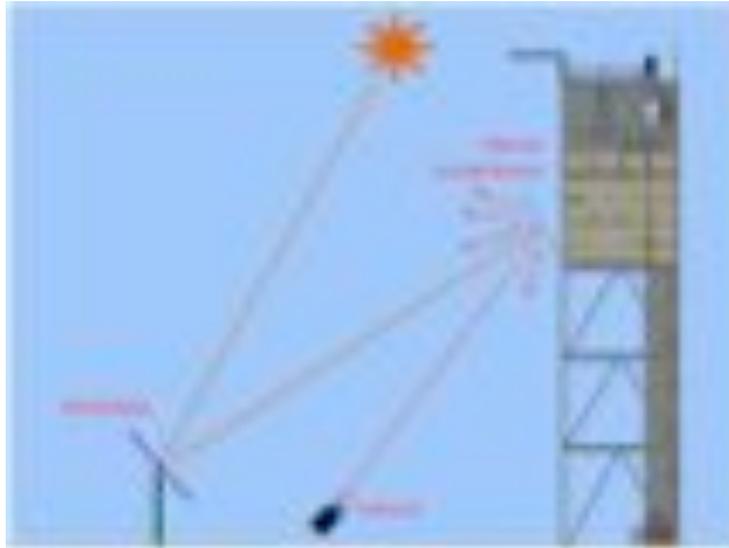


Figura 14. Esquema experimental para medición de distribución de flujo solar.



Figura 15. Prueba de observación de la mancha reflejada para un helióstato en proceso de canteo.

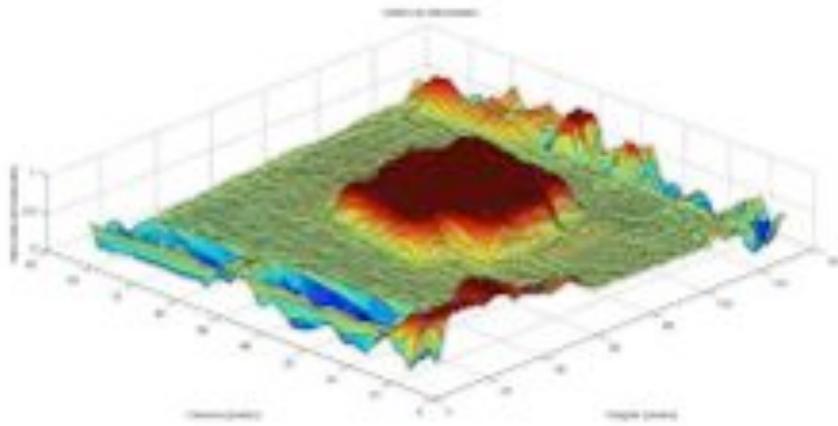


Figura 16. Distribución de intensidades sobre el blanco en una prueba de observación de la mancha reflejada.

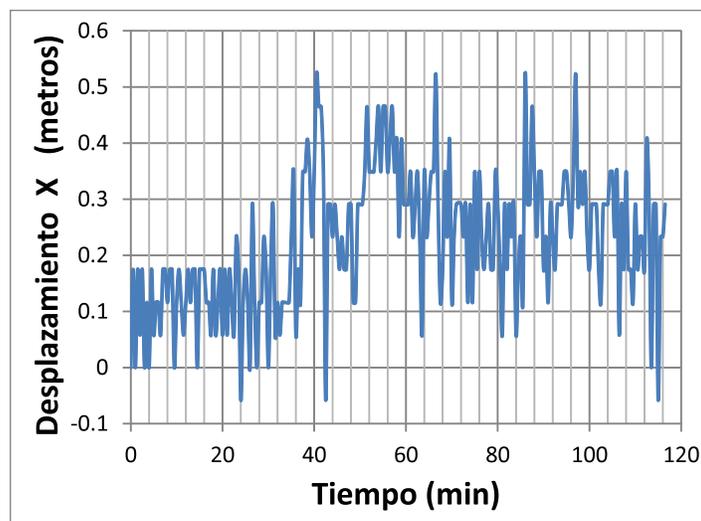


Figura 17. Deriva de la mancha sobre el blanco como función del tiempo .

