

Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa

Informe Técnico Final

No de Proyecto: CONACYT 123767 Responsable técnico: Dr. Claudio A. Estrada Gasca Período reportado: Octubre 2013 – Mayo de 2015

Elaborado por:

<u>UNAM:</u> Claudio A. Estrada Gasca, Camilo A. Arancibia Bulnes, Carlos A. Pérez Rábago, Heidi I. Villafán Vidales, Ernesto Anguera Romero, Alejandro Bautista Orozco, José de Jesús Quiñones Aguilar.

<u>UNISON:</u> Ricardo Rodríguez Carbajal, Jesús Fernando Hinojosa Palafox, Rafael Cabanillas López, Christian Dávila Peralta, Víctor Manuel Herrera, Víctor Hugo Benítez Baltazar, Ricardo A. Pérez Enciso, Cuitlahuac Iriarte Cornejo, Ramiro Calleja Valdés.

Resumen:

Se presenta el tercer y último informe del proyecto CONACYT 123767, LACYQS II, detallando las actividades realizadas en cada uno de los tres subproyectos: Laboratorio de Termoquímica Solar (LaTeQS), Campo Experimental de Tecnología de Torre central (CEToC) y el Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos con Concentración (LaSiFoV). En particular, se describen los equipos instalados, su diseño y caracterización. También se describe el desarrollo de nuevas metodologías de caracterización y algunos resultados científicos que se han obtenido ya con el uso de las instalaciones. Se hace un recuento de los esfuerzos de vinculación que se han llevado a cabo y la generación de propiedad intelectual, así como las actividades de divulgación. Finalmente, se complementa, en los apéndices, con una lista de publicaciones obtenidas y recursos humanos formados.





http://www.concentracionsolar.org.mx



Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa

Tabla de contenido

1	Introdu	ıcción	5
2	Activid	ades propuestas	6
3	Activida	ades desarrolladas	9
	3.1 Lab	oratorio de Termoquímica Solar	9
	3.1.1	Caracterización del HoSIER	9
	3.1.2	Mejoramiento del HoSIER	9
	3.1.3	Selección del proceso a ser desarrollado	9
	3.1.4	Selección, adquisición e instalación de equipos analíticos	10
	3.1.5	Evaluación de los materiales y reacciones involucradas en el proceso termoquímico	
	selecci	onado: propiedades termodinámicas, reactividad, cinética química, propiedades ópticas y	
	térmic	as	13
	3.1.6	Diseño y construcción de reactores solares	17
	3.1.7	Desarrollo de la ingeniería de procesos (análisis exergético, simulación dinámica, evaluación	
	tecno-	económica)	21
	3.1.8	Implementación y puesta en marcha de los procesos	21
	3.1.9	Elaboración de informes y publicaciones	30
	3.2 Can	npo Experimental de Torre Central	.31
	3.2.1	Construcción de un laboratorio de investigación anexo a la instalación preexistente de TC	31
	3.2.2	Desarrollo de un prototipo mejorado de heliostato de 36 m2	32
	3.2.3 haliáat	Implementación de la infraestructura y las metodologías para evaluar los prototipos de	.
	nenost	atos desarrollados	32
	3.2.4 2.2 E	Majora del diseño y construcción de 650 m2 de belióstatos	32 22
	226	Diseño de comunicación inalámbrica para control de belióstatos	27
	3.2.0	Instalación de los helióstatos	28
	3.2.7	Alineación de helióstatos y caracterización óntica del campo	30
	320	Revisión literaria y estudio de los mecanismos de transferencia de calor asociados a la	55
	operac	ión de los recentores térmicos en sistemas de TC	39
	3.2.10	Flección del tipo de intercambiador a desarrollar y diseño del mismo	43
	3.2.11	Construcción del receptor.	46
	3.2.12	Desarrollo del sistema de control y adquisición de datos pata la automatización de del	
	sistem	a de TC	49
	3.2.13	Pruebas térmicas de la planta de torre central con el receptor desarrollado	51
	3.3 Lab	oratorio de sistemas fotovoltaicos con concentración	.56
	3.3.1	Diseño de Concentradores Fotovoltaicos (CPV)	56
	3.3.2	Construcción de prototipos	68
	3.3.3	Evaluación y caracterización de prototipos de CPV	73
	3.3.4	Mejoramiento y optimización de los prototipos	76

	3.4 Act	tividades de divulgación y vinculación	79
	3.4.1	Divulgación	
	3.4.2	Vinculación	
	3.4.3	Solicitudes de patente	
4	Conclu	isiones	93
A	péndices		
	A1. Infor	rmes Técnicos Parciales	94
	A2. Publ	icaciones	94
	A3. Form	nación de Recursos Humanos	98
	A4. Man	uales, Reportes, Reglas de operación	
	Se preser	ntan los manuales técnicos, los reportes técnicos y las reglas de operación generados para la o	peración de
	las diferer	ntes instalaciones del laboratorio nacional.	102
	A5. Lista	de Participantes	102
	Comit	é Técnico (de acuerdo al Convenio UNAM-UNISON)	
	A3.1 l	Jniversidad Nacional Autónoma de México	
	A3.2 l	Jniversidad de Sonora	
	A3.3 C	Otras Instituciones Nacionales	103
	A3.4 I	nstituciones Extranjeras	

Agradecimientos: Se agradece el apoyo de la M.C. Nicté Luna Medina en recopilación de información sobre divulgación. Se agradece también a las C. Maribel Fernández Pérez y María de Lourdes Calderón Medina por su siempre eficiente apoyo secretarial y actitud de servicio, que han facilitado la elaboración de este informe.

1 Introducción

El objetivo general del Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar, Segunda Etapa (LACYQS II) es avanzar en el conocimiento de las tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar, poniendo a prueba sistemas de concentración solar con conceptos novedosos. Esto incluyó repotenciar la infraestructura previamente desarrollada en la primera etapa (proyecto CONACYT 56918), consolidar la red de grupos de investigación que se ha logrado integrar en el área, formar recursos humanos de alto nivel y especialización e impulsar el desarrollo de una industria nacional de tecnologías de concentración solar. Se considera que este objetivo general ya se ha sido cumplido.

En particular, en el proyecto original se propuso escalar y transformar el Campo de Prueba de Heliostatos (Fig. 1.1a) a un Campo Experimental de Tecnología de Torre Central (CEToC), con capacidad de 2 MW térmicos; implementar un laboratorio para la producción de hidrógeno usando el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo del IER (HoSIER, Fig. 1.1b) y hacer una instalación piloto de fotovoltaicos con concentración.



Figura 1.1. a) Instalaciones del CEToC en 2011, en terrenos de la UNISON, en Hermosillo, Sonora. b) Vista exterior del HOSIER, en las instalaciones del IER-UNAM, en Temixco, Morelos.

Con fines de organización del trabajo en las diferentes instalaciones, el proyecto se encuentra dividido en tres subproyectos:

- Laboratorio de termoquímica solar (LaTeQS)
- Campo experimental de tecnología de torre central (CEToC)
- Laboratorio de sistemas fotovoltaicos con concentración solar (LaSiFoV)

Como se señaló en los informes parciales 1° y 2°, los objetivos del proyecto se plantearon considerando un presupuesto 39.46 millones de pesos. El presupuesto aprobado fue de 24.386 millones, lo que implicó una reducción de 38.2%. Esta disminución impactó los alcances del proyecto; en particular, se redujo a la mitad la meta de potencia total propuesta para el CEToC (1 MW) y se redujo el subproyecto LaSiFoV a un mínimo. Estas reducciones se detallan más adelante.

Como se ha mencionado en los informes parciales 1° y 2°, cada uno de los subproyectos cuenta con su propio cronograma de actividades, los cuales se estructuraron por trimestres, como se muestra en la sección que sigue. El primer informe parcial abarcó el período de abril a agosto de 2012. El segundo informe parcial cubrió el período de septiembre de 2012 a septiembre de 2013. Este tercer y último informe corresponde al período de octubre de 2013 a mayo de 2015.

A diferencia de otros laboratorios nacionales, donde solo se adquirieron equipos, se instalaron y se pusieron a operar, en LACYQS hemos tenido que diseñar y construir equipos y sistemas especiales. Esto requirió el desarrollo y prueba de prototipos. En algunos casos fue necesaria más de una generación de prototipos para mejorar su desempeño; ello retrasó la toma de la decisión para su fabricación definitiva. Este fue el caso de los helióstatos y del receptor calorimétrico. Sabiendo esto, se solicitó en su momento, al CONACYT, una extensión al proyecto de 6 meses, desafortunadamente no se concedió. Se trabajo intensamente para poder terminar el proyecto en tiempo y forma pero no se logró. En este momento, considerando las actividades comprometidas de acuerdo a los cronogramas, hay un 84% de actividades totalmente terminadas y del 16% faltante, se tiene un progreso considerable (estimado en 80%). Se ha logrado adquirir todo lo necesario para que en los próximos 3 meses se terminen de instalar y probar todos los equipos faltantes y con ello se terminen todas las actividades comprometidas en este proyecto.

A pesar de que no todas las instalaciones están terminadas al 100%, ya se tienen resultados de investigación, formación de recursos humanos, divulgación y se han prestado servicios a industriales como a académicos. Es importante señalar que las observaciones realizadas por las comisiones evaluadoras de los informes parciales 1 y 2 fueron atendidas.

2 Actividades propuestas

De acuerdo a la recalendarización establecida en el reporte anterior, las actividades de los diferentes subproyectos se muestran a continuación en las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3. En cada una de ellas se señala con líneas rojas verticales el momento a partir del cual cubre el presente reporte

Laboratorio de Termoquímica Solar							Т	rime	stre						
Actividad		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. Caracterización del HoSIER															
2. Mejoramiento del HoSIER															
3. Selección del proceso a ser desarrollado															
4. Selección y adquisición e instalación de equipos analíticos	100%														
5. Evaluación de los materiales y reacciones involucradas en el proceso termoquímico seleccionado: propiedades termodinámicas, reactividad, cinética química, propiedades ópticas y térmicas															
6. Diseño y construcción de reactores solares.	100%														

Tabla 2.1. Cronograma de actividades para el Laboratorio de Termoquímica Solar.

7. Desarrollo de la ingeniería de procesos (análisis exergético, simulación dinámica, evaluación tecno-económica).	20%							
8. Implementación y puesta en marcha de los procesos	100%							
9. Elaboración de informes y publicaciones	100%							

Tabla 2.2. Cronograma actualizado de actividades para el Campo Experimental de Torre Central.

Campo Experimental de Torre Central		Trimestre													
Actividad	Conc.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. Construcción de un laboratorio de investigación anexo a la instalación preexistente de torre central															
2. Desarrollar un prototipo mejorado de helióstato de 36 m2, con base en los resultados del proyecto anterior	100%														
3. Implementar la infraestructura y las metodologías para evaluar los prototipos de helióstatos desarrollados	100%														
4. Probar el prototipo desarrollado e Identificar los puntos de mejora	100%														
 Mejorar el diseño y llevar a cabo la construcción de 650 m2 de helióstatos con base en dicho diseño, para Ilevar área total instalada previamente hasta los 1190 m2 	100%														
 Diseñar sistemas electrónicos de comunicación inalámbrica para el control de campos de helióstatos. 	100%														
7. Instalar los helióstatos	50%														
8. Llevar a cabo la alineación de helióstatos y caracterización óptica del campo	0%														
9. Revisar la literatura y estudiar los mecanismos de transferencia de calor asociados a la operación de los receptores térmicos en sistemas de TC.	100%														
10. Elegir el tipo de intercambiador a desarrollar y diseñarlo	100%														
11. Construir el receptor	100%														
12. Desarrollar el sistema de control y adquisición de datos pata la automatización de del sistema de TC															
13. Llevar a cabo pruebas térmicas de la planta de torre central con el receptor desarrollado	0%														

Tabla 2.3. Cronograma actualizado de actividades para el Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos con Concentración.

Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos con Concentración			Trimestre 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14												
Actividad	Conc.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. Diseño de CPV	100%														
2. Construcción de prototipos	100%														

3. Evaluación y caracterización de prototipos de CPV.	100%							
4. Mejoramiento y optimización de los prototipos	50%							
5. Evaluación y caracterización de prototipos mejorados de CPV	50%							

3 Actividades desarrolladas

A continuación se reportan las actividades desarrolladas durante la segunda mitad del proyecto. La mayoría de las actividades se han cumplido en tiempo. Algunas de ellas tienen retraso pero se encuentran en proceso y deberán concluirse en los próximos cuatro meses. Como ya se comentó, esta situación se había previsto y se solicitó una extensión de 6 meses que fue denegada. La razón principal de esto fueron algunas dificultades en adquisiciones y procesos administrativos que no se previeron al inicio del proyecto. Las actividades realizadas en el presente período se describen a continuación, clasificándolas por subproyecto y con referencia a las tareas específicas comprometidas en los cronogramas anteriores.

3.1 Laboratorio de Termoquímica Solar

Durante el presente período las actividades se han centrado en la selección del proceso a ser desarrollado, selección e instalación de equipos analíticosEl cronograma del Laboratorio de química solar ha sido cumplido en términos generales. También se han realizado actividades no previstas, como la síntesis de materiales con energía solar concentrada, las cuales se describen más adelante.

3.1.1 Caracterización del HoSIER

Esta actividad se concluyó y reportó en el período anterior.

3.1.2 Mejoramiento del HoSIER

Esta actividad se concluyó y reportó en el período anterior.

3.1.3 Selección del proceso a ser desarrollado

Se ha llevado a cabo la selección de los procesos termoquímicos a ser implementados mediante energía solar en el HoSIER durante el presente proyecto. Esta selección se ha hecho a partir de una revisión de estado del arte de los procesos termoquímicos solares enfocados en la producción de hidrógeno y de gas de síntesis. Dicha revisión se reportó en el segundo informe, en este reporte solo se mencionaron los criterios para seleccionar dichos procesos, llegando a la conclusión de posiblemente trabajar con la reducción de óxidos no volátiles y la implementación de un proceso de descarbonización de un hidrocarburo.

En la reducción de óxidos no volátiles se trabajó con la reducción del óxido de cobre CuO. Lo anterior debido a la disponibilidad del material, ya que el óxido de cobre es mucho más abundante que el óxido de cerio. La reducción/oxidación del óxido de cobre se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{array}{c} CuO \rightarrow Cu_2O + 1/2 \ O_2 \\ Cu_2O + 1/2 \ O_2 \rightarrow CuO \end{array}$$

En lo que se refiere a la implementación de un proceso de descarbonización de un hidrocarburo, se decidió trabajar con el coque de petróleo, ya que este es un residuo de con un elevado contenido de carbono que puede ser utilizado para obtener gas de síntesis.

El coque de petróleo que es un producto residual de elevado contenido en carbono, resultante de la pirolisis de las fracciones pesadas obtenidas en el refino del petróleo a través de la carbonización. Existen cuatro tipos distintos de coque de cualidades distintas que dependen de los residuos de partida y del proceso de producción. Los tipos de coque de petróleo son: de combustión, regular, de aguja y de recarburación. En México sólo se produce coque de combustión, y sólo en tres de las seis refinerías que existen en México las cuales son; Refinería "General Lázaro Cárdenas" en Minatitlán, Veracruz, Refinería "Francisco I. Madero" en Ciudad Madero, Tamaulipas y Refinería "Ing. Héctor R. Lara Sosa" en Caderyta, Nuevo León.

Este coque de combustión no es de un alto valor comercial, sin embargo se le puede aplicar la concentración solar para aumentar su valor energético de manera limpia a través de la gasificación a la vez que se transforma en un combustible más limpio. Este puede ser un nicho importante para el desarrollo tecnológico y económico de México ya que, en su mayor parte, la industria cementera utiliza el coque de petróleo como fuente de combustible para generar el calor de proceso para sus hornos. Con el fin de contribuir al desarrollo de tecnología nacional en energía solar concentrada se propone estudiar la gasificación solar del coque de petróleo.

También se implementaron dos procesos para síntesis de dos materiales de alto valor agregado: el SiC y el WO₃. El SiC ha sido objeto de investigación debido a sus altos valores de: absortancia, área específica, porosidad y dureza. También presenta una alta conductividad térmica, una buena resistencia a la oxidación, así como una excelente estabilidad química a altas temperaturas y ambientes hostiles. Por todo lo anterior, el SiC tiene diversas aplicaciones como: soporte catalítico, dispositivos fotoeléctricos, material para aplicaciones de alta temperatura, por ejemplo receptores solares volumétricos.

Actualmente existen varios métodos convencionales para la síntesis de este material. Entre los más utilizados están los métodos de reducción carbotérmica, debido a que las temperaturas (1100-1800 °C) son mucho menores que el proceso tradicional (2000 °C). En la síntesis de SiC se han utilizado diversos materiales como precursores, por ejemplo: polvo de silicio, sílice sol o tetraetilortosilicato (TEOS), grafito, resina fenólica, bambú y sacarosa.

El óxido de tungsteno (VI) es un material prometedor con aplicaciones científicas y tecnológicas importantes debido a que tiene propiedades electrocrómicas, gasocrómicas y fotocrómicas. Normalmente se sintetiza por medio de rutas en fase líquida, como la hidrotérmica o sol-gel; también se ha sintetizado por procesos complicados como el sputtering, deposición química, entre otros. La desventaja de los procesos anteriores es que son procesos complicados y requieren el uso de varios reactivos químicos con la posibilidad de tener al final de la síntesis impurezas no deseadas y desechos contaminantes. En este sentido, la energía solar concentrada es una opción atractiva para la síntesis de materiales a un bajo costo y reduciendo las emisiones de CO₂.

3.1.4 Selección, adquisición e instalación de equipos analíticos

El equipo analítico que se seleccionó va acorde al tipo de reacciones químicas que se desarrollaron. Se compraron analizador de la marca SIEMENS para analizar CO, CO₂, H₂, CH₄ y O₂, en dos rangos, en los gases de salida del reactor solar. La figura 3.1.1 muestra un esquema de la instalación y una fotografía de dichos analizadores.

Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa



Figura 3.1.1 Esquema de la instalación y fotografía de los analizadores SIEMENS.

Otro equipo que se adquirió fue un equipo para la medición de temperatura de no contacto, el cual consiste en una cámara termográfica de la marca FLIR, modelo SC2500, que registra temperaturas en tiempo real desde los 400 a los 3000 °C. Esta cámara se integró fácilmente al control del HoSIER. La figura 3.1.2 muestra una foto del equipo en el HoSIER y la figura 3.3 una imagen tomada con la cámara en un experimento.



Figura 3.1.2. Cámara termográfica instalada en el horno solar.



Figura 3.1.3. Imagen de la distribución de temperaturas en el reactor rotatorio.

El siguiente grupo de equipos adquiridos son los que permiten la medición y el control del flujo de gases a la entrada de los reactores solares. Este grupo incluye a flujómetros de la marca Bronkhorst que permiten regular el flujo de Argón, CO₂, nitrógeno y metano en dos rangos diferentes: 0-10 L/min y 0-30 L/min. También se adquirió un equipo de generación de vapor y mezclas controladas (Controlled Evaporative Mixer, CEM, Marca Bronkhorst, modelo W303A) con el que se regula y mede las mezclas con vapor de agua que entran a los reactores. La figura 3.4 muestra una foto del banco de alimentación de gases.





Figura 3.1.4. Fotografía del banco de gases de alimentación.

3.1.5 Evaluación de los materiales y reacciones involucradas en el proceso termoquímico seleccionado: propiedades termodinámicas, reactividad, cinética química, propiedades ópticas y térmicas

Para llegar a desarrollar reactores para un proceso en particular, primero se debe tener un conocimiento amplio de la materia prima que se desea gasificar.

3.1.5.1 Gasificación de coque de petroleo

En este caso, se sometió el coque de petróleo de las tres refinerías consideradas a varios estudios para determinar sus características químicas y morfológicas para obtener información que permitió investigar la cinética de reacción de la gasificación.

Primeramente se realizó un análisis próximo por un método no estándar, basado en termogravimetría, para determinar el contenido de humedad, volátiles, carbón fijo y cenizas de las muestras. Después se realizó un análisis ulterior para determinar la composición química del coque de petróleo por medio de un análisis fundamental y por medio de un estudio ICP-OES (espectroscopía de emisión óptica por plasma acoplado inducido) Las tablas 3.1 y 3.2 muestran dichos análisis.

Tabla 3.1.1. Análisis próximo de las muestras de coque	e provenientes de las tres refinerías de PEMEX
--	--

% peso	Madero	Cadereyta	Minatitlán
Humedad	9.39	5.80	3.04
Volátiles	10.40	9.47	9.15
Carbón fijo	79.87	83.89	87.56
Cenizas	0.33	0.84	0.25

Tabla 3.1.2. Análisis ulterior de las mu	estras de coque provenientes	de las tres refinerías de PEMEX
--	------------------------------	---------------------------------

Elemento	Madero	Cadereyta	Minatitlán
(% peso)			
C	84.7	87.6	84.5
Н	3.6	3.7	3.4
0	1	1	1.5
Ν	1.1	1.2	1.6
S	3.1	5.8	3.6
(ppm)			
Fe	93	161	80
Ni	270	265	267
Pt	26	23	23
V	1644	1304	1524

Con la información anterior, se procedió a determinar la cinética de la reacción, para lo cual se realizó una intensa campaña de experimentación en el IMDEA Energía, España. Primeramente se estudió la pirolisis por medio de balanza termogravimétrica "seca" para muestras de cada refinería y para dos distintos tamaños de partícula, en total 6 ensayos. Posteriormente se gasificaron las muestras por medio de una balanza termogravimétrica con horno de vapor, variando las rampas de calentamiento y el tamaño de las partículas,

para las muestras de cada refinería, en total 27 ensayos. Los resultados que se obtuvieron, junto con los análisis próximo y ulterior, servirán para determinar la cinética de la reacción tanto de pirolisis como de gasificación para distintos tamaños de partícula (Figura 3.5).



Figura 3.1.5. Termogramas de la gasificación de las tres muestras de coque a 6.5 K/min y tamaños de partícula entre 50 y 100 micras.

3.1.5.2 Medición de temperatura en reactores termoquímicos

La medición de la temperatura en el interior de los reactores termoquímicos que emplean radiación solar altamente concentrada, es fundamental para determinar las cinéticas de reacción de los procesos. Habitualmente estas mediciones se realizan con termopares. Sin embargo, estas mediciones en la mayoría de los casos son inferiores a las temperaturas de los materiales a ser estudiados, debido a que solo se puede medir ciertos puntos del interior donde la radiación concentrada no incide. Por otra parte, las mediciones de contacto se dificultan porque los intervalos de temperaturas en los que ocurren la mayor parte de los procesos termoquímicos son comúnmente superiores a los 1500 °C [Marzo et al., 2014], mientras que la máxima temperatura que se puede registrar con un termopar (tipo B, Pt-Rh) es de alrededor de 1800 °C.

Con técnicas de medición de temperaturas sin contacto, a través de pirómetros y/o cámaras termográficas, se pueden llegar a medir temperaturas hasta de 3000 °C. Sin embargo, este tipo de mediciones se dificulta cuando los reactores solares se encuentran en presencia de un flujo radiativo concentrado, debido a que una fracción de la energía del mismo flujo incidente es reflejada por la superficie analizada, de modo que los sensores registran la radiosidad de las superficies, con lo que se sobrestima la medición dependiendo de los

niveles de emisividad, reflectividad y trasmisividad de los cuerpos a través de los cuáles deba cruzar la radiación en el arreglo experimental [Wong et al., 2010].

En la figura 3.1.6 se muestra una fotografía de la operación del reactor RR-HoSIER en la zona focal, como se puede observar, enfrente del reactor se encuentra la cámara termográfica, la cual observa el interior de la cavidad del reactor.



Figura 3.1.6. Esquema experimental para pruebas de óxidos metálicos con el RR-HoSIER.

Para las pruebas del RR-HoSIER a una temperatura de 800 °C se obtuvieron mediciones de temperatura con termopares, simultáneamente que se obtuvieron imágenes termográficas. Las cuales se presentan a continuación, hay que mencionar que se buscó mantener una temperatura en el interior del reactor de 800 °C. Se grabó un video con la cámara termográfica en un tiempo de aproximadamente 3.3 minutos, esto se logró configurando la cámara para una captura de 3000 frames en un tiempo de 200 segundos.



a) ITG con un 22% de apertura del atenuador



b) ITG a un 0% de apertura del atenuador



c) ITG despues de un minuto del cierre del atenuador.

Figura 3.1.7. Imágenes termográficas captadas por la cámara termográfica FLIR con un margen de medición de 1200 a 800 °C

En la figura 3.1.8, se presentan las temperaturas T1, T2 y T3 corresponden a los termopares colocados en las paredes del crisol, se observa como T2 alcanza el estado estable a los 820 °C y con la línea roja vertical muestra el momento del cierre del atenuador (2,636 s). Las líneas rojas punteadas de 600 °C y 800 °C sirven para referenciar los márgenes de medida de interés en que operó la cámara termográfica. También se incluyen las curvas de la temperatura del fondo del crisol en un periodo de 3.3 minutos como se explicó anteriormente.



Figura 3.1.8. Resultados experimentales para temperatura del reactor a 800°C.

En la figura 3.1.9. se muestra la temperatura del fondo del crisol que observa la cámara termográfica en sus márgenes de medida 4 y 3, así como las temperaturas T1, T2 y T3, en este grafico se observa que en ese intervalo de tiempo se mantienen muy próximas a las temperaturas registradas por la cámara termográfica con las medidas con los tres termopares.



Figura 3.1.9. Mediciones de temperaturas con las imágenes termográficas y con termopares.

3.1.6 Diseño y construcción de reactores solares

Se construyeron dos reactores diferentes para llevar a cabo los procesos seleccionados en el HOSIER: una Cámara Inerte Esférica de Vidrio Pyrex® (CIEVIP) y un reactor rotatorio para la reducción de óxidos metálicos no volátiles. A continuación se explica cada uno de ellos.

3.1.6.1 Cámara Inerte Esférica de Vidrio Pyrex

La Cámara Inerte Esférica de Vidrio Pyrex® (CIEVIP) es un reactor donde se pueden llevar a cabo experimentos a alta temperatura en ausencia de oxígeno, con una atmósfera de gases inertes, oxidantes o reductoras. Este reactor consiste en una esfera de vidrio Pyrex®, que es un material inerte a varios químicos, además de que resiste temperaturas altas y presenta muy buena transmitancia a la radiación solar. La base de la esfera es una estructura circular de acero inoxidable que tiene varias conexiones para hacer vacío, para colocar sensores de vacío, para termopares y para inyectar diversos gases (ver Fig. 3.1.10). Con este reactor se trabajo en la síntesis de WO₃ y SiC con energía solar concentrada.



Figura 3.1.10. Fotografía de la CIEViP.

3.1.6.2 Reactor Rotatorio

La particularidad del diseño del Reactor Rotativo del HoSIER (RR-HoSIER) consiste en hacer girar el recipiente donde se alojan las especies químicas, este caso los óxidos metálicos y sea este mismo recipiente el único elemento del reactor que reciba el flujo de radiación concentrada del HoSIER. El RR-HoSIER cuenta con conexiones para gases hacia su interior, estos pueden ser de gas (Argón) para mantener la cavidad libre de óxigeno y estudiar reacciones químicas sin oxidación, ó se puede suministrar aire sintético o comprimido para estudiar procesos de oxidación, o ciclos combinados de reducción oxidación. Al girar el recipiente (crisol) las partículas expuestas a la radiación se encuentran volcando constantemente unas contra otras lo que facilita la liberación de oxígeno en el momento que se alcanza la temperatura de reducción. Tanto el cuerpo del reactor, la ventana y tapa del reactor se fijan a la estructura de la mesa de ensayos y se hace girar únicamente el pequeño crisol que confina las partículas y que es soportado por un eje giratorio formado por

un tubo, en la ilustración 3 se muestra una fotografía de equipo. Para el diseño del reactor además de estas consideraciones se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Potencia concentrada del HoSIER la cual puede ser regulada hasta 10 kWt
- Radiación pico de 1500 soles
- Temperatura deseada en la muestra de 1600 °C
- Ángulo de apertura de la ventana del reactor de 46° con respecto al eje focal.
- Presión en el interior del reactor por encima de la atmosférica
- Flujo de gas de arrastre mayor a 9 lt/m



Figura 3.1.11. Reactor rotativo RR-HoSIER, para el estudio de ciclos termoquímicos.

Una de las dificultades técnicas que plantea el reactor rotativo es la medición de la temperatura de la muestra, debido a que esta se encuentra permanentemente en movimiento. Para ello se proponen dos métodos de medición, el primero de contacto y el segundo de no contacto tan de forma lateral del crisol, así como de forma frontal a través de la ventana.

El método de medición de contacto, se realizará a través de un adquisidor de temperatura con conexión WiFi, el cual se acopla al eje de giro del crisol y a través de un pasamuros, por donde entran los termopares en el interior del eje de giro hueco y se llevan hasta las paredes exteriores (o interiores en algunos casos) del propio crisol. Lamentablemente con este sistema solo se puede contar con cuatro lecturas de termopares a lo sumo que requieren ser de diámetros muy pequeños debido a que tienen que obstruir lo menos posible en la salida del crisol de diámetro 10 mm.



Fig. 3.1.12. Sistemas de medición de temperaturas del reactor rotativo.

Por otra parte, se propone hacer la medición de la temperatura del crisol de forma lateral a través de una ventana de cuarzo, como se observa en la Figura 3.1.13. Esto es debido a que el crisol es de alúmina de alta densidad, la cual posee una difusividad térmica elevada y se podría considerar que la temperatura de la pared exterior es muy próxima a la temperatura de la pared interior así mismo de las partículas que lo alojan. Por lo tanto, se puede realizar la medición de la temperatura del crisol a través de dicha mirilla con un pirómetro de un rango alto de temperaturas. Con ello se puede tener el monitoreo de la temperatura del crisol y por tanto en de la muestra.



Fig. 3.1.13. Medición de temperatura en la pared del crisol de forma lateral con un pirómetro.

La cavidad del reactor se instrumentara con una serie de termopares tipo K para conocer las temperaturas en diferentes puntos estratégicos del reactor como son, la ventana, el diafragma de alúmina, el interior de la propia cavidad del reactor y la zona donde se encuentran los rodamientos de grafito. Por último, En el eje óptico del horno solar, se colocó a una distancia de dos metros la cámara termográfica FLIR SC2500, para poder hacer la comparativa de mediciones de temperatura por métodos indirectos, y su relación con la medición de los termopares en el interior del crisol (ver figura 3.1.14).



Figura 3.1.14. Esquema experimental para pruebas de óxidos metálicos con el RR-HoSIER.

3.1.6.3 Reactor para gasificación de coque de petróleo

Como punto de partida se hizo una revisión bibliográfica de reactores solares para la gasificación de materiales carbonosos. De dicha revisión podemos resumir que existen dos clasificaciones de los tipos de reactores solares. Una se basa en la forma de irradiar la muestra. Así, se tienen reactores de radiación directa en los cuales la muestra es irradiada directamente, y los reactores de radiación indirecta, figura 3.1.15a). En éstos últimos la radiación primero índice sobre algún material que transmitirá el calor a la muestra por medio de convección, conducción y/o radiación. La otra clasificación se basa en la manera de alimentar al reactor. En este sentido encontraremos los reactores de lecho fijo, lecho fluidizado y lecho arrastrado, figura 3.1.15b). En el primer caso, la materia prima se alimenta desde el principio mientras se va consumiendo debido a la reacción. En el segundo caso, la materia se pulveriza a tamaños de partícula tal que permiten que el material sólido se comporte como fluido debido un flujo de gas, ya sea inerte o reactivo, que hace suspender a las partículas dentro del reactor. En el tercer caso, la materia prima se pulveriza a tamaños de partícula tal que permiten que el material solido se comporte como fluido debido un flujo de gas, ya sea inerte o reactivo, que hace suspender a las partículas dentro del reactor. En el tercer caso, la materia prima se pulveriza a tamaños de partícula más finas aún para que un gas, ya sea reactivo o inerte, arrastre a estas partículas desde un depósito hacia el reactor donde se lleva a cabo la reacción.

Así, se pueden tener por ejemplo, reactores de irradiación directa de lecho fijo o, reactores de irradiacción indirecta de lecho arrastrado. Incluso existen reactores híbridos que mezclan varias de las características mencionadas. Cada concepto tiene sus ventajas y desventajas que deberán ser evaluadas para un proceso particular. En el caso de la gasificación de materiales carbonosos existen varios reactores de escala laboratorio para tal fin. Por ejemplo, Piatkowski, et. al. (2009) presenta un reactor de lecho fijo de irradiación indirecta el cual gasificaron varios materiales carbonosos consiguiendo eficiencias de conversión de energía entre 15.9% y 29.0% dependiendo de del material y las condiciones de operación. Como exponente de un reactor de irradiación directa de lecho fluidizado tenemos el desarrollado por Kodama, et. al. (2008) con el cual gasifican con CO2, coque de carbón. Las eficiencias alcanzadas fueron de 12% con respecto a la conversión de carbón. Un último ejemplo muy importante es el reactor es de irradiación directa y de lecho arrastrado con eficiencias de conversión de energía de 4.8% a 9.4% y de 9.9% a 20.0% si se recupera el calor sensible para la generación de vapor. En la actualidad hay esfuerzos por mejorar estos diseños como lo evidencian Kruesi, et. al. (2014) al presentar un reactor de lecho arrastrado de radiación indirecta con la novedad de contar con dos secciones. Una de flujo rápido para la pirolisis de la materia prima, y otro con un

obstáculo que hace más lento el flujo, aumentando el tiempo de residencia de la materia prima y permitiendo la gasificación completa de la misma. COn este reactor, los autores consiguen eficiencias de conversión de carbón del 65% al 84%.



Figura 3.1.15. Clasificación de los reactores solarees según a) la forma de irradiar y b) el modo de alimentación.

3.1.7 Desarrollo de la ingeniería de procesos (análisis exergético, simulación dinámica, evaluación tecno-económica)

En esta actividad todavía no se pueden reportar avances, pero se encuentra en proceso a partir de los datos generados con los reactores construidos y las pruebas termogravimétricas que se están realizando.

3.1.8 Implementación y puesta en marcha de los procesos

Como se había mencionado anteriormente se estudiaron dos diferentes procesos termoquímicos para la producción de vectores energéticos (ciclo termoquímico del óxido de cobre, y gasificación de coque de petróleo). Por otro lado se pusieron en marcha procesos para la síntesis de dos materiales de alto valor agregado con energía solar concentrada: WO₃ y SiC. A continuación se describen cada uno de estos procesos.

3.1.8.1 Ciclo termoquímico de reducción del óxido de cobre (II) en atmósfera inerte (Argón)

El primer objetivo de la campaña experimental con el RR-HoSIER fue demostrar dicha reducción bajo condiciones solares y determinar las conversiones obtenidas. El segundo objetivo es comparar el comportamiento de la reacción cuando se trabaja en modo estático y en modo rotativo.

La Figura 3.1.16 muestra una gráfica de la concentración de oxígeno, la temperatura medida en la zona posterior de la muestra y la potencia total incidente en el reactor, resultado de considerar el DNI en cada instante, el porcentaje de apertura del obturador y el factor de horno previamente determinado. Es un ensayo estático en el que la temperatura de referencia se mide en la zona posterior de la muestra.



Figura 3.1.16. Curva de liberación de oxígeno en ensayo estático, temperatura de referencia medida en la zona posterior de la muestra y potencia incidente.

Se observa una relación entre la potencia suministrada a la muestra y la liberación de oxígeno que se produce. Esto mismo también se observa en la Figura 3.1.17, en este caso, también ser trata de un ensayo en estático, pero la temperatura se mide, mediante dos termopares, en la zona externa de la cámara de reacción (crisol).



Figura 3.1.17. Curva de liberación de oxígeno en ensayo estático, temperatura de referencia medida en la zona externa de la cámara de reacción y potencia incidente. El ensayo resulta con el material fundido.

3.1.8.2 Gasificación de coque de petróleo

Se realizaron ensayos de pirolisis y gasificación en reactor solar propiedad del IMDEA, en colaboración con investigadores de esta institución, para comparar con los resultados de los estudios en balanza termogravimétrica y conocer el comportamiento de la gasificación en reactores a escala de laboratorio. Las pruebas anteriores comprendieron 9 ensayos de pirolisis con tres tamaños de partícula para las tres distintas muestras de coque. El mismo número de ensayos y bajo las mismos parámetros, comprendieron las pruebas de gasificación. El dispositivo del IMDEA es un concepto de reactor vertical irradiado directamente y trabaja en batch (Figuras 3.1.18 y 3.1.19). Por otra parte, en el PSI, Suiza se llevaron a cabo ensayos de gasificación con las tres muestras de coque en un concepto de reactor vertical de doble cavidad de radiación indirecta (Figura 3.1.20). De estos experimentos de gasificación en reactor se pretende complementar los estudios de cinética de reacción ahora, en reactor solar, así como determinar las condiciones de operación de cada reactor y comparar sus desempeños. Mientras que de los estudios de gasificación en el reactor del PSI, además, sirvieron para comparar la gasificación de otros materiales como el carbón vegetal y así determinar la viabilidad del coque de petróleo como materia prima para la producción de gas de síntesis.



Figura 3.1.18. Dispositivo experimental para la pirolisis y gasificación de PETCOMEX, propiedad del IMDEA.

Las tareas antes mencionadas son parte del proyecto de tesis doctoral del estudiante Alejandro Bautista Orozco bajo el título "Diseño construcción y evaluación de un reactor solar para la gasificación térmica por vapor de coque de petróleo nacional" que aún no ha concluido.



Figura 3.1.19. Esquema del reactor solar utilizado para la pirolisis y gasificación solares de PETCOMEX, propiedad del IMDEA.





3.1.8.3 Síntesis de WO₃

En la síntesis del WO₃ realizada en el horno solar del IER se propuso un método simple en el que las emisiones de CO₂ son bajas y no hay desechos contaminantes. La síntesis se llevo a cabo en la CIEViP; en ella se colocaron electrodos de tungsteno puro, formado una superficie plana de 17.8 cm de largo y 2.4 cm de altura. Esta superficie se coloca en la zona focal del concentrador y en el centro de la cámara de reacción En el fondo de la cámara de reacción se colocó una bomba de vacío con el objeto de controlar la presión y para asegurar un flujo continuo del gas al interior de la cámara. También por el fondo de la cámara se inyectaron

los diversos gases utilizados: Argón y O₂, o una mezcla de ambos. La figura 5 muestra una imagen del montaje experimental en el horno solar.



Figura 3.1.21. Esquema y fotografía del montaje experimental en el HoSIER.

La reacción general de la oxidación del tungsteno es la siguiente:

 $2 W + 3O_2 \rightarrow 2 WO_3$

Esta reacción se estudió para tres diferentes temperaturas: 600 °C, 800 °C y 1000 °C y para cada temperatura se analizaron 3 diferentes fracciones molares de O₂: 0.33, 0.41 y 1. Los resultados mostraron que a bajas temperaturas (600 °C) en la zona que se irradia directamente con energía solar concentrada se forma una ligera capa amarilla de óxido de tungsteno (VI) y alrededor de este capa se forma una capa azul, que corresponde a un óxido no-estequiométrico. Revisando la literatura se encontró que la capa azul es una capa protectora del tungsteno, mientras que la amarilla es una capa corrosiva. A esta temperatura la oxidación ocurre más rápidamente cuando se tiene una atmósfera oxidante.

Al incrementar la temperatura a 800 °C, la oxidación ocurre más rápido, aunque se tengan concentraciones bajas de O₂. En estos experimentos se obtuvieron muchos cristales de WO₃ con formas particulares, ver figura 3.1.22.

En general se encontró que la temperatura afecta ligeramente la fase cristalina del WO₃, mientras que a una temperatura constante, la concentración molar de oxígeno no afecta la transformación de la fase cristalina del WO₃. En todos los experimentos se encontró WO₃ triclínico, concluyendo que esta es la fase cristalina más estable.





3.1.8.4 Síntesis de SiC

En la síntesis de SiC se usó el HoSIER para proveer el calor de la reacción. Esta manera de sintetizar el SiC es una alternativa en el desarrollo de procesos para la síntesis de materiales que tiene el objeto promover fuentes de energía no convencionales con bajas emisiones de CO₂. En este caso el SiC se sintetizo con el método de reducción carbotérmica usando como precursor del silicio a la sílice y como precursor del carbón a la sacarosa. La síntesis se llevo a cabo en la cámara de reacción CIEViP en una atmósfera controlada (N₂ y Ar).

El proceso de la síntesis del SiC consistió en 5 etapas, donde las dos últimas se llevaron a cabo en el HoSIER. En el primer paso se llevo a cabo la síntesis de la sílice a través de un proceso sol-gel. En este paso se mezclo TEOS y etanol con HNO₃. Posteriormente esta mezcla se agitó y seco a temperatura ambiente para finalmente obtener el SiO₂. La segunda etapa consistió en la mezcla de la sílice sintetizada con sucrosa, ácido sulfúrico y agua destilada. En un tercer paso esta mezcla se seca a 100 °C por 6 horas y otras 6 horas a 160 °C. Finalmente la cuarta y quinta etapa consisten en la síntesis de nanocomposito SiO₂/C y SiC.

El nanocomposito SiO₂/C se sintetizó usando la mezcla del paso 3. Está mezcla se colocó en un disco de alúmina pura, que se colocó al centro de la CIEViP (Figura 7c). La reacción se llevo a cabo en una atmósfera de nitrógeno a una temperatura de 700 °C, la cual fue alcanzada al irradiar directamente con energía solar concentrada a la muestra.

La síntesis del SiC se llevo a cabo utilizando el nanocomposito SiO₂/C. En esta síntesis se utilizó un disco y un crisol de grafito. La reacción se realizó en una atmósfera de argón, a una temperatura de 1500 °C por dos horas (Figura 3.1.23).



Figura 3.1.23. Montaje experimental de la síntesis de SiC. (c) Síntesis del nanocomposito SiO₂/C; (d) síntesis del SiC y (e) imagen de la síntesis del SiC irradiada directamente con energía solar concentrada.

Los resultados mostraron que se obtuvo un nanocomposito SiO₂/C puro. Este carbón amorfo es más reactivo que materiales cristalinos como el grafito. Con respecto ala síntesis del SiC, la caracterización indico que se obtuvo principalmente β -SiC con una pequeña cantidad de α -SiC.

Los resultados del análisis térmico (TGA/DSC) mostraron que el nanocomposito tiene un carbón más reactivo y es térmicamente estable. Este análisis también mostró que el SiC sintetizado puede ser considerado como un soporte estable. En general estos resultados mostraron que es posible sintetizar SiC con energía solar concentrada y con menos emisiones de CO₂ que los métodos convencionales.

3.1.8.5 Gas de síntesis a partir de pirolisis de PETs

El CIATEQ, A. C., desarrolló un prototipo de gasificación aplicado a los residuos plásticos, tales como tereftalato de polietileno (PET), de los cuales se obtiene gas de síntesis (CO, H₂ y CH₄) a través de un proceso pirólitico a 800 °C en el interior de un reactor. El prototipo desarrollado por el CIATEQ inicialmente fue probado con gas LP y resistencia eléctrica hasta alcanzar en la superficie interna del reactor una temperatura de 800°. La tercer fuente térmica que se propuso para el proceso de gasificación con este mismo reactor fue la energía solar concentrada a una temperatura de operación de entre 650°C y 800°C. Para ello se diseñó un receptor de cavidad cuadrada, diseñado y fabricado por el mismo CIATEQ y probado el HoSIER (www.concentracionsolar.org.mx). Por cuestiones de operación del mismo HoSIER se fracciono las pruebas del gasificador en dos partes, la primera en la caracterización de los gases obtenidos con resistencias, así como su comportamiento térmico. En una segunda etapa solo se caracterizó la parte térmica con el receptor del CIATEQ en el HoSIER consiguiendo las mismas rampas de calentamiento que se obtuvieron con las resistencias eléctricas.

El diseño experimental consistió en dos pruebas, la primera realizar la gasificación del PET a una temperatura de 800 °C fuera del HoSIER, con análisis en línea de los gases producción en el reactor (CO, CO₂, CH₄ y O₂), así como toma de muestras de los gases de salida para su análisis con cromatografía de gases identificando (H₂, CO y CH₄). La segunda serie de experimentos consistió en la caracterización térmica del receptor de cavidad del gasificador, reproduciendo las mismas curvas de calentamiento que se obtuvieron con las resistencias eléctricas, pero ahora con la radiación concentrada en el HoSIER.

En la figura 3.1.24 se muestra un esquema general de los principales elementos del HoSIER. También se cuenta con una mesa de trabajo con movimiento en tres ejes (X,Y,Z), el cual nos permite soportar los

dispositivos experimentales y controlar la posición de los mismos, en este caso en la mesa de trabajo se colocó el reactor de gasificación de PET.



Figura 3.1.24. Esquemas del montaje experimental del gasificador del CIATEQ en el HoSIER

Antes de colocar el reactor en la mesa de trabajo del HoSIER, se colocaron termopares de tipo K en diferentes puntos del receptor, estas mediciones de temperatura nos ayudaran para monitorear el comportamiento térmico del receptor a lo largo de la campaña experimental. En la figura 3.1.25 se muestra una secuencia de la colocación de termopares. En el receptor se colocaron seis termopares. También se muestra un esquema en el que se ilustra los lugares donde fueron colocados dichos termopares. En el resto del reactor también se colocaron termopares para monitorear el comportamiento térmico en puntos de interés, principalmente la cámara de reacción.



Figura 3.1.25. Instrumentación del receptor del gasificador del CIATEQ

De los cuatro ensayos de gasificación, el primer ensayo no se tomaron mediciones en línea de la salida de gases. Sin embargo, para el segundo y tercer ensayo se miraron en la pantalla de los analizadores los valores de producción de gases, donde en el segundo ensayo se obtuvo un 5.3% de CO + CH4, mientras que en el tercer ensayo se obtuvo un 30.9%. Para el caso del cuarto ensayo donde si se hicieron mediciones en línea, la concentración de estos gases supero 48.8% sin contar las concentraciones de H₂ las cuales se midieron a través de cromatografía. La figura 3.1.26 muestra el comportamiento de la producción de gases de síntesis del cuarto ensayo, en este se observa que se obtuvo un primer estado permanente con en 48.8% de gas de

síntesis sin contar la producción de hidrogeno, sin embargo, debido a una fluctuación en el suministro de oxígeno, se observa que hay un incrementó en el CO y CH₄ y se disminuye la cantidad de CO₂.