Finalmente, las pruebas de deflectometría, las cuales son particularmente útiles para evaluar la calidad óptica de las facetas individuales de un helióstato, ayudando a desacoplar el error de superficie del valor global del error óptico que entrega la prueba de observación de la mancha reflejada. En este, también conocido como método de proyección de franjas, se proyecta hacia el blanco Lambertiano una imagen con un patrón de franjas de características bien conocidas, el cual es reflejado por la superficie que se quiere evaluar y dicha reflexión es vista por una cámara situada en lo alto de la torre (ver Fig. 18). Estas pruebas deben ser hechas de noche, a diferencia de las anteriores.

Las distorsiones producidas en el patrón de franjas (ver Fig. 19) permiten determinar con precisión las pendientes locales de las superficies de los espejos, de manera que se pueden hacer mapeos totalmente detallados sobre toda la superficie a evaluar. En particular, se ha implementado la técnica conocida como de corrimiento de fase.



Figura 18. Esquema experimental del método de proyección de franjas.

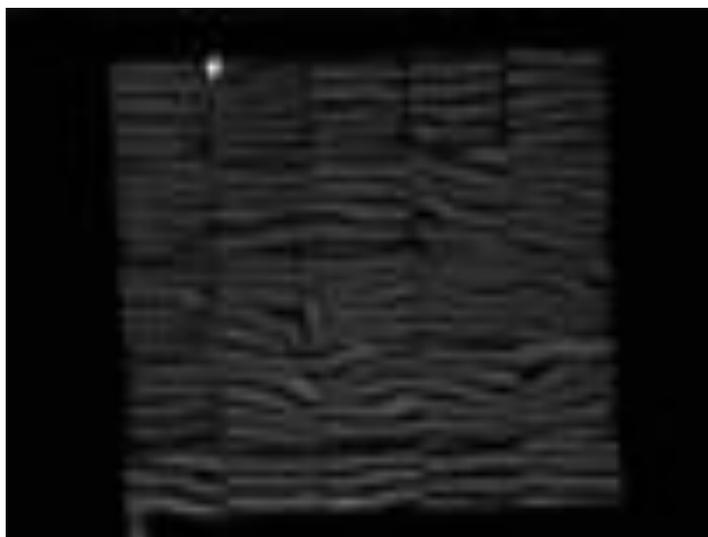


Figura 19. Imagen de proyección de franjas en un heliostato, ilustrando la deformación debida a imperfecciones de la superficie y tensiones mecánicas.

Todas las pruebas arriba descritas están en fase de desarrollo y se irán perfeccionando conforme se vaya adquiriendo mayor experiencia con la operación de los heliostatos y en su evaluación.

## 6. Conclusión y trabajos futuros

El Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar es ahora una realidad. No solo se tienen tres grandes infraestructuras de investigación científica y tecnológica para el desarrollo de las tecnologías de concentración solar y química solar en México: HSAFR, PFTAR y el CPH; sino que se han desarrollado tecnologías nuevas que están en proceso de patentamiento o registro; se han establecido vínculos con algunos empresarios; se han formado o están en formación recursos humanos de alto nivel en el área; se han realizado actividades de difusión y divulgación del proyecto y sobre todo, se ha logrado formar una red de grupos de investigación en las temáticas que involucra el proyecto (ver apéndices).

La creación de una red de grupos de investigación es uno de los objetivos más importantes del LACYQS. En este sentido puede considerarse un éxito del proyecto el involucramiento de un número mayor de instituciones y grupos de investigación, a los originalmente considerados. La estructura de organización de los académicos en el proyecto fue la siguiente: el Investigador Responsable designó a tres Coordinadores de Subproyecto, quienes apoyaron en el seguimiento de las tareas específicas para el desarrollo de cada una de las instalaciones; por otro lado, los académicos de cada institución colaboraron en el marco de sus respectivos grupos de investigación, coordinando sus actividades a través del Investigador Responsable y de los Coordinadores de Subproyectos. A su vez, los líderes de cada grupo de investigación coordinaron tareas específicas.