Figura 3.1.26. Generación de gas de síntesis en el gasificador de PET

Por otra parte, en las pruebas de caracterización térmica del gasificador en el HoSIER se reprodugeron las mismas curvas de temperaturas de operación del reactor, pero ahora con el receptor de cavidad ubicado en las zona focal. En la figura 3.1.27 se muestra las temperaturas en el interior del gasificador para la tercera prueba, así como la potencia concentrada incidente en el interior del receptor de cavidad. En este grafico se observa que se requieren 4000 segundos para llegar a la temperatura de 800 °C y se requiere de 9500 W para llegar a esta potencia. Se mantuvo esta temperatura por 2000 segundos, incrementando y disminuyendo la apertura del atenuador para mantener esta condición.



Figura 3.1.27. Grafica de temperaturas del gasificador en la 3º prueba en el HoSIER

Como resultado de esta campaña experimental se caracterizaron los productos obtenidos de la gasificación de PET, así como la viabilidad de esta tecnología acopada a un sistema de concentración solar. Al CIATEQ A.C. se le presentó un informe de resultados, a partir del cual han decidido continuar con una segunda campaña de experimentos para continuar con este desarrollo.

3.1.9 Elaboración de informes y publicaciones

Con el presente informe se concluye esta actividad. Cabe mencionar que las campañas experimentales descritas más arriba, las cuales se llevaron a cabo en el HoSIER ya han comenzado a generar publicaciones internacionales:

- Synthesis of silicon carbide using concentrated solar energy. L.G. Ceballos-Mendivil, R.E. Cabanillas-López, J.C. Tánori-Córdova, R. Murrieta-Yescas, C.A. Pérez-Rábago, H.I. Villafán-Vidales, C.A. Arancibia-Bulnes, C.A. Estrada. Solar Energy 116, 238–246 (2015).
- Solar production of WO3: a green approach. H.I. Villafán-Vidales, A. Jiménez-González, A. Bautista-Orozco, C.A. Arancibia-Bulnes, C.A. Estrada. Green Processing and Synthesis 4(3), 167-177 (2015).
- First experimental studies of solar redox reactions of copper oxides for thermochemical energy storage. E. Alonso, C. Pérez-Rábago, J. Licurgo, E. Fuentealba, C.A. Estrada. Solar Energy 115, 297-305 (2015).

Una lista completa de las publicaciones generadas en el proyecto se encuentra en el Apéndice A.1.

3.2 Campo Experimental de Torre Central

El Campo Experimental de Torre Central (CETOC) se viene desarrollando a partir del Campo de Prueba de Heliostatos, creado en la primera etapa del proyecto LACYQS. Las actividades desarrolladas en este subproyecto fueron las siguientes:

3.2.1 Construcción de un laboratorio de investigación anexo a la instalación preexistente de TC

El desarrollo futuro de actividades en el CETOC, para poder llevarse a cabo de manera óptima y para que el presente proyecto sirva de semilla a una gran cantidad de proyectos futuros, en esta y otras áreas de la energía solar, requiere de mayor espacio físico. Esto implica la ampliación del laboratorio actual, que tiene un área aproximada 63 m² distribuidos entre cuarto de control del campo, una pequeña sala de juntas (que viene funcionando como laboratorio de electrónica y taller mecánico), un baño y un vestidor (que funciona como bodega). En promedio, trabajan diariamente 5 personas en este espacio, pero en ocasiones pude llegar a tenerse hasta 12 a 15 personas. La idea es ampliar el espacio hasta un área de 470 m², incluyendo un laboratorio, un taller mecánico, un cuarto de armado, un almacén para equipos y un nuevo cuarto de control. Además de lo anterior un espacio de cubículos para poder trabajar en mejores condiciones.

Durante el período anterior se había el diseño arquitectónico de los nuevos espacios. Este si ilustra en las Fig. 3.2.1. En dicha figura se ilustra en rojo en rosado las áreas preexistentes, desarrolladas en el LACYQS I. Actualmente se ha concluido la licitación y ya comenzó la construcción de los espacios que se marcan en verde.



Figura 3.2.1. Planta del diseño propuesto para los nuevos espacios del CETOC, señalando en rojo el espacio preexistente y en verde el que se encuentra en licitación.

El resto de los espacios no podrán ser construidos por el momento por razones presupuestales de la Universidad de Sonora. Sin embargo, los espacios que se están construyendo permitirán solucionar mucha de la problemática actual. Al tratarse de cubículo permitirán desocupar de computadoras y mesas de trabajo para estudiantes los dos laboratorios con que se cuenta, con lo cual se tendrán condiciones de trabajo adecuadas.

3.2.2 Desarrollo de un prototipo mejorado de helióstato de 36 m2

Esta actividad se concluyó y reportó en el período anterior.

3.2.3 Implementación de la infraestructura y las metodologías para evaluar los prototipos de helióstatos desarrollados

Esta actividad se concluyó y reportó en el período anterior.

3.2.4 Prueba del prototipo desarrollado e Identificación de los puntos de mejora

Esta actividad se concluyó y reportó en el período anterior.

3.2.5 Mejora del diseño y construcción de 650 m2 de helióstatos

En este período se llevaron a cabo diseños mejorados tanto para la estructura de los helióstatos como para los cabezales de los mismos.

3.2.5.1 Mejora del diseño estructural de helióstatos

Durante el período reportado se llevó a un diseño mejorado de helióstato, buscando rigidizar más la estructura del prototipo previamente desarrollado. Esta necesidad quedó clara ante un accidente que ocurrió en el campo: el prototipo quedó estacionado en la noche en una posición de alrededor de 15° fuera de la horizontal y se presentaron fuertes vientos, con ráfagas superiores a 100 km/h, dando como resultado la deformación de la estructura.

Aunque los helióstatos deben quedar siempre estacionados en horizontal y de ser así no hubiera ocurrido el daño mencionado, este evento demostró la conveniencia de aumentar el factor de seguridad en las estructuras, haciéndolas más rígidas. El nuevo diseño fue sometido a un exhaustivo análisis estructural.

En la Fig. 3.2.2 se muestra la estructura analizada. Para el análisis se utilizó la herramienta SolidWorks Flow Simulation para la simulación de túnel de viento en la estructura del Heliostato. Se realiza el análisis bajo cuatro escenarios específicos mostrados en la Tabla 3.2.1, la dirección del viento se considera a 0° (de frente al helióstato. La posición del seguidor varía como se muestra en Tabla 3.2.1 mostrando como referencia el ángulo α (ver Figura 3.2.2).

Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa



Figura 3.2.2. Estructura propuesta para el helióstato.

Tabla 3.2.1.	Escenarios	de estudio	para análisis	de vo	lumen finito
	_0001101100	40 0014410	para ananoio	40.10	

Escenario	Inclinación respecto a la horizontal (grados)	Velocidad del viento (m/s)
1	30	9
2	45	9
3	60	9
4	0	38

Según datos meteorológicos de la Plataforma Solar de Hermosillo, se establece como velocidad del viento límite para operación 9 m/s, velocidad establecida para escenarios 1, 2 y 3, así mismo la velocidad máxima alcanzada para posición de resguardo (Escenario 4), velocidad del viento de no operación, 38 m/s (ver Tabla 3.2.1).

La figura 3.2.3 muestra la estructura principal del heliostato, el modelo CAD es la entrada para el calcular la carga del viento. La carga producida por la acción del viento (ver Figura 3) se ve reflejada directamente en presión, la cual se distribuye en los espejos del heliostato. Tal distribución de presiones en los espejos se traduce en cargas que afectan directamente a la estructura del seguidor.



Figura 3.2.3. Estudio CFD en Heliostato (Escenario 2).

El estudio estático mediante análisis de elementos finitos (FEA) se realizó mediante SolidWorks Simulation. Para el presente estudio se asignó el material ASTM-36 para componentes metálicos y vidrio para los espejos. Las carga del viento fue importada desde SolidWorks Flow Simulation y se estableció como entrada al igual que la carga debida al peso de la estructura, la cual tiene una masa total de 908.72 kg, en la cual se contienen 32 espejos con una masa de 8.626 kg cada uno. El procesamiento para lograr obtener resultados del estudio del estático es muchas veces muy crítico, por lo cual en el presente estudio se utilizaron distintos tipos de mallado: se mallaron los miembros estructurales con mallado de viga, los espejos se mallaron considerándolos como superficie de un espesor y los demás componentes mallaron considerándolos como sólidos. El uso de malla mixta ayuda a hacer el procesamiento del estudio más ligero.



Figura 3.2.4. Resultado de deformaciones para escenario 2.

En Figura 3.2.4 se muestra el resultado de deformaciones en escala de grises donde se puede observar que la mayor parte se presenta en la parte inferior. En la Tabla 3.2.2 se muestran las deformaciones máximas resultantes y en cada eje, además se incluye el factor de seguridad (FOS).

Escenario	U _R	Ux	UY	Uz	FOS
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
1	4.644	1.201	4.355	1.427	4.37
2	4.70	1.92	4.039	1.643	1.8
3	4.284	2.419	3.334	1.526	2.67
4	4.875	1.365	4.873	0.159	2.763

Tabla 3.2.2. Resultados extremos en deformación y FOS.

3.2.5.2 Desarrollo de cabezales

Dentro del esta segunda etapa del proyecto LACYQS se ha venido llevando a cabo un importante trabajo de desarrollo sobre cabezales para helióstatos. Se entiende por cabezal la transmisión mecánica para los movimientos de elevación y azimut. Hay que destacar que estos mecanismos son las componentes individuales más caras de los helióstatos y durante la primera etapa del proyecto fue necesario importarlos de los Estados Unidos, al no existir producción nacional. Los desarrollos realizados fueron:

La UNAM perfeccionó el diseño del cabezal "cero juego", que se había comenzado al final de la primera etapa del proyecto. Dicho cabezal ha sido probado en dos versiones en el CEToC, con muy buenos resultados. Es innovador, debido a su mecanismo de accionamiento basado en cables y actualmente se tiene elaborada la solicitud de patente de dicho sistema y se han iniciado los trámites correspondientes.

El segundo desarrollo ha sido llevado a cabo por la UNISON y consiste en un sistema integrado, a partir de componentes comerciales, por una corona tornillo-sinfín para el movimiento azimutal y un actuador lineal para elevación. Para el diseño del mecanismo cabezal se establecieron los siguientes requerimientos:

- 1. Mecanismo altazimutal con un movimiento mínimo de 90 grados en elevación y 240 grados en azimut, abatimiento con espejos hacia arriba.
- 2. Movimiento en azimut impulsado por tren de engranes con autobloqueo mecánico.
- 3. Movimiento en elevación impulsado por actuador lineal con autobloqueo mecánico.
- 4. El mecanismo debe ser creado para ser ensamblado en el diseño actual de estructura.
- 5. Prioridad en la reducción de costos, costo máximo de fabricación < \$100,000.00 por unidad.

Una vez establecida la estrategia de diseño, se procedió a proponer varias propuestas de diseño evaluando las siguientes dimensiones:

- 1. Resistencia a esfuerzos causados por el arrastre del viento.
- 2. Manufacturabilidad por proveedores locales.
- 3. Calidad y respaldo en los componentes electromecánicos por empresas reconocidas.

Se propuso un diseño de mecanismo cabezal instrumentado con actuadores eléctricos y sensores de posicionamiento con las siguientes características:



Grados de libertad:	2			
Tipo de movimiento:	Altazimutal			
Actuador de elevación:	Actuador lineal marca Joyce Dayton, modelo SA9024C900			
Actuador de azimut:	Slewdrive marca RTR, Modelo PE9A- 61-R-24H.77.35			
Declinación máxima:	90°			
Posición de abatimiento:	Espejos hacia arriba.			
Giro máximo azimut:	Sin límite mecánico.			
Características Eléctricas:	24 V@4 A (rated) Elevación 24 V @2.8 A (rated) Azimut			
Tiempo de abatimiento máximo:	5 min			
Sensores de posición:	Incremental (integrado) y Zero Absoluto (inductivo).			
Tipo de sensores:	Reed (30.5 pulsos/pulg) Elevación; Magnetico (28548 ppr) Azimut.			

Figura 3.2.5. Cabezal diseñado con sus características principales.

El proceso de manufactura propuesto para el mecanismo es de corte de placa A36 mediante waterjet para asegurar una precisión de > +/- .05 mm, y el de soldadura TIG reforzada. Solamente una de las piezas (el eje) a ser maquinado. Se recomienda además proceso de acabado galvanizado en frío con pintura base zinc de 95%.

Para el cálculo del mecanismo se realizaron simulaciones de túnel de viento basadas en software de elementos finitos, tomando los escenarios propuestos por Peterka y Derickson (1992). Las condiciones de operación fueron fijadas con un viento máximo de operación de 11 m/s, y un viento máximo de 39 m/s. Mediante el software Autodesk Flow Design se obtuvo una fuerza de arrastre de 7.3kN en condiciones de servicio, la cual se muestra a continuación:



Figura 3.2.6. Distribución de la presión del viento sobre el helióstato.

Una vez obtenidas las fuerzas de arrastre para los distintos escenarios, se procedió a introducirlos al análisis estructurar de elementos finitos del software Autodesk Inventor Suite, obteniendo los resultados que se muestran a continuación para las condiciones de operación:



Figura 3.2.7. Estrés y deformaciones sobre el cabezal.

El diseño propuesto soporta las cargas de operación causadas por el peso de la estructura y las cargas de viento, sin presentar deformaciones importantes en condiciones de operación. El diseño soporta también las cargas de viento en condiciones de hasta 39 m/s sin sobrepasar el esfuerzo de cedencia del material propuesto. El costo estimado del mecanismo completo es de alrededor de \$60,000.00, cumpliéndose así todas las consideraciones de diseño propuestas. El mecanismo está en proceso de aplicación de patente.
3.2.6 Diseño de comunicación inalámbrica para control de helióstatos.

Como se mencionó en un reporte anterior, se tiene actualmente instalados en el CETOC cuatro helióstatos que utilizan comunicación inalámbrica (3 Zig Bee y 1 Wi-Fi) y se ha encontrado que la comunicación con ellos es problemática. En el período anterior se estudiaron estos problemas dentro del campo de helióstatos utilizando analizadores de espectro (fijo y portátil), antenas (directivas y omnidireccionales) y transmisores, dentro del campo de helióstatos. Se encontró que la atenuación de la señal debido al obstáculo de los soportes metálicos es considerable, sobre todo cuando se encuentran estos en operación. Esto no es un problema menor, dado que los campos de helióstatos son conjuntos bastante densos de estructuras metálicas. A partir de las pruebas realizadas, se decidió reubicar las antenas de los helióstatos, solución que sin embargo resultará solo parcial, ya que no elimina el problema fundamental que ocurre en los campos de helióstatos que es la gran cantidad de atenuación e interferencia en las señales.



Figura 3.2.8. Nodo Inteligente basado en zigbee y microcontrolador.



Figura 3.2.9. Mediciones de potencia de la señal y de recepción de paquetes.

Tras la implementación de los nodos en los helióstatos, se llevaron a cabo pruebas para la validación de la comunicación, para poder determinar la viabilidad del uso de las tecnologías propuestas. Los resultados de

las pruebas fueron siempre positivos, superando las expectativas que se tenían sobre su funcionamiento dentro del campo de seguidores. Por lo tanto se logró validar la viabilidad y la eficiencia del sistema de comunicación inalámbrica, para ser implementado en la PSH, permitiendo la comunicación y control de los helióstatos. Las siguientes imágenes muestran algunos resultados así como la tecnología usada

Hasta este momento se ha logrado controlar dos motores con sensores de posición para dos heliostatos, el H10 y el H04 desde el cuarto de control, con lo cual se corrobora que es factible el enviar señales de control a dichos heliostatos y es viable integrar dos heliostatos en una red de sensores y nodos inteligentes.

3.2.7 Instalación de los helióstatos

Como se previó, se requería más tiempo para poder terminar esta actividad, para lo cual se hizo una solicitud de extensión del plazo del proyecto a CONACYT. Sin embargo esta solicitud no fue autorizada. Consecuentemente, no es posible reportar esta actividad como concluida todavía. Sin embargo, ya se han hecho todas las adquisiciones necesarias para instalar los helióstatos y las componentes se encuentran en proceso de entrega por los proveedores. En la Figura 3.2.10 se muestra fotografías de piezas de los helióstatos ya terminadas en los talleres de Pirámide Estructural del Golfo, S.A. de C.V.



Figura 3.2.10. Imágenes de piezas de los helióstatos en los talleres de Pirámide Estructural.

De acuerdo a lo anterior, se ha elaborado el siguiente calendario para la instalación:

	SEMANAS											
ACTIVIDADES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Montaje de pedestales en zapatas	х											
Cableado eléctrico y de datos	х	х	x									
Armado de estructuras		х	х	х	х	х						
Montaje de facetas y armado final			x	x	x	х	x					
Instrumentación					х	х	х	х	х	X	x	
Alineación y calibración de helióstatos									х	х	х	х
Caracterización óptica										х	х	х

Tabla 3.2.3. Calendarización de las actividades pendientes para instalación de helióstatos.

3.2.8 Alineación de helióstatos y caracterización óptica del campo

La alineación de helióstatos está programada para iniciar cuando se haya terminado su instalación, lo cual, de acuerdo al calendario planteado en la sección anterior ocurrirá a partir de julio.

3.2.9 Revisión literaria y estudio de los mecanismos de transferencia de calor asociados a la operación de los receptores térmicos en sistemas de TC.

3.2.9.1 Efecto de la geometría

En la Figura 3.2.10 se aprecian los casos de estudio. El caso (a) corresponde a un receptor de 2 m de largo y alto y 1 m de ancho, el (b) un receptor de 2 m de largo, 2.5 m de alto y 1 m de ancho, mientras que los casos (c) y (d) presentan las mismas dimensiones excepto que las paredes laterales tienen una segmentación formando un ángulo de 22.5° a la mitad de la distancia de anchura. Se llevó a cabo un estudio de independencia de malla con una temperatura de la pared caliente (T_h) de 1000 K (Ra=5.17x10¹¹), una emisividad de las paredes de 0.9 y el modelo de turbulencia rk_{Et}. De acuerdo a la Tabla 3.2.4 los casos (a), (b), y (c) presentaron una independencia con un número de nodos totales de 45000 y el (d) 36000 nodos totales. Se puede apreciar que el caso (a) presenta un valor de flujo de calor de 166.2 kW/m², el (b) 185.6 kW/m², el (c) 169.3 kW/m² y el (d) 189.7 kW/m² con lo cual es apreciable que la geometría para un receptor de cavidad que presenta la menor pérdida de calor, es el caso (a) por lo que será la configuración analizada a continuación.



Figura 3.2.10. Diferentes geometrías de receptor de cavidad consideradas en el presente estudio.

Tabla 3.2.4. Ind	ependencia de m	alla para los rece	ptores de cavidad.
------------------	-----------------	--------------------	--------------------

Malla	Flujo de Calor (W/m ²)	Diferencia (%)	Malla	Flujo de Calor (W/m ²)	Diferencia (%)		
Caso a				Caso c			
40x30x30	163,740		40x30x30	167,906			
45x30x30	166,082	1.43	45x30x30	169,599	1.0		
50x30x30	166,213	0.07	50x30x30	169,357	0.14		
55x30x30	166,092	0.07	55x30x30	170,364	0.59		
	Caso b		Caso d				
40x30x30	184,466		40x30x30	189,753			
45x30x30	184,763	0.16	45x30x30	190,904	0.60		
50x30x30	185,648	0.47	50x30x30	191,641	0.38		
55x30x30	187,121	0.79	55x30x30	192,405	0.39		

3.2.9.2 Efecto del ángulo de inclinación

La Figura 3.2.11 muestra el campo de temperatura del fluido cuando la temperatura de la pared caliente del receptor es T_h =800 K (Ra=3.69x10¹¹) con una inclinación de +15° (izquierda) y +30° (derecha), con una emisividad de 0.05. Para la inclinación de +15°, en el plano *z*=0.5 m se observa que el fluido tiene una temperatura de 350 K en la mayor parte del receptor. Se aprecia la capa límite térmica adyacente a la pared caliente con un espesor de alrededor de 2.5 cm. En la parte superior del receptor (y=1.7 m) el fluido tiene una temperatura de 400 a 450 K. Cuando el receptor tiene un ángulo de inclinación de +30° (Ra=3.69x10¹¹). Se puede apreciar que la capa limite térmica adyacente a la pared caliente tiene un grosor aproximado a los 2.5 cm y que el fluido sale de la cavidad con temperaturas entre 300 y 350 K. También se observan temperaturas

entre 400 a 550 K alrededor de la esquina superior izquierda del receptor. La forma de las isotermas se debe al movimiento oblicuo que realiza el fluido caliente al desplazarse hacia la parte superior de la abertura para salir del receptor.



Figura 3.2.11. Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a +15° (izquierda) y +30° (derecha) para Ra=3.69x10¹¹, en planos: a) *z*=0.5 m, b) *z*=1 m, c) *z*=1.5 m.

3.2.9.3 Efecto de la radiación térmica

La Figura 3.2.12. muestra el campo de temperatura del fluido cuando la temperatura de la pared caliente del receptor es T_h =800 K (Ra=3.69x10¹¹) con una inclinación de +15° (izquierda) y +30° (derecha), con una emisividad de 0.9. Para la inclinación de +15°, al comparar las gráficas 3a y 3c, se observa un comportamiento simétrico, con una capa limite térmica adyacente a la pared caliente que tiene un espesor menor a 2.5 cm. En la pared superior la temperatura alcanza valores entre 400 hasta 650 K. A una altura de *y*=0.5 m se aprecia una isoterma de 300 K que abarca una zona desde la abertura hasta *x*=0.2 m. En el plano *z*=1m correspondiente a la Figura 3b se aprecia la misma isoterma de 300 K en la abertura excepto que alcanza hasta una profundidad de 0.8 m en el eje horizontal. En la pared inferior se presenta una distribución de temperatura desde 350 hasta 600 K.



Figura 3.2.12. Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad con paredes negras (ε=0.9), inclinado a +15° (izquierda) y +30° (derecha), para Ra=3.69x10¹¹ en planos: a) z=0.5 m, b) z=1 m, c) z=1.5 m.

Cuando la inclinación se cambia a +30°, los planos z=0.5m y z=1.5m presentan simetría. En la pared superior se aprecian siete isotermas que van desde 350 hasta 700 K, así como una isoterma de 300 K que va desde la abertura hasta x=0.5m. En la pared inferior la temperatura va desde 300 hasta 600 K. Para el plano z=1m un área considerable se encuentra a 350 K. La capa limite térmica adyacente a la pared caliente tiene un grosor inferior a los 2.5 cm.

En la Tabla 3.2.5. se presenta los resultados del coeficiente de transferencia de calor para el receptor de cavidad. Para una emisividad en las paredes de 0.05, el valor mínimo corresponde al caso +30° y Ra=2.21x10¹¹ con 18.4 W/m² K y el máximo para el caso +15° y Ra=5.17x10¹¹ con 36.1 W/m² K. Cuando las paredes del receptor tienen una emisividad de 0.9, los coeficientes de transferencia de calor se incrementan sustancialmente. Para el caso +30° y Ra=2.21x10¹¹, el coeficiente de transferencia de calor es igual a 78.8 W/m² K, mientras que para +30° y Ra=2.21x10¹¹ es de 238.8 W/m² K, lo que representa aumentos de 428% y 661%, respectivamente. La Tabla 3.2.6 presenta los resultados del número de Nusselt, donde el mínimo para ε =0.05 lo presentó el caso +30° y Ra=2.21x10¹¹ con un valor de 634 y el máximo lo presentó el caso +15° y Ra=5.17x10¹¹ con 1172. Al aumentar la emisividad a 0.9 el aumento porcentual fue del 413% para el valor mínimo y 626% para el valor máximo presentándose valores de 2620 y 7339, respectivamente.

En la Tabla 3.2.7. se presenta el porcentaje de contribución del intercambio radiativo al flujo de calor total (pérdidas de calor). El valor mínimo fue de 20% y corresponde al caso con Ra=2.21x10¹¹, +15° y ε =0.05. El máximo fue de 91% cuando ε =0.9, Ra=5.17x10¹¹ y +30°.

Inclinación	Ra=2.21x10 ¹¹	Ra=3.69x10 ¹¹	Ra=5.17x10 ¹¹						
	ε=0.05								
+15°	20.7	27.8	36.1						
+30°	18.4	24.7	33.4						
	e=0.9								
+15°	82.7	144.9	238.8						
+30°	78.8	141.5	233.5						

Tabla 3.2.5. Coeficiente de transferencia de calor (W/m² K) en receptor de cavidad.

Tabla 3.2.6. Número de Nusselt en receptor de cavidad.

Inclinación	Ra=2.21x10 ¹¹	Ra=3.69x10 ¹¹	Ra=5.17x10 ¹¹				
ε=0.05							
+15°	727	935	1172				
+30°	634	812	1041				
ε=0.9							
+15°	2835	4739	7339				
+30°	2620	4351	6683				

Tabla 3.2.7. Porcentaje de contribución del intercambio radiativo en el receptor de cavidad.

Inclinación	Ra=2.21x10 ¹¹	Ra=3.69x10 ¹¹	Ra=5.17x10 ¹¹					
ε=0.05								
+15°	20%	31%	42%					
+30°	23%	35%	46%					
	ε=0.9							
+15°	75%	85%	90%					
+30°	78%	86%	91%					

3.2.9.4 Elección del tipo de intercambiador a desarrollar y diseño del mismo

Parte de las actividades de diseño del receptor se reportaron en el período anterior. Cabe mencionar que además de diseñar el calorímetro propiamente dicho, fue necesario también considerar los sistemas accesorios, como sistema hidráulico para suministro de agua, sistema de tratamiento de agua y torre de enfriamiento,

En la Figura 3.2.13 se tiene una vista isométrica del prototipo de receptor-calorímetro, propuesto para evaluar la potencia térmica de un conjunto de heliostatos. Consiste en un recinto cerrado de forma paralelepípedo con una altura y profundidad de 1.25 m, donde se tienen 4 tuberías de entrada por el centro y 4 tuberías de salida de fluido refrigerante por los extremos de un diámetro de 1.5 pulgadas. Con el fin de aumentar el área donde será incidida la radiación concentrada para mediante la técnica de calorimetría de agua fría será medida la cantidad de energía proporcionada por un heliostato o, un conjunto de ellos se le incorporó un arreglo de

aletas de transferencia de calor. El número total de aletas es de 1064 de 3/8 de pulgada de diámetro y separadas 34 mm.



Figura 3.2.13. Prototipo de receptor-calorímetro.

El aumento del área al considerar las aletas es de 283% pasando de 1.56 m² a 4.42 m². En la Tabla 6 se tiene el resultado del análisis de independencia de malla el cual fue llevado a cabo con una velocidad de entrada del fluido de 1 m/s en cada tubería y una diferencia de temperatura de 80 K donde el flujo total fue de 440.1 kW/m² para un tamaño de malla de 8x30x30 dando un total de 7200 nodos computacionales.

La Tabla 3.2.8 muestra los resultados de transferencia de calor donde la variación de velocidad de entrada del fluido desde 0.15 hasta 1 m/s da un flujo de calor total retirado de 77.2 y 443.4 kW/m², respectivamente. Del cual las aletas retiran un 89% y el resto para el área de la pared.

Velocidad	Flujo de calor	Flujo de calor en	Flujo de calor
(m/s)	en pared (kW/m ²)	aletas (kW/m ²)	total (kW/m ²)
0.15	8.3	68.9	77.2
0.30	12.4	111.8	124.2
0.65	23.9	170.1	194.1
1.00	49.1	394.3	443.4

Tabla 3.2.8. Resultados de transferencia de calor en receptor-calorímetro.

En la Figura 3.2.14 los contornos de temperatura muestran una buena distribución de la misma como lo indica el inciso (a) donde en las inmediaciones de las tuberías de entrada se presentan temperaturas de 293 K y el resto del prototipo tiene una temperatura de 315 K como máxima. En los incisos (b) y (c), los planos en los puntos medios de altura y profundidad muestran una distribución de temperatura donde I mínimo está en las zonas inmediatas a las tuberías de entrada y sube hasta tener valores de 312 K.



Por último, en la Figura 3.2.15 se presenta la capacidad de evaluación de heliostatos usando el concepto de receptor-calorímetro, considerando una potencia proporcionada de 32.4 kW/m², se tiene que con una velocidad de flujo de 0.15 m/s se podrían evaluar 2 heliostatos y subiendo el flujo hasta 1 m/s esta capacidad aumenta a 14 heliostatos. La línea punteada corresponde al ajuste de datos con un modelo exponencial donde la r² da un valor de 0.9805. Por lo que, bajo las condiciones señaladas, el concepto de receptor-calorímetro se presenta como una opción funcional para la caracterización térmica de heliostatos.



Figura 3.2.15. Capacidad de remoción de calor del receptor-calorímetro en función de heliostatos.

3.2.9.5 Construcción del receptor

Con base en los resultados teóricos descritos previamente, se procedió a al diseño y construcción del sistema receptor calorímetro para el campo experimental de torre central en la Universidad de Sonora. En la Figura 3.2.16 se muestran los planos de uno de los 4 calorímetros que se construyeron para la evaluación de la potencia térmica aportada por los helióstatos.



Figura 3.2.16. Plano de calorímetro de 1.25 m x 1.25 m x 0.1 m.

En la Figura 3.2.17. se presenta la imagen de uno de los calorímetros en su proceso de construcción, en donde se puede apreciar el sistema de aletas de aluminio que permitiría la remoción de la elevada potencia térmica aportada por el campo de helióstatos.

En forma complementaria al arreglo de cuatro calorímetros, se formó un sistema cuasi-cerrado de circulación del fluido térmico (agua). El arreglo del sistema hidráulico se presenta en la Figura 3.2.18. La torre de enfriamiento que se instaló en un nivel inferior al correspondiente a los calorímetros, se muestra en la Figura 13.2.19, donde también se muestra el arreglo construido para medir en forma precisa el flujo de agua total suministrada al sistema de calorímetros y también el suministrado en forma individual. En la Figura 3.2.20 se muestra el conjunto de tanques de almacenamiento de agua, el sistema de osmosis inversa para el tratamiento del agua alimentada y las bombas para la circulación del fluido.



Figura 3.2.17. Avance en la construcción de uno de los calorímetros.



Figura 3.2.18. Diagrama del sistema hidráulico.



Figura 3.2.19. Torre de enfriamiento instalada en el cuarto de máquinas de la torre (izquierda) y sistema de suministro y medición del flujo de agua a los calorímetros, instalado en la cabina de experimentación de la torre (derecha).



Figura 3.2.20. Sistema de tratamiento y almacenamiento de agua instalado en el cuarto de máquinas de la torre.

La estructura que se instalará en la torre para la colocación de los receptores-calorímetros se muestra en la Figura 3.2.21. La Figura 3.2.22 presenta el avance en la construcción de la estructura de soporte, la cual se espera quede terminada y colocada en Junio del 2015.



Figura 3.2.21. Esquemas de la estructura de soporte de los receptores calorímetros en la Torre Central.



Figura 3.2.22. Avance en la construcción de la estructura de soporte de los receptores-calorímetros.

3.2.9.6 Desarrollo del sistema de control y adquisición de datos pata la automatización de del sistema de TC

El desarrollo del sistema de control SCADA del Campo Experimental de torre Central se encuentra concluido. Con este sistema se han venido operando los helióstatos y la estación meteorológica así como sensores de radiación concentrada y temperatura, lo cual ha permitido llevar a cabo las diferentes pruebas y calibración de helióstatos a la fecha. En el período que se reporta se ha venido simplemente llevando a cabo una depuración de dicho sistema de control, La última parte del sistema desarrollada es la relativa al control y adquisición de datos del receptor. En la Figura 2.2.23 se muestra el diagrama de adquisición y control para los receptores calorimétricos y en la figura 2.2.24 se ilustra el diagrama de flujo para los mencionados experimentos. Esta última parte del sistema de adquisición está terminando de implementarse físicamente a medida que los proveedores van entregando las últimas componentes, que ya están adquiridas en su totalidad.



Figura 3.2.23. Diagrama del sistema de adquisición y control para los calorímetros.



Figura 3.2.24. Diagrama de flujo del sistema de control para los experimentos calorimétricos

3.2.10 Pruebas térmicas de la planta de torre central con el receptor desarrollado

Esta actividad no ha podido llevarse a cabo por que todavía no se han terminado de instalar ni alinear los helióstatos, así como tampoco el receptor térmico y su sistema de control. Sin embargo, si se han hecho pruebas del calorímetro en el HoSIER. Para evaluar el desempeño térmico, se experimentó variando los siguientes parámetros: la distancia sobre el eje focal a la que se ubica el receptor dentro del concentrador del HoSIER, el flujo radiativo incidente sobre el calorímetro, el flujo volumétrico de agua al interior del calorímetro.

Se se obtuvieron datos representativos de la distribución de calor en la placa receptora del calorímetro y de la transferencia de calor entre la placa receptora y el agua. El calorímetro se encuentra representado en la Figura3.2.25 y en la Tabla 3.2.9 se muestran algunas características geométricas del calorímetro.



Figura 3.2.25. Calorímetro a escala con una entrada de agua al centro del equipo, y cuatro salidas a los extremos.

Material	Aluminio 7075 (duraluminio)
Entradas	1 (3/8" nominal)
Salidas	4 (1/4" nominal)
Área de la placa	$20 \times 20 \text{ cm}^2 = 400 \text{ cm}^2 = 40000 \text{ mm}^2$
Número de aletas	81
Geometría de las aletas	Paralelepípedo de área transversal
	cuadrada
Área de una aleta / todas las aletas (sin las	7.5 x 31.1 mm ² / 75639.50 mm ²
bases)	
Distancia entre extremos de aletas	14.7 mm
Distancia desde el borde hasta el extremo de 1ª	7.4 mm
aleta	

La metodología de las pruebas experimentales fue la siguiente:

- 1. En todas las pruebas, es importante resaltar que las mediciones se tomaron en cuenta una vez que el sistema alcanzó un estado estable; es decir, cuando la placa receptora se mantuvo a una temperatura constante, así como el flujo de agua circulando en el interior del receptor. El comportamiento del estado transitorio también se registró también.
- 2. Encontrar una distancia adecuada en la línea foco-vértice, que permite que la intensidad radiativa tenga distribución más homogenea en la superficie de la placa receptora. Para lograrlo, se probó el dispositivo calorimétrico en el foco del concentrador a un flujo radiativo de 2 kW, y con un flujo de agua de 6 L/min. Con esto se obtuvo de la forma de distribución de intensidad radiativa sobre la placa del calorímetro.
- 3. Localizado el punto focal adecuado, las pruebas siguientes se basaron en evaluar el desempeño de un parámetro, manteniendo los demás constantes. Se probaron los siguientes casos:
 - Se mantuvo fija la potencia incidente sobre la placa, y la temperatura inicial del agua, y se varió el flujo volumétrico.
 - Se fijó un nuevo valor de la potencia incidente sobre la placa, la temperatura se mantuvo, y se varió el flujo volumétrico.
 - Esto se hizo consecutivamente hasta alcanzar el límite en el cuál no se podía hacer más la calorimetría de agua fría, basados en la infraestructura con la que se cuenta: 8 L/min, que es la capacidad máxima de flujo volumétrico de agua entregada la bomba con la que se cuenta.
- 4. Adicionalmente, se evaluó el efecto de la temperatura inicial de agua, repitiendo el procedimiento señalado.

La instrumentación utilizada en las pruebas fue la siguiente:

- Cámara CCD: que mide la distribución de energía incidente sobre la placa del calorímetro.
- Sensor tipo Gardon: que mide en un punto del calorímetro la intensidad radiativa y, junto a la información obtenida de la cámara CCD, se determinará la energía en la placa.
- 5 termopares a la entrada y salidas de agua: que mide la diferencia de temperaturas entre la entrada y las salidas del calorímetro.
- 4 termopares en la pared posterior del calorímetro: perfil de temperaturas en la placa posterior del calorímetro.
- 2 termopares para el agua en el interior del calorímetro: determinan la temperatura del flujo desarrollado en el calorímetro. Estos sensores están colocados a la mitad del espesor entre las placas del calorímetro.
- 4 Sensores de presión a la entrada y salidas del calorímetro: determinan la caída de presión en diferentes partes del sistema.
- 6 sensores en la placa receptora: para determinar la temperatura promedio en la placa.
- 5 termopares en cada una de dos aletas: a 3, 6, 9, 18 y 31 mm de la base.
- 1 sensor de temperatura ambiente: para determinar la diferencia de temperatura con la pared del calorímetro.

Los distintos sensores de temperatura distribuidos uniformemente en la placa permiten determinar la si hay o no homogeneidad en las diferentes zonas. Todos los sensores de temperatura son de tipo K. Los sensores de presión son de la marca Cole-Parmer, con señal de corriente. Los sensores instalados en el calorímetro fueron referenciados contra patrones de mayor precisión y exactitud.

Para llevar a cabo las pruebas experimentales, el calorímetro fue montado en una estructura de perfil estructural de aluminio, la cual fue montada a la mesa del HoSIER. Esta mesa cuenta con movimientos en tres direcciones, x (en la dirección Foco-Vértice), y (horizonal, perpendicular al Foco-Vértice) y z (vertical), que permiten trasladar la estructura en los tres ejes dentro de ciertas carreras límite. Posteriormente, se centró el calorímetro en el foco del concentrador para conseguir un punto de origen. A partir de este punto, la mesa fue movida hacia atrás en la dirección x, para permitir que el flujo radiativo se distribuyera en una mayor área en el receptor calorimétrico. Debido al canteo del horno y el área del receptor, éste tiene un límite fuera del punto focal, debido a los desbordamientos de energía. Para el receptor calolimétrico, esta distancia fue de 6 cm en la dirección x. La alineación que de los espejos del concentrador muestra algunos errores inherentes de canteo; esto puede provocar que la intensidad de flujo radiativo no sea uniforme en el área del receptor.

Para la experimentación, se variaron tanto la potencia incidente, como el flujo de agua en circulación dentro del calorímetro. Se realizaron pruebas con caudales de 4, 6 y 8 L/min, con 6 porcentajes de atenuación distintos, 10, 20, 40, 60, 80 y 98 %: el horno solar cuenta con un sistema de atenuación, que consiste en un arreglo de persianas verticales que pueden abrirse continuamente desde 1 hasta 100%, atenuando la energía suministrada por el helióstato.

Para el cálculo de la potencia incidente es necesario obtener un Factor de Horno (FH), que es la fracción real de la potencia ideal que puede suministrar el horno, dependiendo de las sombras y suciedad en los espejos, que alteran la óptica del sistema de concentración. Para obtener el FH se tomaron mediciones directas con un instrumento denominado Gardon, que mide el flujo radiativo en un área pequeña. Con la finalidad de corroborar mediante el método de procesamiento de imágenes la potencia incidente, también se tomaron imágenes con la cámara CCD sobre el blanco lambertiano en el que está montado el Gardon. La Figura 3.2.26 muestra algunas imágenes y datos generados con esta prueba.



Figura 3.2.26. Obtención del Factor de Horno para varios porcentajes de atenuación.

En la Tabla 3.2.10 se muestran los valores de DNI, para los caudales y porcentajes de atenuación probados. Estos valores son promediados, aunque las variaciones fueron mínimas debido a las favorables condiciones climatológicas.

La adquisición de datos se realizó con el programa Labview, en el que se desarrolló una plantilla para monitorear en tiempo real (cada 3 s) las condiciones de operación del calorímetro. Se usaron dos

adquisidores de datos (o DAQ, en inglés) CompactRIO inalámbricos para conectar 24 termopares, otras 2 tarjetas más (con cable) para medir las temperatura restantes, y una tarjeta que mide corriente para registrar las presiones a la entrada y salidas del flujo de agua. En la Figura 3.2.27 se muestra un esquema general de la mesa de trabajo usada en los experimentos.

Caudal: 8 Lt	al: 8 Lt/min Caudal: 6 Lt/min		min	Caudal: 4 Lt/	min
% Atenuador	DNI	% Atenuador	DNI	% Atenuador	DNI
10	830	10	750	10	762
20	830	20	725	20	720
40	830	40	759	40	770
60	825	60	775	60	765
80	803	80	763	80	750
98	803	98	770	98	778

Tabla 3.2.10. Radiación directa en pruebas experimentales.



Figura 3.2.27. Esquema general de la mesa de trabajo: control y posicionamiento del helióstato, control del flujo de agua, y monitoreo de datos.

En la Figura 3.2.28 se muestran las pruebas hechas con un caudal de 8 L/min para diferentes aperturas del atenuador. Q_{in} [W] es la energía incidente sobre la placa, mientras que $Q_{calorimétrica} = m_f c_p \Delta T$ es el calor útil, donde m_f (kg/s) es el flujo másico de agua, c_p (J/kgK) es la capacidad calorífica a presión constante, y ΔT [K] es la diferencia de temperaturas de entrada y salida del flujo. A un 98% de atenuación se alcanza la mayor energía incidente, de 12600 W, de los cuáles se absorbieron aproximadamente 7800 W.

En la Figura 3.2.29 se muestra que la eficiencia en todos los casos oscila entre 55 y 65 %. No hay una variación considerable en las eficiencias puesto que la creciente energía suministrada Q_{in} se compensa con un mayor ΔT de la energía arrastrada por el fluido.

Considerando la información anterior, se procederá a realizar las pruebas térmicas en el sistema receptorcalorímetro instalado en la Plataforma Solar de Hermosillo, durante los meses de Julio y Agosto del presente año.



Figura 3.2.28. Potencia de entrada (Qin), y calor útil (Qcalorimétrica) absorbido por el calorímetro.



Figura 3.2.29. Eficiencia del receptor calorimétrico.

3.3 Laboratorio de sistemas fotovoltaicos con concentración

A la fecha se ha trabajado en tres distintos tipos de concentradores fotovoltaicos, a saber: a) los Homogeneizadores de Flujo Radiativo Altamente Concentrado (HoFRAC), b) el Concentrador Solar Anidólico (CoSAn) y c) el Sistema de Evaluación de Celdas Solares con Concentración Fotovoltaica (SECeS-CFV). Cada uno de estos sistemas se ajusta al cronograma de actividades programado en el Informe No. 2. Por ello en cada una de las subsecciones siguientes se hará mención a estos sistemas.

3.3.1 Diseño de Concentradores Fotovoltaicos (CPV)

a) Homogeneizadores de Flujo Radiativo Altamente Concentrado (HoFRAC),

Se realizaron estudios sobre uniformidad en la distribución del flujo radiativo concentrado incidente en celdas fotovoltaicas. En particular, se sabe que las principales perdidas en todo sistema de concentración solar fotovoltaico son de carácter óptico; las perdidas por reflexión, geometría imperfecta del concentrador, respuesta espectral, errores en el seguimiento y la iluminación no uniforme de la o las celdas, pueden bajar la eficiencia de todo el sistema hasta en un 63%.

La no uniformidad de la iluminación producida por el concentrador incrementa la temperatura de la celda, su resistencia y disminuye su eficiencia. Aproximadamente el 40% de la energía se pierde comparando con lo que debería producirse idealmente a través del proceso¹.

Con el fin de evaluar una metodología para la homogeneización de flujo radiativo altamente concentrado en el HoSIER, se realizaron 3 tipos diferentes de homogeneizadores de flujo:

- 1. Homogeneizador de paredes reflectivas de segunda superficie
- 2. Homogeneizador de paredes reflectivas de primera superficie
- 3. Homogeneizador de paredes reflectivas refrigeradas de primera superficie

El Homogeneizador 1 fue evaluado y los resultados presentados en el Informe Parcial No. 2.

Los tres homogeneizadores fueron diseñados como caleidoscopios huecos de área transversal cuadrada y paredes internas reflectivas.

b) Concentrador Solar Anidólico (CoSAn)

Se diseño un Concentrador Solar Anidolico. El equipo consiste en un sistema concentrador con 18 espejos circulares de 30cm de diámetro, estos espejos son de primera superficie y de curvatura esferica, para su correcto posicionamiento fueron montados sobre una estructura de perfil estructural y dispuestos sobre un

¹ Hasan Baig, Keith C. Heasman, Tapas K. Mallick, 2012. Non-uniform illumination in concentrating solar cells.. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 16, Issue 8, October 2012, Pages 5890–5909.

plano vertical en 3 grupos, cada grupo de espejos es simetrico entre si y permite concentrar la radiación del sol en un receptor a 2 metros de distancia de este equipo(Fig. 3.3.1).





Los espejos son orientados mediante rotulas de precisión, permitiendo modificar la posición del spot formado por la focalización individual de los espejos, la superposición simétrica de imágenes pueden formar una región de alta intensidad lumínica con un área uniforme en el centro, en esta región se pueden caracterizar dispositivos termoiónicos y fotovoltaicos sin la necesidad de un segundo elemento óptico.



Figura 3.3.2. Rotulas de precisión y soportes de espejos en el CoSAn.

Por medio de las rotulas es posible orientar de forma precisa el espejo, pero poder homogeneizar los flujos concentrados se requiere de un segundo dispositivo que permita la re-focalización del espejos partiendo de un plano de referencia normal al receptor y esto se consigue mediante tres tornillos niveladores que sujetan al espejo por su circunferencia y están diseñados para montarse y desmontarse con rapidez a la rotula, para protegerlos de la intemperie y mantener las propiedades ópticas de estos en óptimas condiciones (Fig. 3.3.2).

c) Sistema de Evaluación de Celdas Solares con Concentración Fotovoltaica (SECeS-CFV).

El Sistema de Evaluación de Celdas Solares de Concentración Fotovoltaica (SECeS-CFV), es el nombre que se le dio al equipo que permitirá caracterizar el desempeño de dispositivos fotovoltaicos, sometidos a altos niveles de flujo radiativo con condiciones de intemperie y con un control fino del nivel de intensidad solar.

El dispositivo es diseñado para concentrar la radiación solar por medio de la superposición de imágenes reflejadas de espejos cuadrados con un área de 25 cm², teniendo una distribución de flujo de radiación uniforme mínima de 9 cm², en el receptor.