Todo este esfuerzo desplegado a lo largo de poco más de tres años ha demostrado las capacidades de los grupos de investigación mexicanos de desarrollar tecnología en el campo emergente de aprovechamiento de la energía solar concentrada.

Para trabajos futuros por realizar, se encuentra el tener un Plan de Negocios del LACYQS, de hecho ya se está trabajando en su elaboración. Dicho plan permitirá promover el uso de las instalaciones a nivel nacional e internacional en la industria del ramo y en la comunidad académica, que le permita al Laboratorio tener sustentabilidad financiera.

Así mismo, en la Convocatoria del CONACYT 2009 para el Establecimiento de Laboratorios Nacionales, se presentó y se aprobó la segunda etapa del LACYQS, en donde se ampliará las instalaciones del HSAFR y el CPH convirtiendo al primero en un laboratorio de termoquímica solar a altas temperaturas y flujos radiativos, y al segundo en un campo experimental de tecnología de torre central. Adicionalmente a la instalación de sistemas fotovoltaicos de concentración solar. Esta segunda etapa cuenta con el apoyo financiero del CONACYT, la UNAM y la UNISON.

## Apéndices

### A.1 Lista de Participantes

#### Responsables

Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca (CIE-UNAM): Coordinador General del Proyecto e Investigador Responsable.

Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes (CIE-UNAM): Coordinador del subproyecto HSAFR y del CPH por la UNAM.

Dr. Antonio Esteban Jiménez González (CIE-UNAM): Coordinador del Subproyecto PSTFAR:

Dr. Rafael Enrique Cabanillas López (DIQM-UNISON): Coordinador del subproyecto CPH:

#### Universidad Nacional Autónoma de México

##### Centro de Investigación en Energía:

Dr. Camilo Arancibia, Dr. Rafael Castrejón, Dr. Claudio Estrada, Dr. Oscar Jaramillo, Dr. Antonio Jiménez, Dr. Carlos A. Pérez Rábago, Ing. Jesús Quiñónez, Ing. Rogelio Morán Elvira.

##### Centro de Ciencia Aplicada y Desarrollo Tecnológico:

Dr. Jesús Sániger, Dr. Gabriel Ascanio, Ing. Roberto Reséndiz

#### Universidad de Sonora

Responsable Institucional: Dr. Luís Efraín Regalado (2007-2009), Dr. Rafael E. Cabanillas López (2009-2010).

##### Departamento de Arquitectura y Diseño (Laboratorio de Energía y Medioambiente en Arquitectura):

Dr. José Manuel Ochoa (Líder), Arq. Gilberto Romero, Dra. Irene Marincic, Dra. María Guadalupe Alpuche, Ing. Tammy Gabriela Ríos, M.C. Francisco González, M.C. Luisa María Gutiérrez, M. Arq. Luis Arturo Vargas

##### Departamento de Ingeniería Civil

M. I. Jesús Benito Pérez Valenzuela

##### Departamento de Ingeniería Industrial (Grupo de Mecatrónica)

Dr. Víctor Hugo Benítez (Líder), M. C. Jesús Horacio Pacheco, M. C. María Elena Anaya, M. C. Carlos Anaya, M. C. Héctor Mario Ramírez, M. C. Félix Montaña, Dr. Nún Pitalúa, M. C. Víctor Manuel Herrera, M. C. Isidro Ramos, M. C. Guadalupe Araceli Torres, Ing. Gustavo Jesús Ozuna Huerta

##### Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia (Grupo de Energía)

Dr. Rafael Enrique Cabanillas (Líder), Dr. Jesús Fernando Hinojosa, Dra. María Esperita Trujillo, M. I. Rodolfo Peón, Ing. Pablo Sosa.