Diseño óptico del SECeS-CFV

Para dimensionar el concentrador se tomaron las siguientes consideraciones:

- Niveles de concentración en soles
- Espacio disponible de instalación del equipo
- Tipo de espejo

El nivel de concentración, a medida que los fabricantes de celdas fotovoltaicas, proporcionaron los parámetros de operación de sus productos en hojas de especificaciones, se optó por elevar el factor de concentración a 1300 soles.

Se desarrolló un programa en el software Excel que permite dimensionar arreglos de espejos en matrices tanto circulares como cuadradas, el programa está diseñado para trabajar específicamente con el software SOLTRACE. Puede calcular la información básica que este requiere para realizar las simulaciones, dentro de los parámetros más importantes que éste calcula se encuentra la siguiente información:

- Coordenadas en los ejes x,y,z de los espejos, en un plano o paraboloide con y sin sombreamiento entre los espejos
- Distribución radial de los espejos o cuadrada, con un factor de seguridad de espaciamiento entre espejos.
- Punto de referencia (Aim Point) de cada espejo
- Ángulos de inclinación de los espejos
- Ángulos de rotación de los espejos

Para la matriz circular, el programa calcula lo mencionado anteriormente con las siguientes variables:

- Geometría y dimensiones de los espejos
- Distancia al receptor (target)
- Radio en función del número de espejos
- Número de espejos en función del radio

En la figura 3.3.3 se muestra un esquema que ejemplifica la distribución lineal de espejos, esto supone que los espejos estén a diferentes radios. La idea central es evitar el sombreamiento entre espejos.



Figura 3.3.3. Esquema de la distribución lineal de espejos, que implementa el programa para evitar sombreamiento de los espejos más lejanos al eje óptico respecto a los de menor radio.

Como ya se comentó, uno de los parámetros de diseño eran las dimensiones de los espejos e incluso su geometría; los espejos que se han elegido son cuadrados de 5cm de lado, para tener una distribución de radiación de flujo uniforme de 4 cm para un receptor que se encuentra a 1.5 m del origen sobre el eje óptico. El área de análisis que se requiere viene en función de las celdas fotovoltaicas que se fabrican comercialmente a la fecha y encaminada a la tendencia del mercado.

Estas celdas varían de 1 mm² a 4 cm², por lo que para las celdas cuadradas de mayor tamaño se les deja 1 cm de cada lado, como factor de seguridad, este centímetro extra permite medir distintas propiedades físicas de la radiación incidente, tales como temperatura en algún material de referencia, espectro de la radiación solar reflejada por el concentrador, factor de concentración, intensidad de flujo radiativo; también es posible utilizar esta radiación como señales de control del equipo, para corregir errores en el seguimiento.

Teniendo los datos de la razón de concentración a la que se desea llegar, y las dimensiones de los espejos que conforman el primer elemento óptico (POE, por sus siglas en inglés), se calcula un número de espejos proporcional a la cantidad de soles que se buscan, tomando en cuenta que la radiación reflejada se ve reducida por perdidas asociadas a la reflectividad de los espejos.

En la tabla 3.3.1 y en la Figura 3.3.4 se muestran los 1824 espejos de los que consta el concentrador. Los arreglos están compuestos por el número de espejos N2 que se encuentran en un determinado radio; ya que por cuestiones de diseño mecánico conviene sombrear 8 espejos de cada radio a lo más, esto es, el número "efectivo" de espejos sería Nefectivo =N2-8. Por otro lado, N1 es el número máximo de espejos que se puede tener dentro de un radio especifico, que también por cuestiones de diseño mecánico no es conveniente, que los espejos estén muy próximos entre sí, sin embargo debe tomarse en cuenta y debe cumplirse la siguiente condición Nefectivo < N1.

Arreglo	Nefectivo	N2	N2/4	Radio (m)	N1
1	64	72	18	0.60	72
2	68	76	19	0.66	79
3	76	84	21	0.72	87
4	88	96	24	0.79	96
5	96	104	26	0.86	104
6	104	112	28	0.93	113
7	108	116	29	1.00	122
8	120	128	32	1.07	131
9	128	136	34	1.14	140
10	136	144	36	1.21	148
11	148	156	39	1.29	158
12	156	164	41	1.37	169
13	168	176	44	1.45	179
14	176	184	46	1.53	189
15	188	196	49	1.61	199

Tabla 3.3.1. Número de espejos y distancia radial de los arreglos



Figura 3.3.4. Grafica que muestra el posicionamiento de los espejos en el plano.

Simulación con Trazado de Rayos del SECeS-CFV

A continuación se muestra el trazado de rayos con el software SOLTRACE que se hizo para los 1986 espejos, con diez millones de rayos, sin considerar los errores ópticos y suponiendo espejos perfectos.

En la Figura 3.3.5 se muestra la distribución de las intensidades de flujo radiativo para los 1986 espejos, esta distribución tiene un alto grado de uniformidad en el área de interés (cuadrado central de 2 cm de lado), esta es de 0.0162 ua; con un flujo de radiación promedio de 1.5641 MW/m2 equivalente a 1564 soles; aparentemente 261 soles más de los deseados.



Figura 3.3.5. Simulación en SOLTRACE con 10 000 000 de rayos, para un concentrador de 1986 espejos; a la Izquierda se muestra la gráfica de superficie de la distribución de intensidades del flujo radiativo en el receptor, a la derecha se observa la gráfica de contorno en el receptor.

En los dispositivos de concentración fotovoltaica, el calor reduce la eficiencia de las celdas, por lo que se suelen agregar disipadores de calor aleteados o de refrigeración pasiva para celdas solares de foco puntal, o intercambiadores de calor activos de cambio de fase para obleas con arreglos de compactación densa de celdas. Estos dispositivos si se sitúan en el foco, al ser más grandes que la celda obstruirían el paso de la radiación solar, por lo que es convenientes redireccionar la radiación a la base del concentrador, por medio de espejos. A este tipo de concentradores se les conoce como concentradores Cassegrain y su espejo secundario o segundo elemento óptico puede ser plano, o hiperbólico, esto dependerá en gran medida de la geometría del primer elemento óptico.

En la figura 3.3.6, se muestra la simulación con el software SOLTRACE, para el concentrador Cassegrain con los parámetros ópticos de los espejos solares delgados de la marca AGC solar como primer elemento óptico y un espejo solar grueso de la misma marca como segundo elemento óptico (SOE, por sus siglas en inglés); igual que en el caso anterior la simulación se realizó con 10 millones de rayos.

El segundo elemento óptico se colocó a 1 m, con esto se refocaliza la radiación solar concentrada a un plano que se encuentra a 50 cm del plano de los espejos. La distancia a la que corta el segundo elemento óptico el eje z, definirá sus dimensiones, en este caso el espejo secundario tiene un radio de 55cm; esto debido a que

el espejo debe intersecar toda la radiación reflejada por el arreglo de espejos del radio más lejano, en caso de solo intersecar una parte de este, la radiación refocalizada sería no uniforme.

Tener un espejo secundario a tal distancia, y de tales dimensiones puede representar un reto mecánico, sin embargo para contrarrestar los esfuerzos axiales que se generarán cuando el dispositivo este siguiendo al sol en un ángulo de altitud solar bajo, el espejo será sujetado por cuatro puntos de apoyo, que lo mantendrán estable en su posición, entre más cercano se quiera tener el espejo secundario al concentrador, más grande será. Por esta razón se prescindirá del primer arreglo de espejos, el cual agrupaba 64 espejos sobre un radio de 0.6 m, ya que el espejo secundario podría sombrear parte del arreglo, debido a que las dimensiones de ambos son muy similares y aún falta agregar el dispositivo de sujeción del espejo secundario, que también generará sombra sobre este arreglo.



Figura 3.3.6. Simulación en SOLTRACE con 1 000 000 de rayos, para un concentrador Cassegrain de 1914 espejos; a la izquierda, trazado de rayos para el concentrador, con su primer elemento óptico en diferentes colores y el segundo elemento óptico en azul; a la derecha la distribución de flujo en el espejo secundario.

Diseño mecánico del Sistema de Evaluación de Celdas Solares de Concentración Fotovoltaica (SECeS-CFV)

Una vez definido el sistema óptico del SECeS-CFV, se diseñó el sistema mecánico del mismo. En este diseño mecánico se consideraron las siguientes características como parámetros fundamentales.

- Intensidad ajustable de la irradiancia incidente
- Uniformidad del flujo concentrado en el receptor
- Control del deterioro de las muestras
- Precisión en el seguimiento

Control de la intensidad de flujo de radiación en la muestra

El SECeS-CFV fue diseñado para concentrar la radiación solar con distribución de flujo uniforme en un área específica y atenuarla, ya que la atenuación parcial de los espejos afecta la uniformidad de la distribución del flujo de intensidad radiativa, es muy importante que la radiación reflejada por los espejos, sea en su totalidad, la proyección de la energía incidente en su área de captación sobre el receptor.

La atenuación de la radiación solar reflejada por el concentrador, se puede llevar a cabo por medio de tres metodologías:

- 1. Desenfoque de espejos
- 2. Obturación de espejos
- 3. Absorción parcial de la radiación

En la atenuación por desenfoque de espejos, la radiación solar incidente en uno o más espejos, es reflejada en un área que no intersecte al receptor. El desenfoque de espejos se puede llevar a cabo, tanto con el primer y segundo elemento óptico, como con el receptor

En la obturación de espejos, se bloquea la incidencia de radiación solar en el primer elemento óptico interponiendo un elemento de sombreamiento en el área de captación, o bloqueando la radiación reflejada por los espejos.

En la absorción parcial de la radiación se utilizan materiales transparentes con diferentes niveles de transmitancia, que absorban un porcentaje de la energía solar que incide en ellos y dejen pasar el resto, sin alterar su distribución de flujo.

Los experimentos realizados con el Homogeneizador de flujo, en el HoSIER tuvieron metodologías de atenuación controladas, del tipo 2 y 3. Teniendo en cuenta los resultados previos y pensando en un diseño con precisión en su repetitividad, se optó por la metodología 1; la cual se explica a continuación:

En la figura 3.3.7 se muestra un esquema que explica el principio de operación del dispositivo de alineación automática de arreglos de espejos. En la imagen a), se observa la posición inicial de los espejos; los espejos se encuentran orientados en una dirección paralela al eje óptico o con un ángulo de inclinación que evite que las reflexiones incidan en el receptor. Los espejos como se observa, están unidos a un mismo plano que se puede desplazar en el eje z en la parte superior de estos y sujetos por el centro a un eje sobre el que les es posible rotar.



Figura 3.3.7. Esquema del principio de funcionamiento de los arreglos en el SECeS-CFV; a) los espejos se muestran en su posición inicial (desorientados), b) el anillo de sujeción desciende y los espejos están en su segunda posición (orientados).

En la imagen b) de esta misma figura, se observa la segunda posición del arreglo de espejos, donde un mecanismo eleva el plano al cual están sujetos los espejos, inclinándolos de modo tal que la radiación reflejada sea redireccionada a la muestra.

La ventaja técnica de utilizar un arreglo matricial circular, recae en que todos los espejos que se encuentren a la misma distancia del eje óptico tienen el mismo punto de apoyo (aimpoint) y por ende el mismo ángulo de inclinación; así los espejos pueden ser agrupados en arreglos de tantos espejos como quepan en un radio especifico, si este radio pertenece a un plano, el desplazamiento del plano tiene las misma consecuencias para cada uno de los espejos dentro del arreglo.

Versatilidad del Control de la intensidad de flujo de radiación en la muestra

Entre los objetivos centrales del dispositivo esta el tener un control fino de la cantidad de energía solar incidente en la celda fotovoltaica. Así mismo, se quiere tener un sistema sencillo y ligero. Por ello, entre los criterios que se usaron en la construcción mecánica del SECeS-CFV se plantearon los siguientes puntos:

- el número de planos a orientar debe ser mínimo
- el número de componentes debe ser mínimo
- peso total del SECeS-CFV debe ser mínimo
- el control del SECeS-CFV debe ser lo más sencillo
- la operación del SECeS-CFVdebe ser simple
- el costo total del proyecto debe ser bajo

Para cumplir estos objetivos se diseñó un equipo que parte de un solo plano de referencia como offset, todos los demás planos se calibran con base en éste y no dependientes entre sí.

Si bien la orientación es uno de los componentes principales en el desarrollo de cualquier proyecto de concentración solar, en nuestro caso la desorientación y reorientación de los arreglos de espejos se ha vuelto la metodología seleccionada para regular la intensidad de flujo. En un primer diseño, se consideró mover el enfoque de los espejos sobre el eje óptico por medio de 3 servomotores, que elevaban un anillo posicionador como se mencionó previamente. Un nuevo diseño se realizó durante este semestre el cual considera rotar todo el arreglo sobre un eje común y así mover el foco de este ya no sobre el eje óptico, sino sobre el plano donde se ubica el foco paralelo al plano del POE.

En la figura 3.3.8 se muestra la simulación de un arreglo rotado. En esta se puede observar como los rayos provenientes del sol (líneas amarillas), al ser reflejados por el arreglo de espejos desorientados inciden fuera del espejo secundario, por lo cual no impactan la celda fotovoltaica. (Los rayos reflejados se muestran en color rojo).



Figura 3.3.8. Simulación en SOLTRACE con 1 000 000 de rayos, para un concentrador Cassegrain de 1648 espejos rotado.

Como se observa en la imagen, con tan solo elevar en un punto la estructura, respecto al plano del POE, se logra evitar que la radiación de los espejos incida sobre la celda fotovoltaica, incluso sobre el segundo elemento óptico. Cabe señalar que no es necesario que estos rayos no incidan sobre el espejo secundario, mientras el ángulo en el que lo hagan no les permita ser reflejados parcial o totalmente sobre la celda fotovoltaica, ya que de ser así romperían con la homogeneidad del flujo radiativo concentrado sobre esta.

Según los experimentos computacionales, con tan solo elevar desde el centro del plano del SOE 20 cm el arreglo de espejos, se evita la interacción de cualquiera de los 14 arreglos del POE con el SOE. Esta información es suficiente para definir la carrera del actuador lineal que nos permitirá controlar tanto el desenfoque como la refocalización del arreglo, de manera precisa y repetitiva. Cabe recordar que uno de los primeros diseños que se realizó de este equipo, tenía el inconveniente de la repetitividad, por lo que ha sido

un detalle cuidadosamente observado y considerado en la operación de esta versión actualizada del SECeS-CFV.

Con base en la experiencia adquirida en un prototipo a escala, se diseñó un sistema de orientación similar para el SECeS-CFV, mediante el uso de un balín soldado a un tornillo industrial de 5 cm de largo, el cual sirve de poste para el espejo y un posicionador de nylamid circular de 3cm de diámetro, de la misma forma que en la maqueta el posición del nylamid se asegura al tornillo mediante un tornillo prisionero. En la figura 3.3.9 se muestra los componentes y su ensamblaje del posicionador de elementos del primer elemento óptico.



Figura 3.3.9. Componentes del posicionador de elementos del PEO. a) Balín soldado al tornillo, b) Posicionador de nylamid y c) Ensamblaje de estos componentes.

En la figura 3.3.10 se muestra el principio de operación fundamental de este diseño; en la parte superior se observan dos arreglos, los cuales deberían, si el concentrador estuviera concentrando la máxima potencia, acoplarse a un mismo plano horizontal (como esta en la figura), ya que se desea anular la interacción de uno de los arreglos, este se rota sobre un eje, el cual comparte con el otro arreglo, de tal forma que un arreglo sigue apuntando al foco y el otro es desviado de este.

En la parte inferior de esta imagen, se muestran ya no dos arreglos, sino solo el arreglo 14 dividido a la mitad, en dos semicírculos. Esta decisión de dividir los arreglos se tomó con base en la experiencia que se tuvo con la maqueta, en la cual la separación entre espejos no era lo suficientemente grande como para evitar que al rotar todo el arreglo los espejos rotados sombrearan a los arreglos de menor diámetro. En esta imagen se observan los actuadores lineales, el de la izquierda en posición de desenfoque y el de la derecha en posición de enfoque. Como se puede también observar, para lograr esta nueva función, fue necesario dividir el eje rotativo, quedando los 14 arreglos sujetos a un eje rotativo por semicírculo, esto arroja un total de 28 actuadores lineales, para controlar cada semiarreglo de espejos.



Figura 3.3.10. Rotación de arreglos en el SECeS-CFV. En la parte superior se muestra la rotación del arreglo 13 dejando fijo el arreglo 14; en la parte inferior rota solo la mitad del arreglo 14 (se ocultaron los demás arreglos).

En la figura 3.3.11 se muestra la ubicación de estos 28 actuadores en la estructura de soporte del primer elemento óptico (ESPEO), estos están contenidos en una canasta que se atornilla al ESPEO e impide que los actuadores se muevan durante su operación.

El ESPEO, es la estructura que dará referencia y soporte al primer elemento óptico; construida principalmente de perfil tubular cuadrado de 4 x 4 cm para la estructura y de dos tubos de 5 cm de diámetro como ejes rotativos, tiene la función de acoplar al SECeS-CFV con la torreta del seguidor solar y proporcionar los dos ejes de giros necesarios para la rotación de los arreglos. La forma en que los arreglos se sujetan a estas tuberías es por medio de chumaceras comerciales, que son altamente utilizadas por el sector industrial y de fácil adquisición.

En la Figura 3.3.12 se muestra el diseño del SECeS-CFV, en una vista isométrica del ensamblaje final de todos sus componentes. En esta imagen se observa la instalación del soporte del segundo elemento óptico (SSEO), que como se comentó anteriormente fue modificada para soportar un espejo secundario ahora reducido disco de tan solo 50 cm de diámetro. Esta estructura también proporciona soportes para la cámara donde se ubicará la celda fotovoltaica.

Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa



Figura 3.3.11. Estructura de soporte del primer elemento óptico (SPEO). A la derecha se muestra un actuador lineal; a la izquierda la posición de los 14 actuadores lineales en el SPEO.



Figura 3.3.12. Vista isométrica del SECeS-CFV.

3.3.2 Construcción de prototipos

a) Homogeneizadores de Flujo Radiativo Altamente Concentrado (HoFRAC),

El tercer homogeneizador fue construido bajo los siguientes parámetros de diseño:

Material reflectivo adherido mediante pegamento conductor térmico

En el segundo homogeneizador el material reflectivo fue adherido mediante silicón de alta temperatura, el cual es un aislante térmico y por lo tanto con el 20% de apertura del atenuador del HoSIER este superaba sus parámetros de operación y se desprendía. Para el nuevo homogeneizador de primera superficie el material reflectivo Alanod fue adherido mediante un pegamento con alta conductividad térmica de la marca ArticSilver, este pegamento contiene partículas de plata que mejoran la conducción del calor absorbido por el Alanod y un fuerte poder adhesivo sobre superficies metálicas, ver figura 3.3.13. Lo anterior representó una gran ventaja en la operación del dispositivo.





Figura 3.3.13. (Izq.) Prensado del Alanod, el pegamento conductor térmico y la placa de aluminio. (Der.) Adhesivo térmico Artic Silver

Rigidez en la estructura mecánica

La estructura que sostiene el material reflectivo del tercer homogeinizador fue maquinada sobre placas de aluminio de 1/2 plg rectificado. Para garantizar la planitud de la superficie a la que se adhiere el Alanod y mantenerla durante la experimentación se adquirió una aleación de duraluminio, la cual por sus propiedades físicas también permite la eficaz remoción de calor del Alanod. Para optimizar las propiedades ópticas del dispositivo y reducir errores en su fabricación, montaje y operación, las placas fueron maquinadas en su totalidad mediante una maquina de control numérico (CNC por sus siglas en ingles) adquirida dentro del proyecto LACYQS I, ver figura 3.3.14. Este equipo trabaja con los diseños CAD realizados en SolidWorks, software que también se adquirió con este proyecto, el CNC tiene precisión micrométrica en el corte de las piezas, esto reduce errores ópticos especulares y de canteo que tenían los homogeneizadores anteriores.



Figura 3.3.14. Máquina de Control Numérico (CNC).

Paredes Refrigeradas

La refrigeración de las paredes del tercer homogeneizador se lleva a cabo mediante la circulación de un flujo de agua constante dentro de la placa de aluminio de 1/2 plg. Para ello se maquino con el CNC sobre la placa un canal de 6 mm de profundidad con una trayectoria de 4m para cada cara. También se maquinaron las tapas de cada cara que fueron adheridas posteriormente para sellar los canales.



Figura 3.3.15. Ensamblaje de las caras del homogeneizador (sin tapas).

b) Concentrador Solar Anidólico (CoSAn)

En la Figura 3.3.16 se muestra una fotografía del CoSAN con dos de los espejos montados sobre las rotulas y se observa la distribución de las rotulas sobre la estructura hexagonal. También se muestra una mesa diseñada para generar el menor sombreamiento, un blanco lambertiano con sistema hidráulico para pruebas que requieran refrigeración, una fuente de poder para conectar dispositivos de enfriamiento o de adquisición de datos. Al centro del concentrador se encuentra una cámara CCD para la adquisición de imágenes. El sistema esta protegido de la intemperie mediante una caseta que puede ser plegada una vez acabados los experimentos.



Figura 3.3.16. CoSAN con dos espejos montados, caseta de pruebas y mesa de experimentación

c) Sistema de Evaluación de Celdas Solares con Concentración Fotovoltaica SECeS-CFV

Para analizar los principios de diseño del SECeS-CFV se construyó una maqueta que permite observar sus características ópticas y mecánicas fundamentales, esta maqueta/prototipo, cuenta con 80 espejos planos de 4cm² como POE y un espejo secundario de 10 cm de diámetro como SOE. En la Figura 3.3.17, se observa el dispositivo, al cual al apuntársele con un láser perpendicular al plano de referencia del POE, este es reflejado hacia el SOE y enviado a un receptor ubicado en la base del pequeño concentrador.

Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa





Figura 3.3.17. Maqueta del SECeS-CFV con 80 espejos y un espejo secundario.

Los elementos del POE fueron instalados sobre tres anillos rotatorios, el más grande con 36 espejos, seguido por el de 24 espejos y por último, el de menor tamaño con 14 espejo. Con la maqueta se observó que efectivamente bastaba un pequeño movimiento de los anillos para desorientar el dispositivo, corroborando lo previamente simulado. También se propuso con ayuda de esta maqueta, un nuevo sistema de orientación y montura del POE.

Cada espejo fue adherido con un pegamento comercial a un posicionador de nylamid, maquinado en el taller del Instituto. Este pequeño dispositivo funge como rotula al girar en dos ejes sobre un poste con terminación esférica, un tornillo colocado en una cara lateral del posicionador, permite sujetar este a la esfera del poste, impidiendo un movimiento posterior involuntario o accidental.

Estado actual del SECeS-CV

Actualmente la construcción del proyecto SECeS-CFV se encuentra en manos de los proveedores/fabricantes, quienes llevan meses trabajando en la construcción del mismo y están próximos a la entrega de los equipos.

Una vez entregados y ensamblados estos equipos que integran el SECeS-CFV, será acoplado a una torreta de seguimiento, mediante una estructura de soporte. La torreta de seguimiento corresponde a una montura azimutal y el dispositivo cuenta además con un sistema automático para el seguimiento del movimiento aparente del sol, ver Figura 3.3.18.
Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa



Figura 3.3.18. Torreta de seguimiento instalada en la plataforma del IER-UNAM.