##### Departamento de Investigación en Física

Dr. Luís Efraín Regalado

## **Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica**

Departamento: Coordinación de Óptica

Dr. Sergio Vázquez (Líder), Dr. Fermín Granados Agustín, Dra. María Elizabeth Percino Zacarías, Dra. Lizbeth Angélica Castañeda Escobar, M.C. Víctor Manuel Cruz Martínez, Ing. Álvaro Cuellar, Ing. Javier Arriaga Petrona, Luis Martínez Yáñez, Claudia Carballo Manuel, Noé Lopez Hernández, Armando de la Luz Portilla, Jose Teofilo Quechol Lopez, Valentín Lopez Cortes.

## **Universidad Autónoma MetropolitanaAzcapozalco**

Departamento de Ingeniería de Procesos e hidráulica

Dr. Hernando Romero Paredes Rubio

## **Centro de Investigación en Matemáticas**

Gerencia de Matemáticas Industriales

Dr. Norberto Flores Guzmán, Ing. Roberto Guzmán

## **Instituciones Extranjeras**

Dr. Manuel Romero Álvarez; Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (España).

Dr. Marcelino Sánchez González; Centro Nacional de Energías Renovables (España).

Dr. Félix Téllez Sufrategui; Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (España).

## A.2 Formación de Recursos Humanos

Las cifras de formación de recursos humanos en el proyecto se sintetizan en la tabla 1. Como se puede apreciar se ha logrado graduar a estudiantes de los tres niveles, pero además existe un número importante de estudiantes en proceso que comenzaron su trabajo en el segundo o tercer año del proyecto y que concluirán próximamente. En total se tienen o tendrán 11 estudiantes de doctorado, 9 de maestría, 10 de licenciatura y 18 adicionales; en total 48 estudiantes, número superior al inicialmente propuesto en el proyecto.

Tabla 1. Formación de recursos humanos en el proyecto

	Doctorado	Maestría	Licenciatura	Serv. Social/ Prácticas	Otros
<b>Concluidos</b>	4	2	2	3	15
<b>En proceso</b>	7	7	8		
<b>Totales</b>	11	9	10	3	15

### A.2.1 Tesis

#### Concluidos

1. Sayra Lissette Orozco Cerros; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM, 2009.
2. David Riveros Rosas; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM, 2008.
3. Heidi Isabel Villafán Vidales; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM, 2009.
4. Joel Herrera Vázquez, Doctorado en Óptica, INAOE, 2009.
5. Ricardo Pérez Enciso; Maestría en Ingeniería en Energía, UNAM, 2009.
6. Iván Salgado Tránsito; Maestría en Ingeniería en Energía, UNAM, 2007.
7. Luís Alberto Barba Andrade; Licenciatura, 2009.
8. Tenoch González Sánchez; Licenciatura, 2010.

#### En proceso

1. Moisés Montiel González; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM.
2. Dayana Hortensia Peñalver Vidal, Doctorado en Óptica, INAOE.
3. Ricardo Pérez Encino; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM.
4. Armando Piña Ortiz; Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, UNISON.
5. Iván Salgado Tránsito; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM.
6. Eduardo Venegas Reyes; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM.
7. Laura Ceballos, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, UNISON.
8. Luís Gallardo Pérez; Maestría en Ingeniería en Energía, UNAM.
9. David Marroquín García; Maestría en Ingeniería en Energía, UNAM.
10. Zinnia Mizquez Antúnez; Maestría en Ingeniería Industrial, UNISON.
11. Jorge Mondragón Robles; Maestría en Ciencias de la Ingeniería, UNISON.

12. Manuel Ignacio Peña Cruz; Maestría en Ingeniería en Energía, UNAM.
13. Pablo Sosa F.; Maestría en Ciencias de la Ingeniería, UNISON.
14. Rene Miguel Ramírez Mariaud; Maestría en Ingeniería en Energía, UNAM.
  
15. Erick Aranda Lagunas; Licenciatura en Ingeniería electromecánica, ITZ.
16. María Eugenia Beltrán Corona; Licenciatura en Arquitectura, UNISON.
17. Emmanuel Hernández Martínez; Licenciatura en Ingeniería electromecánica, ITZ.
18. Eduardo Iragorri Sámano; Licenciatura en Ingeniería Bioquímica, ITZ.
19. Cesar Pérez Franco; Licenciatura en Ingeniería Bioquímica, ITZ.
20. Vladimir Ramírez Alcázar; Licenciatura en Física, UNISON.
21. Isaac Santana Sotelo Licenciatura en Ingeniería electromecánica, ITZ.
22. Javier Arriaga Petrona, Licenciatura en Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

## **A.2.2 Servicio Social y Prácticas**

1. José Carlos Campero Acuña; Arquitectura, UNISON, Servicio Social.
2. Hugo Moreno Freydig; Arquitectura, UNISON, Servicio Social y prácticas profesionales.
3. Isaías Rivas León; Arquitectura, UNISON, Servicio Social.

## **A.2.3 Otros**

Estos son estudiantes que sin ser tesistas o prestadores de Servicio Social, han participado con fines formativos en actividades del proyecto, a través de prácticas en cursos de licenciatura.

1. David Alan Tapia Carrillo; Ingeniería Mecatrónica, UNISON.
2. Jesús Rodolfo Bernal Salazar; Ingeniería Mecatrónica, UNISON.
3. Ramón Alejandro Trujillo Parra; Ingeniería Mecatrónica, UNISON.
4. César Alejandro Coronado Meza; Ingeniería Mecatrónica, UNISON.
5. Carlos Alberto Amaya Cota; Ingeniería Mecatrónica, UNISON.
6. Ismael Hiram Amparan Duran; Ingeniería Mecatrónica, UNISON.
7. Gilberto Chávez López; Ingeniería Mecatrónica, UNISON.
8. Carlos Romero Valdés; Ingeniería Mecatrónica, UNISON.
9. José Alberto Molina Varela; Ingeniería Mecatrónica, UNISON.
10. Miguel Ángel Zepeda Martínez; Ingeniería Química, UNISON.
11. Isis Cassandra Ortega Virrueta; Ingeniería Química, UNISON.
12. Gabriel Roberto Tiznado Palacios; Ingeniería Química, UNISON.
13. Marien Galindo Bojórquez; Ingeniería Química, UNISON.
14. Ángel Iván Aguilar Rosas; Ingeniería Química, UNISON.
15. Omar Alexis Cabanillas González; Ingeniería Química, UNISON.

## A.3 Publicaciones

### A.3.1 Artículos Internacionales

1. Herrera Vázquez, J., Sergio Vázquez y Montiel, “Design of a solar concentrator with hexagonal facets”. Proceedings of SPIE, Vol. 6652, Estados Unidos, 2007.
2. Jiménez González, A.E. and S Gelover Santiago. Structural and optoelectronic characterization of TiO<sub>2</sub> films prepared using the sol-gel technique, *Semiconductor Science and Technology* 22 (2007) 709-716.
3. Riveros-Rosas, D., M. Sánchez-González, C.A. Estrada. “Three-Dimensional Analysis of a Concentrated Solar Flux”. *Journal of Solar Energy Engineering* 130, 014503 (2008).
4. Villafán-Vidales, H.I., C.A. Arancibia-Bulnes, U. Dehesa-Carrasco, H. Romero-Paredes. “Monte Carlo radiative transfer simulation of a cavity solar reactor for the reduction of cerium oxide”. *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (1), 115-124 (2009).
5. González-García, J., S. Vázquez-Montiel, A. Santiago-Alvarado, A. Cordero-Dávila, G. Castro-González, “A proposed design and fabrication of lenses and mirrors from a set of spherical rings that produce desired energy distributions for solar energy applications”. *Solar Energy*, Vol. 83, 2205-2216, 2009.
6. Riveros-Rosas, D, J. Herrera-Vázquez, C.A. Pérez-Rabago, C.A. Arancibia-Bulnes, S. Vázquez-Montiel, M. Sánchez-González, F. Granados-Agustín, O.A. Jaramillo, C.A. Estrada, “Optical Design of a High Radiative Flux Solar Furnace for Mexico”, , *Solar Energy* 84 (5), 792–800 (2010).
7. Riveros-Rosas, D., M. Sánchez-González, C. A. Arancibia-Bulnes, C. A. Estrada. “Influence of the Size of Facets on Point Focus Solar Concentrators”, . *Renewable Energy* 36 (3), 966-970 (2011).
8. Bassam, A., I. Salgado-Tránsito, I. Oller, E. Santoyo, A.E. Jiménez, J.A. Hernandez and A. Zapata, Optimal performance assessment for a photo- fenton degradation pilot plant driven by solar energy using artificial neural networks”. *Int. Journal of Energy Research* (2101) en revisión.
9. Jiménez González, A.E., Ivan salgado Transito, Francisco Payan Martínez and Ma. Luisa Ramón García. Experimental Design of CPC Collectors for the Degradation of Carbaryl Pesticides as a Function of Solar Flux *J. Solar Energy Engineering* (2010) En revisión.
10. Valdés-Parada, F.J., Romero-Paredes H., Espinosa-Paredes G., Numerical simulation of a tubular solar reactor for methane cracking. *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (5), 3354-3363 (2011).