3.3.3 Evaluación y caracterización de prototipos de CPV

a) Homogeneizadores de Flujo Radiativo Altamente Concentrado (HoFRAC)

Para localizar la longitud óptima de homogeneización del flujo radiativo, se diseño un experimento en el cual, un receptor, que en este caso es un blanco lambertiano, es desplazado en el interior del homogeneizador a fin de corroborar el flujo radiativo a diferentes longitudes.



Figura 3.3.19. Esquema del experimento para la toma de imágenes de un receptor dentro de un caleidoscopio, sometido a altas intensidades de flujo radiativo en el HoSIER.

Los resultados de la prueba de uniformidad de los primeros dos homogeneizadores se muestran en la Figura 3.3.20.





Los experimentos de Homogeneización de flujo en el HoSIER previamente mencionados se presentaron en el segundo informe de LACYQS II.

Actualmente el tercer homogeneizador no ha podido ser evaluado y comparado con sus predecesores, ya que la calendarización de uso del HoSIER no ha coincidido con las características climatológicas óptimas para la experimentación.

b) Concentrador Solar Anidólico (CoSAn)

En el CoSAn también es posible montar equipos fotovoltaicos de concentración comerciales, para estas pruebas se adquirieron tres tipos de celdas fotovoltaicas de concentración:

- Con homogeneizador refractivo y disipador pasivo
- Con homogeneizador reflectivo sin disipador
- Celda fotovoltaica sin homogeneizador y sin disipador

La primer tecnología es la mostrada en la Figura 3.3.21. Cuenta con un homogeneizador refractivo de cuarzo que homogeneiza la radiación proveniente del CoSAn y la redirecciona sobre la celda fotovoltaica. El calor generado por la celda fotovoltaica es removido mediante las aletas de aluminio por convección natural.



Figura 3.3.21. Dispositivo fotovoltaico para concentración solar con homogeneizador refractivo y refrigeración pasiva (con corte transversal).

El CoSAn cuenta a su vez con un heliostato 9m² para redireccionar la radiación solar al concentrador y de un atenuador que permite regular los niveles de intensidad concentrados mediante un mecanismo de persianas como se muestra en la imagen. En la imagen se observa otro dispositivo de concentración fotovoltaica, el cual no está refrigerado al cual se le ha acoplado un dispositivo de enfriamiento que opera mediante la tecnología de cambio de fase ("heat pipe" como es conocida en ingles), éste permite, con la ayuda de termopares, regular la remoción de calor de la celda y mantener una temperatura constante durante los experimentos.



Figura 3.3.22. Periféricos del CoSAn: Heliostato, Atenuador, mesa de trabajo (con dispositivo CFV y Gardon refrigerado).

Los alcances del CoSAn permiten, no solo caracterizar ópticamente dispositivos fotovoltaicos, sino también caracterizarlos electricamente por medio de un trazador de curvas I-V. Este trazador, muestra todos los parametros electricos de las celdas fotovoltaicas y nos permite evaluar la información que indica el fabricante de estas o verificar si los nuevos diseños que se desarrollen efectivamente resultan mas eficientes que los que incluian las celdas cuando fueron adquiridas. La Figura 3.3.23 muestra los resultados que arroja el programa que controla al trazador de curvas I-V



Figura 3.3.23. Software del trazador de Curvas para caracterización de celdas fotovoltaicas con concentración.

El software, así como el hardware, fueron desarrollados por alumnos del IER y están próximos a patentarse. El software tiene la característica de medir corrientes relativamente altas a bajos voltajes que es lo que se presenta en celdas fotovoltaicas de concentración, que producen corrientes 3 ordenes de magnitud mayores que las celdas fotovoltaicas comerciales con la misma área, y tecnologías de primera o segunda generación.

3.3.4 Mejoramiento y optimización de los prototipos

a) Homogeneizadores de Flujo Radiativo Altamente Concentrado (HoFRAC)

Los dos primeros homogeneizadores lograron distribuir el flujo radiativo en el área de análisis como se esperaba, sin embargo fallaron los materiales debido a que la potencia del HoSIER estaba por encima de las capacidades mecánicas y ópticas de estos dos primeros prototipos.

El tercer homogeneizador fue diseñado con las siguientes mejoras:

- Mayor área de apertura
- Rigidez en la estructura mecánica

- Material reflectivo adherido mediante pegamento conductor térmico
- Paredes Refrigeradas

Los homogeneizadores previos tenían un área de apertura diseñada para poder introducir la totalidad del spot concentrado, esta área transversal se mantenía constante desde la entrada hasta la salida de los mismos.

Con el fin de reducir la temperatura en las primeras secciones del homogeneizador y así prevenir el calentamiento diferencial en las paredes reflectivas, que provoca un desprendimiento del material reflectivo debido a los esfuerzos mecánicos generados por dilatación térmica, se diseño el homogeneizador con un área de entrada mayor a la del SPOT para recibir el mismo flujo pero con una intensidad menor. A la salida del homogeneizador, el área se reduce 4 veces respecto al área de entrada, ello permite sopesar la energía absorbida por las múltiples reflexiones y obtener alto flujo radiativo distribuido uniformemente en un área de 5x5 cm². La Figura 3.3.24 presenta el diseño en CAD del Homogeneizador 3.



Figura 3.3.24. Diseño CAD (dibujo asistido por computadora por sus siglas en ingles) del Homogeneizador 3.

El Homogeneizador 3, fue montado, al igual que los anteriores, en el HoSIER sobre la estructura que sostiene a la mesa de posicionamiento. Sobre esta mesa se instaló un brazo de aluminio estructural que sostiene a la cámara y al blanco lambertiano. El blanco lambertiano se desplaza dentro del homogeneizador. En la Figura 3.3.25 se observa el Homogeneizador con las tapas el las caras laterales y las conexiones hidráulicas para la refrigeración de las paredes.



Figura 3.3.25. Montaje del Homogeneizador 3, sistema hidráulico, mesa de posicionamiento, brazo para receptor y cámara CCD, en el HOSIER.

b) Concentrador Solar Anidólico (CoSAn)

Los experimentos realizados en dispositivos comerciales de concentración fotovoltaica utilizando el CoSAn, permiten seleccionar aquellos cuya óptica funcione mejor bajo las características de este concentrador. Actualmente se investiga el diseño de un dispositivo de homogeneización que funcione eficientemente con concentradores de foco lejano.

c) Sistema de Evaluación de Celdas Solares con Concentración Fotovoltaica SECeS-CFV

Como se dijo anterioremente, el SECeS-CFV está en desarrollo. El mejoramiento y la optimización de este dispositivo, se realizará una vez que se construya, instale y se caracteríce.

3.4 Actividades de divulgación y vinculación

Además de las actividades estrictamente técnicas comprometidas en el proyecto, es de suma importancia llevar a cabo acciones para la divulgación de sus actividades y de las tecnologías de concentración solar, además de actividades de vinculación con empresas para impulsar la tecnología.

3.4.1 Divulgación

En el aspecto de divulgación existen varias acciones que se han desarrollado:

3.4.1.1 Visitas guiada

Desde el inicio del proyecto en el CEToC, en Hermosillo, se ha establecido los días jueves como días de visitas guiadas, donde el personal asignado permanentemente a la instalación explica el proyecto, las instalaciones y las actividades que se realizan en ellas. Ocasionalmente también ocurren visitas en otros días de la semana, con motivos de eventos especiales como la Semana Nacional de Ciencia y Tecnología. Las visitas contribuyen de manera importante a dar a conocer las instalaciones entre el público. Estas visitas se llevan a cabo previa cita y el público asistente consiste principalmente de grupos de estudiantes de diferentes niveles: secundaria, preparatoria y licenciatura. Entre las instituciones que han asistido a estas visitas en el 2013 se encuentran en la Tabla 3.4.1, además de un estimado para el 2012, donde no se llevaba registro sistemático de visitas. En la Fig. 3.4.1 se muestra una imagen de una de las mismas.

	V	
Fecha	Institución	# Visitantes
Año 2012	Visitas varias	250
10 de enero de 2013	ERNO	6
31 de enero de 2013	Ganadores Concurso Regional	50
14 de febrero de 2013	Televisión China	3
04 de marzo de 2013	Licenciatura en Arquitectura UNISON	15
21 de marzo de 2013	Escuela Secundaria 66	17
16 de mayo de 2013	Universidad de la Sierra	35
27 de junio de 2013	Universidad Tecnológica de Hermosillo	36
4 Marzo de 2015	Universidad Tecnológica de Hermosillo	25
19 Marzo de 2015	Instituto Tecnológico de Hermosillo	36
26 de Marzo de 2015	Universidad Tecnológica de Hermosillo	28
9 Abril de 2015	Universidad Nacional Autónoma de México	4
14 de Mayo 2015 Universidad de Sonora		2
28 Mayo 2015	Universidad Tecnológica de Hermosillo	33
	TOTAL:	312

Tabla 3.4.1. Visitas de divulgación al CEToC.

Los días jueves son tradicionalmente los días en que se reciben visitas guiadas en el IER-UNAM, mismas que incluyen las plataformas solares y en particular el HoSIER y la PSTFAR. En la tabla 3.4.2., se presenta como ejemplo y por brevedad, la lista de visitas a estas dos instalaciones para el primer semestre de 2015. Cada semestre las cifras son similares.

Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa



Figura 3.4.1. Visita de los grupos de ña Universidad de La Sierra, 16 de mayo de 2013 (izquierda) y Universidad Tecnológica de Hermosillo, 28 de Mayo de 2015 (derecha).

		···· · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
	Fecha	Institución	# visitantes
	05/02/2015	CECATI No. 100, Tlaquiltenango, Mor.	25
	12/02/2015	Tecnológico de Monterrey, Campus Cuernavaca	25
	19/02/2015	Cancelación	0
	26/02/2015	Tecnológico de Monterrey, Campus Puebla	35
	05/03/2015	CANCELADA	0
	12/03/2015	UNIVERSIDAD TECNOLÍGICA DE TEHUACÁN	30
	19/03/2015	CANCELADA	0
	24/03/2015	Instituto Tecnológico de la Laguna	25
	26/03/2015	CUAM-DF	35
	09/04/2015	Escuela de Investigación en Energía	48
	16/04/2015	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE TEHUACÁN	30
	20/04/2015	Centre for Global Education	6
	23/04/2015	Facultad de Ingeniería/Universidad Politécnica Juventino Rosas	29
	30/04/2015	Puertas Abiertas	50
	07/05/2015	Tecnológico de Martínez	18
	13/05/2015	Escuela Nacional de Estudios Superiores.UNAM	23
	14/05/2015	Universidad Politécnica de Guerrero	30
	21/05/2015	Escuela Secundario "Telpochcalli"	10
	28/05/2015	Tecnológico de Martínez	30
	04/06/2015	Instituto Tecnológico Superior de Xalapa	50
		TOTAL:	499

Tabla 3.4.2. Visitas guiadas al IER-UNAM, visitando el HoSIER y PSTFAR. Primer semestre de 2015.

3.4.1.2 Conferencias de divulgación

Se han impartido una serie de conferencias de divulgación para diversos públicos por parte de los académicos participantes en el proyecto entre las cuales están:

- 1. Conferencia "Energía Solar". Camilo Alberto Arancibia Bulnes, 21 de marzo de 2012, Secundaria Nuevos Horizontes, Hermosillo, Sonora.
- Conferencia "Energía Solar y el Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química solar". Dr. Claudio Estrada Gasca. Instituto de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP, Marzo 29, 2012.
- 3. "Investigación realizada en la coordinación de concentración solar", Heidi Isabel Villafán Vidales, abril de 2012, Centro de Investigación en Energía, UNAM.
- 4. "Combustibles solares limpios a partir de energía solar concentrada", Heidi Isabel Villafán Vidales, 29 de junio del 2012, Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- 5. Conferencia "Laboratorio nacional de sistemas de concentración solar y química solar". Camilo Arancibia Bulnes, 22 de octubre de 2012, dentro de la 19a Semana Nacional de Ciencia y Tecnología, Universidad del Valle de México, Campus Hermosillo.
- Conferencia Magistral "La Energía Solar en el Noroeste de México". Dr. Claudio Estrada Gasca. VII Cátedra Nacional CUMEX de Biología 2012 "Dr. Juan Luis Cifuentes Lemus: Ecología y Conservación de las Zonas Áridas". Consorcio de Universidades Mexicanas Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Ciudad Juárez, Chih., Septiembre 5, 2012.
- 7. Conferencia "Energía sustentable para todos". Camilo Alberto Arancibia Bulnes, 13 de noviembre de 2012, dentro de la Feria Científica 2012, Facultad de Ingeniería de la UADY, Mérida, Yucatán.
- Conferencia "Campo de Helióstatos, Importancia de la Energía Solar en Sonora". Camilo Alberto Arancibia Bulnes, Jesús Horacio Pacheco Ramírez y Rafael Enrique Cabanillas López, 12 de abril de 2013, dentro del Congreso Estudiantil de Ingeniería, AXIS 2013, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora.
- 9. "Energía solar". Camilo Arancibia Bulnes, 23 de octubre de 2014, dentro del "Café Científico", realizado en el café L'arrosoir d'Arthur, Cuernavaca, Morelos, organizado por Instituto de Energías Renovables, UNAM.
- 10. "Tecnologías de aprovechamiento de la energía solar". Dr. Claudio Estrada Gasca. División de Ingeniería Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora. Enero 23, 2013.
- 11. "Tecnologías de aprovechamiento de la energía solar". Dr. Claudio Estrada Gasca. Estación Regional del Noroeste. Instituto de Geología UNAM. Hermosillo, Sonora. Enero 23, 2013.
- 12. "Producción de combustibles limpios con energía solar concentrada", Heidi Isabel Villafán Vidales, 14 Marzo 2013, Universidad Politécnica del Estado de Guerrero.
- 13. "Energía y Cambio Climático". Dr. Claudio Estrada Gasca. Coloquio de Planeación y Desarrollo Energético en Sonora. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora. Abril 18, 2013.
- 14. "Investigación en Concentración Solar". Dr. Claudio Estrada Gasca. Seminarios de la Dirección del Instituto de Energías Renovables UNAM. Temixco, Morelos, Septiembre 13, 2013.
- 15. "El Culto al Sol". Dr. Claudio Estrada Gasca. Seminario Permanente: Fronteras Teórico-Conceptuales y Metodológicas en los Estudios Urbanos, del Ambiente y el Territorio. Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Gto., Septiembre 26, 2013.
- 16. "Concentración Solar". Dr. Claudio Estrada Gasca. Seminario del Programa de Posgrado en Ingeniería, área Energía, IER, Octubre 7, 2013.

- 17. "Tecnologías de aprovechamiento de la energía solar". Dr. Claudio Estrada Gasca. Seminarios de la LIER UNAM. Temixco, Morelos. Octubre 19, 2013.
- 18. "Tecnologías de aprovechamiento de la energía solar", Primer ciclo de Divulgación científica, 16 noviembre 2013.
- 19. "Producción de combustibles solares", Heidi Isabel Villafán Vidales, Universidad Autónoma de Nayarit 26 de noviembre 2013.
- 20. Conferencia "Aplicaciones de la concentración de energía en el IER". Dr. Claudio Estrada Gasca. XV Aniversario de CIICAP, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Marzo 21, 2014.
- "Concentración Solar en el IER", Heidi Isabel Villafán Vidales, 14ª Escuela de Investigación en Energía. 21 al 25 de Abril de 2014. Instituto de Energías Renovables. Universidad Nacional Autónoma de México.
- 22. Conferencia "La investigación en química solar de alta temperatura en México". Dr. Claudio Estrada Gasca. . XXXV Encuentro Nacional "La Interdisciplinariedad en la Ingeniería Química" Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química, A.C, Mayo 6-9, 2014.
- 23. "Combustibles solares", Heidi Isabel Villafán Vidales, VIII Jornadas Académicas de Ingeniería Química. 19 al 22 de Marzo de 2014. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- 24. "Combustibles solares", Heidi Isabel Villafán Vidales, XXX Semana de la Ingeniería Química y del 5to encuentro de Ingeniería Mecánica. 6 al 9 de Mayo de 2014. Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- 25. "Combustibles solares", Heidi Isabel Villafán Vidales, Seminarios de la Licenciatura en Energías Renovables (LIER). 28 de octubre de 2014. Instituto de Energías Renovables. Universidad Nacional Autónoma de México.
- "Termosolar", Heidi Isabel Villafán Vidales, Congreso Nacional de Estudiantes de Energías Renovables, 3-5 noviembre del 2014. Instituto de Energías Renovables. Universidad Nacional Autónoma de México.

3.4.1.3 Reportajes y entrevistas

También se han realizado reportajes y entrevistas con medios masivos de comunicación.

- Exportando al sol. El aprovechamiento de la energía solar en Sonora. Publicado el 8 enero 2015. Noticias Telemax, Hermosillo, Sonora. Con la participación de: Dr. Rafael Cabanillas López, Dr. Fernando Hinojosa Palafox, M.C. Cuitlahuac Iriarte Cornejo, M.C. Ramiro Calleja, Dr. Ricardo Rodrígez Carbajal, Dr. José Manuel Ochoa de la Torre. <u>https://www.youtube.com/watch?v=K-zNQI PX8k</u>
- Entrevista para la Gaceta SI UNAM número 85, en la sección "Por mi raza". Dr. Claudio A. Estrada Gasca.Ciudad Universitaria, México, D.F., Febrero 2012.
- Entrevista para la serie documental CIENCIA EN MÉXICO, del Canal 11 de televisión. Con el tema Cambio Climático y Energía. Dr. Claudio A. Estrada Gasca. Trasmitida al aire el 9 de diciembre del 2013 a las 20:00 hrs.
- "Generación eléctrica mediante la concentración solar". Entrevista en el programa "Despertar con ciencia y tecnología" de la Radio de la Universidad Autónoma de Morelos, 106.1 FM. Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes. 5 de septiembre de 2014, Cuernavaca, Morelos.
- Entrevista para la nota: "Proyecto CETOC, un campo experimental de tecnología solar" por Mariana Dolores. Academia Mexicana de Ciencias, Boletín AMC/182/14. Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes. Fecha: 26 de mayo de 2014. Lugar: México, D.F.

http://www.comunicacion.amc.edu.mx/comunicados/proyecto-cetoc-un-campo-experimental-detecnologia-solar/.

3.4.1.4 Artículos de divulgación

 "La energía solar concentrada. Parte 1: pasado", Camilo Arancibia Bulnes, Claudio Estrada Gasca. Revista Nuestra Tierra, no. 17, pp. 10-12 (Estación Regional del Noroeste, Universidad Nacional Autónoma de México, 31 de junio de 2012).

3.4.1.5 Páginas web

A partir de las dos versiones previas de páginas web del LACYQS que se habían desarrollado (<u>http://lacyqs.cie.unam.mx</u>, , se ha creado una página unificada para el proyecto. En esta página se busca reflejar toda la información de las instalaciones del LACYQS, su descripción y equipamientos, así como la productividad académica y servicios a la industria. <u>http://www.concentracionsolar.org.mx/</u>

3.4.2 Vinculación

El proyecto de LACYQS, enmarca varios resultados importantes de vinculación, que se han derivado en el Campo Experimental de Torre Central CEToC (antes CPH), en este proyecto se han desarrollado varias tecnologías que se han protegido por medio de solicitudes de patentes. De estas solicitudes de patentes que se han generado, se ha buscado poder transferirlas al sector productivo para que impacten en el desarrollo económico y generen impactos de mitigación de gases efecto invernadero, pues al adoptarlas se dejan de consumir combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica.

En este sentido, la tecnología que se ha logrado transferir a una empresa local dedicada al sector automotriz, donde su expertise es el trabajo de la metalmecánica, es la de estructuras de seguimiento solar de dos ejes, con la cual esta empresa abre una unidad de negocio dedicada a la fabricación de estructuras fijas y de seguimiento solar para atender el mercado Fotovoltaico y de concentración solar de potencia, ya que sirve para ambas tecnologías solares.

Como lo muestra la Figura 3.4.2, el crecimiento del mercado a largo plazo se verá impulsado por los mercados con una alta demanda de electricidad y la creciente presión para diversificar la generación de energía a partir de fósiles, debido al cambio climático y el aumento de precios de los combustibles. (Apricum solar market model, 2013). Valor del mercado mundial a 2020: 139,105 MDD.





Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa



Figura 3.4.3. Mercado LATAM.

Los mercados emergentes, entre ellos LATAM, ganarán participación significativa en el futuro mapa del mundo PV. (Apricum, 2013). Valor del mercado Latinoamericano a 2015: 1,629 MDD.



Figura 3.4.4. Cadena de Valor de Plantas Fotovoltaicas.

Derivado del contexto anterior el LACYQS se ha planteado el siguiente modelo de vinculación Empresa-Academia, donde se describen las líneas de acción en la parte central del marco conceptual, con los siguientes elementos, Transferencia de tecnología, Diseño a la Medida, Investigación y Desarrollo y Joint-Venture.

Estas líneas de acción desprenden las siguientes actividades que son:

- Transferencia de tecnología.- mediante licenciamientos y capacitación a empresas mexicanas y extranjeras
- Diseño a la Medida.- de productos y procesos de empresas mexicanas y extranjeras
- Investigación y Desarrollo.- para generar conocimiento de frontera enfocado en la innovación

 Joint-Venture.- alianzas en entre empresas y/o entre investigadores que generen empresas de base tecnológica



Figura 3.4.5. Modelo conceptual de Vinculación Empresa-Academia

En el proyecto LACYQS II se ha generado también como resultado la participación del equipo de trabajo en el proyecto "Producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados P03" del Proyecto Nacional Centro Mexicano en Innovación en Energía Solar, que se alberga en la instalación del CEToC, del cual se han tenido buenos resultados como se describen a continuación.

El proyecto "Producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados" (P03) esta siendo financiado por el programa Centros Mexicanos de Innovación en Energía Solar del Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética SENER - CONACyT, por lo que el objetivo final es el de crear innovaciones a partir de la investigación en las tecnologías del estado del arte. Los principales logros del proyecto hasta ahora, tienen que ver con la integración de equipos de trabajo multidisciplinarios de diferentes instituciones, y la generación de propiedad industrial reflejada en solicitudes de patentes, así como la integración de empresas en desarrollo en la industria solar que generan mayores oportunidades de llevar los resultados del proyecto a la explotación comercial.

Esas oportunidades se reflejan en la apropiación de los derechos de explotación de las tecnologías a través de contratos de licenciamiento, y en la formación de clústeres tecnológicos que están permitiendo hacer asociaciones estratégicas entre dichas empresas para la producción en conjunto de distintos componentes. En lo anterior, destaca la asociación formada entre Rehnu Co., compañía estadounidense asociada a la Universidad de Arizona a través del licenciamiento de las tecnologías ópticas de concentración, y la empresa Manufactura y Servicio SOGO Hermosillo S.A. de C.V., empresa mexicana que licenció tecnologías de seguimiento solar a la Universidad de Sonora. A raíz de las colaboraciones emprendidas en el proyecto, se acordó que la empresa mexicana producirá seguidores solares que se integrarán en los sistemas de la compañía estadounidense, con grandes ventajas para las partes involucradas.

Este proyecto es conformado por expertos de diferentes áreas de la Universidad de Sonora, la UNAM y la Universidad de Arizona; quienes trabajan en el desarrollo de distintos componentes para lograr una solución tecnológica para la producción de electricidad, a través de la concentración fotovoltaica en principio y concentración solar para celdas multiuniones y foto-termoiónicas en las últimas etapas del proyecto.