### A.3.2 Capítulos en Libros

1. Arancibia-Bulnes, C.A., A. E. Jiménez, C. A. Estrada. “Development and Modeling of Solar Photocatalytic Reactors”, en el libro *Advances in Chemical Engineering Vol. 36. Photocatalytic Technologies*. H. de Lasa, B. Serrano (Editores), ISBN: 978-0-12-374763-1 (Academic Press, USA, 2009), pp. 185-228.
2. Arancibia-Bulnes, Camilo A., Antonio E. Jiménez González, Oscar A. Jaramillo Salgado and Claudio A. Estrada Gasca. Some recent research on solar energy technology. In *Towards a Cleaner Planet: Energy for the Future (Environmental Science and Engineering / Environmental Science.)* Editors: Jaime Klapp, Jorge L. Cervantes-Cota, José Federico Chávez Alcalá. 420 pages. Springer Verlag; 1 edition, ISBN-10: 3540713441, ISBN-13: 978-3540713449.

### A.3.3 Memorias de Congresos Internacionales

1. Estrada, C.A., D. Riveros-Rosas, J. Herrera-Vázquez, S. Vázquez-Montiel, C. A. Arancibia-Bulnes, C. Pérez-Rábago, F. Granados-Agustín. "Optical design of a high radiative flux solar furnace for Mexico", Proceedings of the EUROSUN 2008 Conference, October 7th-10th, Lisbon, Portugal, Artículo 515.
2. Riveros, D., C.A. Pérez-Rábago, C. A. Arancibia-Bulnes, M. Romero, E. Regalado, R. Cabanillas, C. A. Estrada. "Sizing and performance analysis of a 2-MWth experimental solar heliostat field in Sonora", Proceedings of the SolarPACES 2009 Conference (formato PDF, ISBN: 978-3-00-028755-8), September 15-18th, Berlin, Germany. Artículo 16329.
3. Villafán-Vidales, H.I., C. A. Arancibia-Bulnes, D. Riveros-Rosas, H. Romero-Paredes, O.A. Jaramillo. "Monte Carlo radiative transfer modeling of a cavity solar reactor for the reduction of SnO<sub>2</sub>", Proceedings of the SolarPACES 2010 Conference, September 21-24th, Perpignan, France. Artículo 190.
4. Riveros-Rosas, D., R. Castrejón-García, C. A. Arancibia-Bulnes, C. A. Pérez-Rábago, C. A. Estrada. "Evaluation of two reflective coatings for the mirrors of the high radiative flux solar furnace", Proceedings of the SolarPACES 2010 Conference, September 21-24th, Perpignan, France. Artículo 215.
5. Antonio Jiménez González, Tenoch González Sánchez, Rogelio Morán Elvira, Claudio A. Estrada Gasca y Guillermo Pérez Luna. Estudios de la función de trabajo en materiales conductores y semiconductores por el método Kelvin. 5º Congreso Internacional de Ingeniería Física – UAM Azcapotzalco, 17-21 de Mayo del 2010.
6. Antonio E. Jiménez González and Camilo A. Arancibia-Bulnes. Decolorization of dye polluted water by photochemical processes. International Energy Agency (IEA); Solar Power and Chemical Energy Systems, Annual Report 2008 Edited by C. Richter in cooperation with J. Blanco, P. Heller, M. Mehos, A. Meier, R. Meyer, W. Weiss. Pag. 8.9-8.10.
7. Pérez-Rábago C.A., E. Brito, D. Riveros-Rosas, C.A. Arancibia-Bulnes, G. Ascanio, N. Flores-Guzmán, C.A. Estrada, 2010, "Control System of a Solar Furnace", 1st International Congress on Instrumentation and Applied Sciences, Cancun, Q. R. México.
8. Pérez-Rábago C.A., D. Riveros-Rosas, O.A. Jaramillo, M. Bazán, M. Carrillo-Santana, M. Montiel-González, G. Ascanio, C.A. Estrada, 2010, "Mini-Solar Furnace by Using a Point Focus Solar Concentrator", SolarPACES 2010 Symposium, Perpignan, France.
9. Estrada C.A., Pérez-Rábago C.A., Ballestrin J., "Development of a Conical Cavity Calorimeter for Measuring Highly Concentrated Solar Flux", SolarPACES 2008 Symposium, Las Vegas, Nevada, USA.
10. Romero Paredes, H., F. J. Valdés-Parada, G. Espinosa-Paredes. "Momentum, Heat and Mass Transfer in a Tubular Solar Reactor for Pyrolysis of Methane.", Proceedings of the SolarPACES 2010 Conference (formato PDF), September 21-24th, Perpignan, France. Artículo 218.

### **A.3.4 Memorias de Congresos Nacionales**

1. Jesús .H. Pacheco, María E. Anaya y Victor H. Benitez. "Sistema de Control para Seguimiento Solar basado en Visión Artificial". VIII Congreso sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, CIINDET 2010, Cuernavaca Morelos, 2010.
2. Victor H. Benitez, Carlos A. Eredias y Hector M. Ramírez. "Síntesis de Señales de Control para Seguimiento Solar y su Aplicación a un Prototipo de Heliostato". VIII Congreso sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, CIINDET 2010, Cuernavaca Morelos, 2010.
3. David Riveros-Rosas, Rafael Cabanillas-López, Fernando Hinojosa-Palafox, Camilo Arancibia-Bulnes, Carlos A. Perez-Rábago, Claudio A. Estrada. "Diseño de una Planta de Torre Central de 0.5 MWt en Hermosillo, Sonora". Memorias de la XXXIV Semana Nacional de Energía Solar, ANES, Guanajuato, Gto., 2010.
4. Antonio, Jiménez González, Ivan Salgado Tránsito y Ma. Luisa Ramón García. Avances en el diseño de concentradores solares CPC para fotocátalisis heterogénea. Memorias de la XXXI Semana Nacional de Energía Solar; Zacatecas, México, 2007. Pag. 583-587

### **A.4 Lista de Equipo en proceso de propiedad intelectual**

1. Atenuador del HSAFR
2. Mesa de movimiento tridimensional del HSAFR
3. Helióstatos del HSAFR y del CPH
4. CPC de la PSFTAR
5. Sistemas de control del HSAFR
6. Sistemas de control del CPH

## A.5 Actividades de Difusión y Divulgación

### A.5.1 Organización de eventos

1. 1er Congreso de Microscopía Avanzada. Organizadores: Antonio E. Jiménez, González (CIE-UNAM), Maurilio Martínez (Hitachi), Gabriel Orozco Orihuela y Hugo Huesca (ATL). Centro de Investigación en Energía Agosto 8-10, 2010, Temixco, Morelos, México en colaboración con las empresas Hitachy y Alta Tecnología.