El equipo de trabajo de la Universidad de Arizona, liderado por el Dr. Roger Angel, está conformado por científicos e ingenieros especializados en ingeniería óptica, quienes desarrollaron una tecnología de concentración solar formada por 3 etapas, con capacidad de concentración de hasta 10,000 soles. La innovación del arreglo óptico radica en el proceso de canteo de la superficie reflectora, el cual logra calentar vidrios "de ventana" por debajo del punto de fusión para tomar la forma de una superficie parabólica. Este vidrio canteado es después platinado para formar un espejo curvo en cuyo foco se colocan 2 etapas más que permiten distribuir la radiación solar de manera equitativa en un arreglo de celdas fotovoltaicas de tripe unión, para la producción de electricidad. La tecnología de concentración fue patentada y los derechos transferidos a la empresa Rehnu Co.

Por otro lado, el equipo de trabajo del Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora, liderado por el Dr. Rafael Cabanillas, está encargado de diseñar un sistema de control de temperaturas para las celdas solares, con la finalidad de extraer el calor excedente en aplicaciones donde se requiere electricidad y calor de proceso como serian, la industria hotelera, la industria, automotriz y aeroespacial.

Otro equipo liderado por el Dr. Ricardo Rodríguez del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Sonora, trabaja en el desarrollo de seguidores solares para el proyecto, con la directiva de reducir los costos mediante diseños desarrollados para manufactura en serie. La estrategia de diseño fue ideada para producir los mayores resultados de propiedad industrial transferible al sector productivo, dando como resultado 2 solicitudes de patente: Mecanismo de seguimiento solar de dos ejes operado con actuadores lineales para paneles de alta concentración y planos (MX/a/2014/012221) y Seguidor solar de dos ejes movido por mecanismos de rodillos de fricción (MX/a/2015/000932). El mismo equipo trabaja en la integración de componentes para la interconexión de los sistemas en la red eléctrica y redes de recirculación de agua caliente.

Con respecto al desarrollo de celdas solares de alta eficiencia, el equipo liderado por el Dr. Rafael García del Departamento de Investigación en Física de la Universidad de Sonora, esta trabajando en el desarrollo de celdas multiuniones basada en InxGa1-xN y foto-termoiónicas, las cuales tendrán la capacidad de producir electricidad tanto por el efecto fotovoltaico, como por el efecto termoiónico, teniendo el efecto combinado eficiencias de hasta 40% teóricas. Una solicitud de patente fue tramitada bajo el título generador foto-termoiónico para la medición de materiales semiconductores (MX/a/2015/000930).

Por último, el equipo de trabajo del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, liderado por el Dr. Camilo Arancibia, está trabajando en sistemas de monitoreo y evaluación de la calidad del seguimiento solar y de producción de energía, los cuales serán utilizados para la validación del sistema integrado. Como resultado del trabajo de personal de la UNAM en el CEToC, se ha venido colaborando en el desarrollo de componentes con la empresa Pirámide Estructural del Golfo, S.A. de C.V., misma que ya tenía contacto previo con el CCADET-UNAM. Fruto de esta vinculación es el desarrollo del cabezal "Cero Juego" para helióstatos; tecnología 100% mexicana. Actualmente se está sometiendo una patente para dicho dispositivo, donde la titularidad de los derechos es la UNAM y que una vez otorgada se buscará sean adquiridospor la empresa Pirámide, para que esta desarrolle la producción de dicho producto.

Por último, se considera de vital importancia para el proyecto la participación de empresas privadas en el mismo, para aumentar las posibilidades de formar una clúster que integre la cadena de suministro de proyectos en la naciente industria solar del noroeste del país. Se firmaron convenios con empresas como Manufactura y Servicios SOGO Hermosillo S.A. de C.V. quienes participan en el desarrollo de estructuras para seguidores solares; AIISA Automation S.A. de C.V. quienes participan en la integración de sistemas de control para seguidores solares y para sistemas de enfriamiento y Rehnu Co., empresa estadounidense que participa en el desarrollo de tecnologías ópticas de concentración.

Por otro lado la cadena de valor de la tecnología de Concentración Solar de Potencia la dibujamos de la siguiente manera:



Figura 3.4.6. Cadena de Valor de Plantas Termosolares.

Para la construcción de una planta piloto operativa con interconexión a red, tenemos desarrolladas tecnologías, además de diseño de productos, metodologías y know-how. Contamos con la creación de propiedad industrial transferible a compañías internacionales. Se puede ofrecer venta de electricidad producida mediante porteo. Siendo el valor del mercado mundial de termosolar en 2020: 15,477 MDD

De este mercado aproximadamente 12% del costo total de una planta termosolar de torre central, lo tiene el receptor solar, los receptores solares se pueden aplicar a producción eléctrica y calor de proceso. De esta tecnología contamos con prototipos virtuales y modelación matemática, además de nuestro primer calorímetro que se instalo en el CEToC.

Aproximadamente el 34% del costo total de una planta termosolar de torre central, lo llevan la tecnología de seguimiento solar, contamos entre la UNISON-UNAM con una amplia experiencia en desarrollo de heliostatos con prototipos funcionales. Se ha tenido interés de compañías internacionales por los diseños instalados en la Plataforma Solar Hermosillo. Se cuenta con 5 patentes en trámite para estas tecnologías. A continuación se listan algunas de las patentes registradas ante el IMPI

3.4.3 Solicitudes de patente

Debido a la importante componente que ha habido en el proyecto de desarrollo de equipos especiales por las mismas instituciones involucradas, se ha podido someter una cantidad importante de solicitudes de patente; en particular, de los sistemas desarrollados para el CEToC. Esto se lista en la tabla 3.4.3.

Título de solicitud de patente	Solicitante	Inventor	Presentació n de solicitud	Expediente	Departamento	Status actual
Sistema de heliostatos inalámbricos y método de control	Universidad de Sonora	Christian Dávila Peralta	21/10/2011	MX/a/2011/011143	Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas	Publicado en Gaceta en Abril de 2013 y en espera de resolución de examen de fondo
Heliostato con mecanismos para canteo de espejos y movimiento de elevación	Universidad de Sonora	Christian Dávila Peralta	21/10/2011	MX/a/2011/011144	Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas	Publicado en Gaceta en Abril de 2013 y en espera de resolución de examen de fondo
Helióstato y matriz de helióstatos	Universidad de Sonora	Jesús Horacio Pacheco Ramírez, Víctor Hugo Benítez Baltazar, Víctor Manuel Herrera Jiménez, Héctor Mario Ramírez Ponce de León	17/08/2012	MX/a/2012/009939	Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas	Publicado en Gaceta en Febrero de 2014 y en espera de resolución de examen de fondo
Sistema de control digital aplicado al seguimiento solar de helióstatos	Universidad de Sonora	Víctor Hugo Benítez Baltazar, Jesús Horacio Pacheco Ramírez y Carlos Anaya Eredias	10/09/2012	MX/a/2012/010951	Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas	Publicado en Gaceta en Febrero de 2014 y en espera de resolución de examen de fondo
Secador solar flexible con colector inflable	Universidad de Sonora	Rafael Enrique Cabanillas López	03/12/2013	MX/a/2013/014683	Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia	En espera de publicación y entrada a examen de fondo
Método de compensación dinámica de deriva para heliostatos	Universidad de Sonora	Cuitláhuac Iriarte Cornejo, Rafael Enrique Cabanillas López, Camilo Alberto Arancibia Bulnes	03/12/2013	MX/a/2013/014689	Centro de Investigación en Energía UNAM Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia	En espera de publicación y entrada a examen de fondo
Mecanismo de seguimiento solar de dos ejes operado con actuadores lineales para paneles de alta concentración y planos	Universidad de Sonora	Christian Dávila Peralta, Víctor Manuel Herrera Jiménez, Ricardo Alberto Rodríguez Carvajal	24/09/2014	MX/a/2014/012221	Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas	En espera de aprobación de examen de forma

Generador foto- termoiónico para la medición de materiales semiconductores	Universidad de Sonora	Rafael García Gutiérrez, Jorge Arturo Montes Gutiérrez, Marcelino Barboza Flores, Frank Romo García, Christian Dávila Peralta, Ricardo Rodríguez Carvajal	12/10/2014	En espera de asignación de número de expediente	Centro de Investigación en Física de la Universidad de Sonora	En espera de aprobación de examen de forma
Seguidor solar de dos ejes movido por mecanismos de rodillos de fricción	Universidad de Sonora	Pablo Sosa Flores y Rafael Enrique Cabanillas López	12/10/2014	En espera de asignación de número de expediente	Campo de Pruebas de Heliostatos	En espera de aprobación de examen de forma
Cabezal de seguimiento cero juego	Universidad Nacional Autónoma de México	Gabriel Ascanio Gasca, Gerardo Antonio Ruiz Botello, Camilo Alberto Arancibia Bulnes, Claudio Alejandro Estrada Gasca, Roberto Reséndiz Núñez	6/05/2015	En espera de asignación de número de expediente	Instituto de Energías Renovables y Centro de Ciencia Aplicada y Desarrollo Tecnológico	En espera de aprobación de examen de forma

Secador solar inflable flexible con colector inflable

Descripción:

Calentador solar de aire para el secado de productos, contiene un colector flexible e inflable, el cual puede ser doblado y embalado para su fácil manejo y transporte. Un sistema de ventilación forzada hace fluir el aire por los canales expuestos a la radiación solar, el aire caliente se canaliza hacia donde es requerido, como puede ser un sistema de secado solar. El producto puede ser fabricado en varias presentaciones según el calor requerido.

Inventor:

Dr. Rafael Enrique Cabanillas Lopez *Estatus de propiedad industrial:* Solicitud de Patente MX/a/2013/014683



Heliostato y matriz de heliostatos

Descripción:

Mini heliostato con movimiento altazimutal, conteniendo elementos en su transmisión que le permiten adaptarse a cualquier tipo de motor. No requiere retroalimentación para su posición. El mantenimiento es mínimo, y en caso de presentarse alguna falla el impacto es mínimo debido a la segmentación de la superficie reflectora en una matriz. El sistema de control es muy económico debido a la reducción del tamaño. *Inventores:*

M.C. Jesús Horacio Pacheco Ramírez, Dr. Víctor Hugo Benítez Baltazar, M.C. Víctor Manuel Herrera Jiménez, Héctor Mario Ramírez Ponce de León

Estatus de propiedad industrial:

Solicitud de Patente MX/a/2012/009939



<u>Sistema de control digital aplicado al seguimiento solar de helióstatos</u> *Descripción:*

Sistema de control digital para el seguimiento solar en aplicaciones de seguidores y heliostatos. El sistema emplea un microcontrolador, embebiendo un algoritmo matemático que calcula la posición del sol, mediante un control de laso abierto no requiriendo sensores. Puede ser instalado directamente en el seguidor, proveyendo robustez para resistir las condiciones medioambientales.

Inventores:

Dr. Víctor Hugo Benítez Baltazar, M.C. Jesús Horacio Pacheco Ramírez y Dr. Carlos Anaya Eredias *Estatus de propiedad industrial:*

Solicitud de Patente MX/a/2012/010951



Sistema de heliostatos inalámbricos y método de control

Descripción:

La tecnología se refiere a un heliostato que es manejado por servomotores integrados, que contiene un nano PLC, el cual es programado para controlar mecanismos de seguridad o dispositivos de limpieza, y de comunicación. Cada servo motor integra una tarjeta de comunicación inalámbrica Zigbee, la cual se comunica a través de una red en malla con otros heliostatos en el campo y con la computadora central, la cual controla el movimiento de todos los heliostatos con un sistema SCADA.

Inventores:

Ing. Christian Dávila, EDS. *Estatus de propiedad industrial:* Solicitud de Patente MX/a/2011/011143



Heliostato con mecanismos para canteo de espejos y movimiento de

Descripción:

Heliostato inteligente con producción propia de energía mediante panel fotovoltaico. Cuenta con sistema de servomotores integrados con sistema de comunicación inalámbrica Zigbee, Wifi o Bluetooth. El sistema integra un mecanismo de canteo puntual de los espejos para moldearlos a la forma requerida, con canteo en dos dimensiones. El sistema de elevación integra un mecanismo viela-manivela con un actuador lineal. No requiere infraestructura eléctrica debido a su característica completamente inalámbrico.

Inventores:

Ing. Christian Dávila, EDS. *Estatus de propiedad industrial:* Solicitud de Patente MX/a/2011/011144



Método de compensación dinámica de deriva para heliostatos

Descripción:

Método para compensar la deriva en la imagen proyectada del sol, producida por distintos factores como canteo, nivelación, orientación, deformaciones estructurales, etc. El método consiste en un compensador dinámico para controlar la falta de precisión, basado en una función polinomial estática de tercer orden; la cual se agrega al algoritmo de control de las impresiciones del seguimiento. El sistema funciona tanta para heliostatos como para seguidores solares.

Inventores:

M.C. Cuitláhuac Iriarte Cornejo, Dr. Rafael Enrique Cabanillas López, Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes *Estatus de propiedad industrial:*

Solicitud de Patente MX/a/2011/011144



Cabezal de seguimiento cero juego

Descripción:

Esta invención es un dispositivo mecánico que se aplica principalmente al sector de la energía solar, ya que es un mecanismo capaz de orientar dispositivos que aprovechan la energía de la radiación solar de forma que aquellos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares, siguiendo al sol, sin juego, desde el Este en la alborada hasta el Oeste en la puesta, sin ser limitativo. Dicho mecanismo también se aplica en el seguimiento astral, utilizándolo para guiar telescopios en el sector de la instrumentación astronómica, así como en el de las telecomunicaciones; en antenas receptoras y emisoras de señales electromagnéticas, como los radares.

Inventores:

Gabriel Ascanio Gasca, Gerardo Antonio Ruiz Botello, Camilo Alberto Arancibia Bulnes, Claudio A. Estrada Gasca, Roberto Reséndiz Núñez

Estatus de propiedad industrial:

En espera de aprobación de examen de forma

4 Conclusiones

El desarrollo del proyecto LACYQS Segunda Etapa ha permitido la consolidación del Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar.

Con relación a las actividades y metas comprometidas, se considera que el proyecto se ha concluido exitosamente en un 90%, faltando solamente terminar la instalación y prueba de algunas componentes. Esto no implica una afectación al proyecto, ya que se tienen todos los insumos necesarios para terminar las actividades que no se han cubierto durante los próximos 3 meses.

Entre los principales logros que se han obtenido con este proyecto, se puede mencionar que:

- Se ha logrado transformar al horno solar de alto flujo radiativo HoSIER en el primer laboratorio de termoquímica solar de alta temperatura de America Latina, estableciendo una infraestructura en México que es comparable a los mejores laboratorios en su tipo en el mundo.
- Se ha establecido el equipo humano y la infraestructura básica del campo experimental de torre central, repotenciado el campo de pruebas de helióstatos. Esta instalación, como la anterior, es única en America Latina, aunque ya inician esfuerzos similares en otros países como Chile y Brasil.
- Se ha establecido el equipamiento básico del laboratorio de sistemas fotovoltaicos con concentración solar, habiéndose desarrollado equipos novedosos que permiten el estudio de estas tecnologías. Estas instalaciones, como las anteriores, son las primeras en el país.
- Se ha establecido una red amplia de grupos de investigación en la temática de LACYQS (18 entidades académicas nacionales y 4 internacionales).
- Se ha generado nuevo conocimiento que ha dado origen a una cantidad importante de artículos en revistas del SCI (20), en revistas no indizadas (8) y en memorias de congresos (16).
- Se han formado recursos humanos en los niveles de licenciatura (14), maestría (7) y doctorado (6).
- Se tiene un número importante de patentes solicitadas (10) sobre desarrollos tecnológicos surgidos del proyecto.
- Se ha desplegado una importante labor de divulgación sobre las actividades de LACYQS, tanto en medios impresos como en la realización de entrevistas radiofónicas y videos, así como conferencias impartidas y visitas a las instalaciones.

Finalmente, los esfuerzos desplegados en este proyecto están coadyuvando al establecimiento de una industria nacional en el ramo. Por todo lo anterior, se considera que los principales objetivos del proyecto LACYQS Segunda Etapa se han cumplido plenamente.

Apéndices

A1. Informes Técnicos Parciales

Se presentan los informes parciales 1 y 2 de LACYQS II

A2. Publicaciones

Se enlistan las publicaciones llevadas a cabo a la fecha dentro del proyecto:

Artículos en revistas internacionales indizadas: 20

- Transient heat transfer simulation of a 1 kWth moving front solar thermochemical reactor for thermal dissociation of compressed ZnO. H.I. Villafán-Vidales, S. Abanades, M. Montiel-González, H. Romero-Paredes, C.A. Arancibia-Bulnes, C.A. Estrada. Chemical Engineering Research and Design 93, 174–184 (2015).
- [2] Solar production of WO3: a green approach. H.I. Villafán-Vidales, A. Jiménez-González, A. Bautista-Orozco, C.A. Arancibia-Bulnes, C.A. Estrada. Green Processing and Synthesis 4(3), 167-177 (2015).
- [3] Theoretical and experimental study of natural convection with surface thermal radiation in a side open cavity. M. Montiel-González, J.F. Hinojosa, H.I. Villafán-Vidales, A. Bautista-Orozco, C.A. Estrada. Applied Thermal Engineering 75, 1176-1186 (2015).
- [4] Correction of the concentrated sunlight spot's drift of the IER-UNAM's Solar furnace. R. Pérez-Enciso, E. Brito-Bazan, C. A. Perez-Rábago, C. A. Arancibia-Bulnes, D. Riveros-Rosas, C. A. Estrada. Applied Thermal Engineering 75, 1187-1191 (2015).
- [5] First experimental studies of solar redox reactions of copper oxides for thermochemical energy storage. E. Alonso, C. Pérez-Rábago, J. Licurgo, E. Fuentealba, C.A. Estrada. Solar Energy 115, 297-305 (2015).
- [6] Synthesis of silicon carbide using concentrated solar energy. L.G. Ceballos-Mendivil, R.E. Cabanillas-López, J.C. Tánori-Córdova, R. Murrieta-Yescas, C.A. Pérez-Rábago, H.I. Villafán-Vidales, C.A. Arancibia-Bulnes, C.A. Estrada. Solar Energy 116, 238–246 (2015).
- [7] Improving parabolic trough mirror module qualification by FOCuS tool. M. I. Peña-Cruz, C. A. Arancibia-Bulnes, A. Monreal Vidal, M. Sánchez González. Journal of Renewable and Sustainable Energy 6, 013118 (2014).
- [8] Developing a mini-heliostat array for a solar central tower plant: a practical experience. V. H. Benítez Baltazar, J. H. Pacheco Ramírez, N. Pitalúa Díaz. Journal of Intelligent Automation and Soft Computing 20 (2), 263-277 (2014).
- [9] Compensation of heliostat drift by seasonal sampling. C. Iriarte-Cornejo, C. A. Arancibia-Bulnes, I. Salgado-Transito, J. Waissman, R. E. Cabanillas, C. A. Estrada. Solar Energy 105, 330-340 (2014).
- [10] Heliostat image drift behavior for different error sources. M. Escobar-Toledo, C. A. Arancibia-Bulnes, C. Iriarte-Cornejo, J. Waissman, D. Riveros-Rosas, R. E. Cabanillas, C. A. Estrada. Journal of Renewable and Sustainable Energy 6, 023117 (2014).

- [11] Test of turbulence models for natural convection in an open cubic tilted cavity, A. Piña-Ortiz, J. F. Hinojosa, V. M. Maytorena, International Communications of Heat and Mass Transfer 57, 264-273 (2014).
- [12] Enhanced mineralization of atrazine by means of photodegradation processes using solar energy at pilot plant scale. A. Pineda Arellano, A. Jiménez González, S. Silva Martínez, I. Salgado-Tránsito, C. Pérez Franco. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 272, 21-27 (2013).
- [13] Numerical study of the Boussinesq approach validity for natural convection and surface thermal radiation in an open cavity. M. Montiel Gonzalez, J. Hinojosa Palafox, C. Estrada Gasca. Revista Mexicana de Física 59, 594–605 (2013).
- [14] Transicion energética, energías renovables y energía solar de potencia. C. A. Estrada Gasca. Revista Mexican de Física S 59, 75-84 (2013).
- [15] Experimental evaluation and modeling of internal temperatures in an air gap membrane distillation unit. U. Dehesa-Carrasco, C. A. Pérez-Rábago, C. A. Arancibia-Bulnes. Desalination 326, 47–54 (2013). doi: 10.1016/j.desal.2013.07.014
- [16] Assessment of a polymeric reflective coating for high concentration point focus applications. D. Riveros-Rosas, R. Castrejón-García, C. A. Arancibia-Bulnes, C. A. Pérez-Rábago, C. A. Estrada-Gasca. Journal of Renewable and Sustainable Energy 4, 063140 (2012).
- [17] Radiative heat transfer analysis of a directly irradiated cavity-type solar thermochemical reactor by Monte-Carlo ray tracing. H.I. Villafán-Vidales, S. Abanades, C.A. Arancibia-Bulnes, D. Riveros-Rosas, H.Romero-Paredes, G. Espinosa-Paredes, C.A. Estrada. Journal of Renewable and Sustainable Energy 4, 043125 (2012).
- [18] Optimal performance assessment for a photo-Fenton degradation pilot plant driven by solar energy using artificial neural networks. A. Bassam, I. Salgado-Tránsito, I. Oller, E. Santoyo, A.E. Jiménez, J.A. Hernandez and A. Zapata. International Journal of Energy Research 36, 1314–1324 (2012).
- [19] Photon Absorption in a Hybrid Slurry Photocatalytic Reactor: Assessment of Differential Approximations, S. L. Orozco, H. I. Villafán-Vidales, C. A. Arancibia-Bulnes, AIChE Journal 58(10), pp. 3256-3265
- [20] Experimental and numerical study of turbulent natural convection in an open cubic cavity. V. M. Maytorena, A. Piña-Ortiz, J. F. Hinojosa, Heat and Mass Transfer, art. 1492 (2015), DOI: 10.1007/s00231-014-1492-0.