### A.5.2 Conferencias

1. Antonio Esteban Jiménez González. Photocatalytic Solar Plant, First International Alumni Seminar on Green Engineering - DAAD Germany, March 24-25, 2010 UNAM, Mexico City
2. Antonio Esteban Jiménez González, Design of a photocatalytic solar plant. Sixth International Minisymposium on Removal of Contaminants from Water, Atmosphere and Soil, Sep. 8-11, 2010. UNAM, Mexico City.
3. Salgado Tránsito Ivan and Jiménez Antonio Esteban. Photocatalytic degradation of the plaguicide carbaryl using low concentrating solar CPC collectors, Symposium 16, Renewable Energy and Sustainable Development of the XIX International Materials Research Congress. Cancun, Quintana Roo, August 15 – 19, 2010.
4. "Sistemas de alta concentración solar", Camilo Alberto Arancibia Bulnes, 8 de septiembre de 2008, Programa de Seminarios del Posgrado en Ingeniería área Energía, Centro de Investigación en Energía, UNAM, Temixco, Morelos.
5. "Energía solar y purificación de agua", Camilo Arancibia Bulnes, 26 de marzo de 2009, Simposio Internacional de Tecnología Verde Para la Producción y el Uso Sustentable de la Energía, Organizado por el Instituto de Estudios Avanzados México Canadá y la Comisión Nacional Para el Uso Eficiente de la Energía, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Guanajuato, 25 al 27 de marzo de 2009.
6. "Estado actual del proyecto Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar", Camilo Arancibia Bulnes, 27 de mayo de 2009, Seminario del Departamento de Termociencias, Centro de Investigación en Energía, UNAM, Temixco, Morelos.
7. "Reactores solares químicos", Camilo Arancibia Bulnes, 10 de febrero de 2009, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora, Hermosillo.
8. "National laboratory of solar concentration systems and solar chemistry: current status of the project", Camilo A. Arancibia Bulnes, April 29th 2010, Green Reaction Engineering Sessions, 2nd International Conference on Climate Change and Sustainable Development, Zacatecas, Mexico.
9. "Modelación de Transporte de Radiación en Reactores Químicos Solares" Camilo Arancibia Bulnes, 8 de octubre de 2010, Seminario del Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química, Universidad de Sonora, Hermosillo.
10. "Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar", Camilo Arancibia Bulnes, 8 de abril de 2010, dentro de la 10a Escuela de Investigación en Energía, Centro de Investigación en Energía, UNAM, Temixco, Morelos.

11. "La energía solar y la química", Camilo Arancibia Bulnes, 16 de noviembre de 2010, dentro del Congreso Estudiantil de Ingeniería Química 2010, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Sonora, Hermosillo.
12. "Concentradores Solares", Camilo Arancibia Bulnes, 17 de noviembre de 2010, dentro de la Semana de Ingeniería 2010, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora, Hermosillo.
13. "Control de Heliostatos", Víctor H. Benítez, Conferencia impartida en la semana cultural de ingeniería, organizada por la División de Ingeniería, Universidad de Sonora, 17 de dic. 2010.
14. "Seguimiento Solar basado en Visión Artificial", Jesús H. Pacheco, Conferencia impartida en la semana cultural de ingeniería, organizada por la División de Ingeniería, Universidad de Sonora, 16 de dic. 2010.

### **A.5.3 Entrevistas y noticias**

1. Víctor Benítez, María Elena Anaya y Jesús Pacheco, entrevista en el programa de radio "Ingenio: la manera inteligente de transformar" que transmite la división de ingeniería por radio universidad (UNISON) el 13 de octubre de 2010
2. Noticia publicada en portal de la UNISON: <http://www.uson.mx/noticias/default.php?id=10342>
3. Claudio Estrada y Camilo Arancibia. "Laboratorio Nacional de sistemas de concentración solar y de química solar", participación en el Programa Radiofónico Perfiles: Las vidas y los proyectos que conforman nuestro ser universitario, con el Periodista Hernando Luján, transmitida por Radio Universidad (UNAM), Febrero 15 del 2010.
4. Camilo Arancibia. "Energía del Sol", participación en un programa de media hora de la serie Venga a tomar café con nosotros, transmitida por Radio UNAM 860 AM, 21 de abril de 2010, México, D.F.