Artículos en revistas internacionales arbitradas no indizadas: 8

- Beam Solar Irradiation Assessment for Sonora, Mexico. C. A. Arancibia-Bulnes, R. Peón-Anaya, D. Riveros-Rosas, J.J. Quiñones, R. E. Cabanillas, C.A. Estrada. Energy Procedia 49, 2290-2296 (2014). doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.242
- [2] Dynamic Drift Compensation for Heliostats. C. Iriarte-Cornejo, C. A. Arancibia-Bulnes, J. Waissman, R. E. Cabanillas, C. A. Estrada. Energy Procedia 49, 2109-2117 (2014). doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.223
- [3] Evaluation of Heliostat Field Global Tracking Error Distributions by Monte Carlo Simulations. L. A. Díaz-Félix, M. Escobar-Toledo, J. Waissman, N. Pitalúa-Díaz, C. A. Arancibia-Bulnes. Proceedings of

the SolarPACES 2013 Conference. Energy Procedia 49, 1308-1317 (2014). doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.140

- [4] Improving optical qualification of solar concentrator by FOCuS Tool. Manuel I. Peña-Cruz, Camilo A. Arancibia-Bulnes, Ana Monreal Vidal, David Pérez García, Alberto García de Jalón, Marcelino Sánchez González. Energy Procedia 57, 427–436 (2014). doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.196
- [5] The solar Resource Assessment in Mexico: State of Art. M. Valdes- Barrón, , D. Riveros-Rosas, C. A. Arancibia-Bulnes, R. Bonifaz. Energy Procedia 57, 1299-1308. doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.120
- [6] Three-dimensional analysis of solar radiation distribution at the focal zone of the solar furnace of IER-UNAM. R. Perez-Enciso, D. Riveros-Rosas, M. Sanchez, C.A. Pérez-Rabago, C.A. Arancibia-Bulnes, H. Romero-Paredes, C.A. Estrada. Energy Procedia 57, 3031–3040. doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.339
- [7] Synthesis and Characterization of Silicon Carbide in the Application of High Temperature Solar Surface Receptors. L.G. Ceballos-Mendivil, R.E. Cabanillas-López, J.C. Tánori-Córdova, R. Murrieta-Yescas, P. Zavala-Rivera, J.H. Castorena-González. Energy Procedia 57, 533-540 (2014).
- [8] Numerical study of heat transfer losses by mixed convection and surface thermal radiation in an open cavity receiver for a solar tower system. Armando Piña Ortiz, Jesús F. Hinojosa Palafox, Claudio A. Estrada Gasca. Energy Procedia 57, 467-476 (2014).

Artículos en memorias de congresos: 16

- [1] M. Escobar-Toledo, C. A. Arancibia-Bulnes, M. I. Peña-Cruz, D. Riveros-Rosas, R. Peón-Anaya, C. Iriarte-Cornejo, R. E. Cabanillas, C. A. Estrada. "Analysis of drift phenomena in heliostat images". Proceedings of the ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability & 10th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference, July 23-26, 2012, San Diego, CA, USA. Artículo 91187.
- [2] M. I. Peña-Cruz, C. A. Arancibia-Bulnes, C. Iriarte-Cornejo, R. E. Cabanillas, C. A. Estrada. "Heliostat characterization by optical techniques and image processing". Proceedings of the ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability & 10th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference, July 23-26, 2012, San Diego, CA, USA. Artículo 91143.
- [3] M. Escobar-Toledo, C. A. Arancibia-Bulnes, M. I. Peña-Cruz, C.A. Estrada, R. E. Cabanillas. "Analysis of heliostat image drift". Proceedings of the SolarPACES 2012 conference, septiembre 11-14, Marrakech, Marruecos. Artículo 25236.
- [4] H.I. Villafán-Vidales, S. Abanades, H. Romero-Paredes, C.A. Arancibia-Bulnes, M. Montiel-González, C.A. Estrada. "Heat Transfer Model of a 1 kWth Solar Reactor for Thermal Dissociation of ZnO and SnO2 Compressed Powders". Proceedings of the SolarPACES 2012 conference, septiembre 11-14, Marrakech, Marruecos. Artículo 24278.
- [5] M.I. Peña-Cruz, C.A. Arancibia-Bulnes, H.S. Abdul-Rahman. "Fringe Reflection Technique For Heliostats - A Comparison Between Two Phase Retrieval Methods". Proceedings of the SolarPACES 2012 conference, septiembre 11-14, Marrakech, Marruecos. Artículo 24179.
- [6] C. A. Estrada, R. Pérez-Enciso, D. Riveros-Rosas, C. A. Pérez-Rábago, C. A. Arancibia-Bulnes "Calculation and Measurement of Solar Concentration Profiles for the High Radiative Solar Furnace of CIE-UNAM". Proceedings of the SolarPACES 2012 conference, septiembre 11-14, Marrakech, Marruecos. Artículo 24713.
- [7] R. Perez-Enciso, E. Brito, C. A. Arancibia-Bulnes, D. Riveros-Rosas, C. A. Perez-Rábago, J.J. Quiñonez, C. A. Estrada. "Correction of the concentrated sunlight spot's drift of the CIE-UNAM's Solar Furnace". Proceedings of the SolarPACES 2012 conference, septiembre 11-14, Marrakech, Marruecos. Artículo 24372.

- [8] N. Pitalúa-Díaz, V. Benítez, J. Pacheco-Ramírez. Stepper motor modeling and control design for a 1.5 square meters heliostat prototype. Publicado en la memorias del World Automation Congress (WAC), IEEE Explore, digital library, 2012.
- [9] M. Escobar-Toledo, C. A. Arancibia-Bulnes, M. I. Peña-Cruz, C.A. Estrada Gasca, D. Riveros-Rosas, Cuitlauac Iriarte-Cornejo, Rafael E. Cabanillas. Análisis del fenómeno de la deriva en las imágenes de helióstatos. Memorias de la XXXVI Semana Nacional de Energía Solar, pp. (ANES, México, 2012).
- [10] L. Moreno-Álvarez, C. Pérez-Rábago, R. Pérez-Enciso, C. Estrada. Estudios calorimétricos para la medición de propiedades opto-térmicas en sólidos sujetos a altas temperaturas y altos flujos radiativos. Memorias de la XXXVIII Semana Nacional de Energía Solar y Congreso Iberoamericano de Energía Solar. Querétaro del 6 al 10 de Octubre de 2014.
- [11] I. Moreno-Cruz, C.A. Arancibia-Bulnes, C. Iriarte-Cornejo, M.I. Peña-Cruz. Canteo y evaluación de helióstatos mediante reflexión de patrones. Memorias de la XXXVIII Semana Nacional de Energía Solar y Congreso Iberoamericano de Energía Solar (ANES, México, 2014). Art. 238.
- [12] C.A.Arancibia-Bulnes, D. E. Rodríguez-Sánchez, M. I. Peña-Cruz, C. Iriarte-Cornejo, C.A. Estrada, R.E. Cabanillas, J.F. Hinojosa. Evaluación del flujo radiativo concentrado por un grupo de helióstatos. Memorias de la XXXVIII Semana Nacional de Energía Solar y Congreso Iberoamericano de Energía Solar (ANES, México, 2014). Art. 234.
- [13] D. Riveros-Rosas, C.A. Arancibia-Bulnes, M. Sanchez, F.J. Ramirez. Analisis de distancias focales de hrlióstatos para modelación de sistemas de torre central. Memorias de la XXXVIII Semana Nacional de Energía Solar y Congreso Iberoamericano de Energía Solar (ANES, México, 2014). Art. 137.
- [14] E. Anguera, R. Pérez-Enciso, C.A. Pérez-Rábago, C.A. Arancibia-Bulnes, C.A. Estrada. Diseño y caracterización de prototipos de homogenizadores de alto flujo radiativo para el HoSIER. Memorias de la XXXVIII Semana Nacional de Energía Solar y Congreso Iberoamericano de Energía Solar (ANES, México, 2014).
- [15] Norma Rodríguez-Muñoz, N. A., Carlos A. Pérez-Rábago, Fernando Hinojosa-Palafox, Claudio A. Estrada. Transferencia de calor en receptores volumétricos para sistemas de energía solar térmica. Memorias de la XXXVIII Semana Nacional de Energía Solar y Congreso Iberoamericano de Energía Solar (ANES, México, 2014).
- [16] V.H. Benitez, J.H. Pacheco, R.V. Armas-Flores. Propuesta para la implementación de una red inalámbrica de sensores inteligentes para un sistema de concentración solar con tecnología de torre central. Memorias de la Quinta Conferencia Iberoamericana sobre Complejidad, Informática y Cibernética, pp.107-111.International Institute of informatics and systemics. 2015.

A3. Formación de Recursos Humanos

A continuación se enlistan los alumnos que se han graduado a la fecha y los que actualmente participan en el proyecto:

Tesis de Doctorado: 6

- Manuel Ignacio Peña Cruz, "Caracterización óptica de concentradores solares". Tesis de Doctorado en Ingeniería (Energía), Universidad Nacional Autónoma de México, 29 de mayo de 2015. Director de tesis: Camilo Alberto Arancibia Bulnes.
- Ricardo Arturo Pérez Enciso, "Caracterización óptica y térmica del horno solar del IER", Tesis de Doctorado en Ingeniería (Energía), Universidad Nacional Autónoma de México, 2015. Director de tesis: Claudio Alejandro Estrada Gasca.
- 3. Laura Guadalupe Ceballos Mendivil, "Síntesis y evaluación de carburo de silicio para aplicaciones en receptores solares volumétricos". Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, 2015. Universidad de Sonora. Director de tesis: Rafael Enrique Cabanillas López.
- 4. Armando Piña Ortiz, "Estudio teórico-experimental de la transferencia de calor en el receptor de un sistema termosolar de torre central". Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Sonora, febrero de 2015. Director de tesis: Jesús Fernando Hinojosa Palafox
- 5. Moisés Montiel González, "Transferencia de calor en un receptor de energía solar concentrada del tipo cavidad cúbica abierta", Tesis de Doctorado en Ingeniería (Energía), Universidad Nacional Autónoma de México, 31 julio de 2013. Director de tesis: Claudio Alejandro Estrada Gasca.
- Ulises Dehesa Carrasco, "Desarrollo de un sistema de desalinización de agua mediante destilación por membranas y calentamiento solar", Tesis de Doctorado en Ingeniería (Energía), Universidad Nacional Autónoma de México, 21 de agosto de 2013. Director de tesis: Camilo Alberto Arancibia Bulnes.

Tesis de Maestría: 7

- Isaías Moreno Cruz, "Evaluación óptica de canteo de helióstatos", Maestría en Ingeniería en Energía, UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México, Maestría en Ingeniería (Energía), enero de 2015. Director de tesis: Camilo Alberto Arancibia Bulnes.
- Pablo Sosa Flores, "Desarrollo de una metodología para el diseño y caracterización del u horno solar centrado en el eje con capacidad térmica de 1kW". Maestría en Ciencias de la Ingeniería (Ingeniería Química), Universidad de Sonora, enero de 2015. Director de tesis: Rafael Enrique Cabanillas López.
- 3. Militza Rosales Valles, "Diseño, puesta en operación y evaluación de un helióstato con facetas deformables". Universidad Nacional Autónoma de México, Maestría en Ingeniería (Energía), Septiembre de 2014. Director de tesis: Camilo Alberto Arancibia Bulnes.
- 4. Víctor Manuel Maytorena Soria, "Estudio teórico-experimental de la transferencia de calor conjugada en una cavidad cúbica abierta en régimen turbulento". Maestría en Ciencias de la Ingeniería (Ingeniería Química), Universidad de Sonora, junio de 2014. Director de tesis: Jesús Fernando Hinojosa Palafox.

- Estefanía Brito Bazán, "Optimización y puesta a punto del sistema de control SCADA para la operación del horno solar de altos flujos radiativos del CIE", Tesis de Maestría en Ingeniería (Mecánica, Mecatrónica), Universidad Nacional Autónoma de México, 8 febrero 2013. Directores de tesis: Claudio Estrada Gasca y Gabriel Ascanio Gasca.
- Cuitlahuac Iriarte Cornejo, "Automatización de sistema de control para campo de helióstatos", Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Chihuahua, 26 de abril de 2013. Directores de tesis: Javier Vega Pineda y Rafael Enrique Cabanillas López.
- 7. Danyela Samaniego Rascón, "Medición de los niveles de exposición a radiación solar concentrada en una instalación de aprovechamiento de energía solar tipo torre central para la estimación de riesgos a la salud", tesis de Maestría en Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora, 7 de diciembre de 2012. Directores de tesis: Jaime León Duarte y Camilo Arancibia Bulnes.

Tesis de Licenciatura: 14

- 1. Adriana Guadalupe Vázquéz Fernández, "Propuesta de un reactor tubular irradiado indirectamente", Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma de Nayarit, enero de 2015. Directora de tesis: Heidi Isabel Villafán Vidales.
- 2. José María Serrano Cornelio, "Estudios preliminares en el diseño de un reactor solar para la gasificación por vapor de coque de petróleo", Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Veracruzana, 8 de abril de 2015. Directora de tesis: Heidi Isabel Villafán Vidales.
- Rodrigo Rubí Nava, "Diseño y construcción de una cámara inerte para el Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar", tesis de Licenciatura en Ingeniería Industrial, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 5 de diciembre 2014. Directora de tesis: Heidi Isabel Villafán Vidales.
- 4. Gabriel R. Tiznado Palacio, "Establecimiento de la línea base de huella de carbono de los estudiantes de la Universidad de Sonora", Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Sonora, 27 de noviembre de 2014. Director de tesis: Rafael Enrique Cabanillas López.
- Isis Casandra Ortega Virrueta y Miguel Angel Zepeda Martínez, "Estudio de la adición de micropertículas de cobre sobre la conductividad térmica de fluido", Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Sonora, 20 de mayo de 2014. Director de tesis: Rafael Enrique Cabanillas López.
- Elberth Andrés Enríquez Montoya, "Control de Motores via Bluetooth", Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, Universidad de Sonora, 8 de febrero de 2013. Director de tesis: Victor Hugo Benítez Baltazar
- 7. Javier Alejandro Loroña, "Control de un helióstato con el sistema compaqRio", Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, Universidad de Sonora, 14 de junio 2013. Director de tesis: Jesús Horacio Pacheco Ramírez.
- 8. Luís Omar Lara Cerecedo. "Modelación de helióstatos en una instalación solar", tesina de Especialización en Desarrollo Sustentable, Universidad de Sonora, 12 de septiembre de 2013. Directores de tesis: Nún Pitalúa Díaz y Camilo Arancibia Bulnes.

- Gilberto Chávez López, "Implementación de algoritmos de control para helióstatos en tecnología de torre central", Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, Universidad de Sonora, 14 de junio de 2013. Director de tesis: Jesús Horacio Pacheco Ramírez.
- Javier Licurgo Pedraza. "Diseño, construcción y puesta en operación de una pantalla Lambertiana para el horno solar de alto flujo radiativo". Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Agosto de 2012. Directores de tesis: Claudio A. Estrada Gasca y Rosenberg J. Romero Domínguez.
- 11. Enrique Alejandro Enríquez Velazquez, "Sistemas de potencia de motores de corriente directa a partir de energía solar", Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, Universidad de Sonora, 16 de noviembre de 2012. Director de tesis: Victor Hugo Benítez Baltazar.
- 12. Leonel Reyes Ochoa, "Análisis y evaluación de parámetros característicos en la alineación de helióstatos planos para hornos solares de alto flujo radiativo", Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada-UNAM, febrero 2012, Director de tesis: Carlos Alberto Pérez Rábago, David Riveros Rosas.
- Héctor Iván González Camarillo, "Diseño, Construcción y Puesta en Operación de un Prototipo de Sistema de Control para Helióstatos de Torre Central", UPEMOR Ingeniero en electrónica y telecomunicaciones, 2014, Director de tesis: Carlos Alberto Pérez Rábago, Griselda del Pilar Vázquez Monzón.
- 14. Brenda Valeria Bocanegra Zagal, "Integración de equipos de análisis químico y térmico en la mesa de experimentación del Horno Solar de Altos Flujos Radiativos" UPEMOR Ingeniero en electrónica y telecomunicaciones, 2014, Director de tesis: Carlos Alberto Pérez Rábago, Griselda del Pilar Vázquez Monzón.

Tesis en proceso: 10 (Doctorado 5, Maestría 1, Licenciatura 6)

- 1. Diana Elisa Rodríguez Sánchez; Doctorado en Ingeniería (Energía), UNAM.
- 2. Alejandro Bautista Orozco; Doctorado en Ingeniería (Energía), UNAM.
- 3. Ernesto Anguera Romero; Doctorado en Ingeniería (Energía), UNAM.
- 4. Carlos Ernesto Arreola Ramos; Doctorado en Ingeniería (Energía), UNAM.
- 5. Isaías Moreno Cruz; Doctorado en Ingeniería (Energía), UNAM.
- 6. Luís Omar Lara Cerecedo; Mestría en ciencias de la sustentabilidad, Universidad de Sonora.
- 7. Alvaro Chaira; Ingeniería en Tecnología Electrónica, Universidad de Sonora.
- 8. Martha Escobar Toledo; Licenciatura en Física, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- 9. Irving Paul García Martinez, Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- 10. Juan Carlos Licea López. Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Otros estudiantes

Estudiantes que hicieron estancia en el HoSIER, dentro del XVII y XVIII Verano de Investigación Científica y Tecnológica del Pacifico, así como dentro del Subprograma del Verano de la Investigación Científica de la península de Yucatán (Verano Jaguar):

- 1. Pablo Francisco Quezada Cuenca; Ingeniería Electromecánica. Instituto de Estudios Superiores de Jocotitlán.
- 2. José Mauricio Corona Castillo; Ingeniería Mecánica. Universidad Autónoma de Nayarit,
- 3. Adriana Guadalupe Vázquez Fernández; Ingeniería Mecánica. Universidad Autónoma de Nayarit.
- 4. Daniel Guadalupe Arreola González; Ingeniería Mecánica. Universidad Autónoma de Nayarit.
- 5. Luis Alberto Loaiza Martínez; Ingeniería Química. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- 6. Kennet Román Cruz Castellot; Ingeniería en Sistemas de Energía. Universidad de Quintana Roo.
- 7. Erick Vivas Cawich; Ingeniería en Sistemas de Energía. Universidad de Quintana Roo.
- 8. José Luis Gordillo Reyes; Ingeniería en Sistemas de Energía. Universidad de Quintana Roo.

Residencias o estadías profesionales:

- 1. Julio César Hernández Mont; técnico superior universitario en energías renovables. Universidad Tecnológica de Tehuacán.
- 2. Gustavo Ismael Alday Lara; Ingeniería mecánica. Instituto Tecnológico de Hermosillo.

Prácticas profesionales:

- 1. Raúl Caleb Villa Vega. Carrera de Arquitectura, Universidad de Sonora, Abril- Mayo 2013.
- 2. Noé Landa Elizalde; Diseño Industrial. Universidad Internacional (UNINTER). 2012 Servicio Social:
 - 1. Marco Alberto Wilson Mora, Carrera de Arquitectura, Universidad de Sonora, 2012.
 - 2. Sergio Adán Durazo Cota, Carrera de Arquitectura, Universidad de Sonora, 2012.
 - 3. Noé Landa Elizalde; Diseño Industrial. Universidad Internacional (UNINTER). 2013

A4. Manuales, Reportes, Reglas de operación

Se presentan en documentos anexos los manuales técnicos, los reportes técnicos y las reglas de operación generados para la operación de las diferentes instalaciones del laboratorio nacional.

Manuales:

- 1. CEToC Manual de control de la Operación v 2015
- 2. CEToC Manual de seguridad v 2013
- 3. CEToC Manual Estación Solarimétrica v 2015
- 4. CEToC Manual del Plan de Mantenimiento v 2015
- 5. HoSIER Checklist de Operación
- 6. HoSIER ficha de seguridad
- 7. HoSIER Formato de solicitud de servicio
- 8. HoSIER Manual de operación v Oct 2011
- 9. HoSIER Manual SCADA v Agt. 2014
- 10. HoSIER Poster Radiación Temixco

Reglas de Operación:

1. CEToC Protocolo de la Operación v 2015

Reportes Técnicos:

- 1. CEToC 2015 Informe prototipo de receptor calorimétrico
- 2. HoSIER 2015 Informe Temperatura Pirómetro
- 3. HoSIER 2015 Informe Gas de síntesis con PETs
- 4. HoSIER 2015 Informe Temperatura Pirómetro
- 5. HoSIER Informe Temperaturas termográficas RR
- 6. HoSIER Informe Oxidos metálicos

A5. Lista de Participantes

- Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca (IER-UNAM): Coordinador General del Proyecto e Investigador Responsable del HoSIER.
- Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes (IER-UNAM): Responsable del CEToC por parte de la UNAM.
- Dr. Ricardo Rodríguez Carbajal (DII-UNISON): Responsable Institucional por parte de la UNISON.

Comité Técnico (de acuerdo al Convenio UNAM-UNISON)

- Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca (IER-UNAM)
- Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes (IER-UNAM)
- Dr. Carlos Alberto Pérez Rábago (IER-UNAM)
- Dr. Jesús Fernando Hinojosa (DIQM-UNISON)
- Dr. Rafael Enrique Cabanillas López (DIQM-UNISON)
- Dr. Ricardo Rodríguez Carbajal (DII-UNISON)

A3.1 Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Energías Renovables:

Dr. Camilo Arancibia, Dr. Claudio Estrada, Dr. Carlos A. Pérez Rábago, Dra. Heidi I. Villafán-Vidales, Dr. Aarón Sánchez Juárez, Dr. Antonio Jiménez González, Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar.

<u>Centro de Ciencia Aplicada y Desarrollo Tecnológico:</u> Dr. José Sániger Blesa, Dr. Gabriel Ascanio Gasca, Mtro. Gerardo Ruíz Botello, Ing. Roberto Reséndiz Nuñez

Instituto de Geofísica Dr. David Riveros Rosas, Dr. Mauro Valdés Barrón

<u>Instituto de Ingeniería</u> Dr. Javier Eduardo Aguillón Martínez

A3.2 Universidad de Sonora

<u>Departamento de Arquitectura y Diseño</u> Dr. José Manuel Ochoa, Arq. Gilberto Romero, Dra. Irene Marincic, Dra. María Guadalupe Alpuche

Departamento de Ingeniería Civil M. I. Jesús Benito Pérez Valenzuela

Departamento de Ingeniería Industrial

Dr. Ricardo Aurturo Pérez Enciso, Dr. Víctor Hugo Benítez, Dr. Ricardo Rodríguez Carbajal, Dr. Nún Pitalúa Díaz, M.C. Christian Dávila Peralta, M. C. Jesús Horacio Pacheco, M. C. María Elena Anaya, M. I. Rodolfo Peón, M. C. Cuitlahuac Iriarte Cornejo, M.C. Pablo Sosa Flores, M.C. Ramiro Calleja.

<u>Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia</u> Dr. Rafael Enrique Cabanillas, Dr. Jesús Fernando Hinojosa, Dra. María Esperita Trujillo Camacho.

Departamento de Matemáticas Dr. Julio Waissman Vilanova

Departamento de Investigación en Física Dr. Rafael García Gutiérrez

A3.3 Otras Instituciones Nacionales

<u>Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa</u> Dr. Hernando Romero Paredes Rubio, Dr. Gilberto Espinosa Paredes Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa

<u>Universidad Autónoma de Querétaro</u> Dr. Manuel Toledano Ayala

Universidad Autónoma de Nayarit Dra. Irma Paz Hernández Rosales

Instituto Tecnológico de Hermosillo Ing. José Jesús Zúñiga Morales

<u>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</u> M. en C. Mercedes Téllez Arias

Universidad Autónoma del Estado de Morelos Dr. Moisés Montiel González

<u>Universidad Autónoma de Sinaloa</u> Dra. Laura Guadalupe Ceballos Mendivil

<u>Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.</u> Dr. Iván Salgado Tránsito

A3.4 Instituciones Extranjeras

Instituto Madrileño de Estudios Avanzados, IMDEA (España) Dr. Manuel Romero Alvarez, Dr. José González Aguilar

<u>Centro Nacional de Energías Renovables, CENER (España)</u> Dr. Marcelino Sánchez González,

PROMES-CNRS (Francia) Dr. Stephane Abanades, Dr. Gabriel Olalde, Dr. Gilles Flamant

Paul Scherrer Institut, PSI (Suiza) Dr. Christian Wieckert