

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

Segundo Informe Técnico Parcial

No de Proyecto: CONACYT 123767 Responsable técnico: Dr. Claudio A. Estrada Gasca Período reportado: Septiembre 2012 - Septiembre de 2013

Elaborado por:

<u>UNAM</u>: Claudio A. Estrada Gasca, Camilo A. Arancibia Bulnes, Heidi I. Villafán Vidales, Carlos A. Pérez Rábago, José de Jesús Quiñonez Aguilar, Ricardo A. Pérez Enciso, Alejandro Bautista, Ernesto Anguera Romero, Militza Rosales Valles.

<u>UNISON:</u> Jesús Fernando Hinojosa Palafox, Rafael Cabanillas López, Víctor Hugo Benítez Baltazar, Jesús Pacheco Ramírez, José Manuel Ochoa de la Torre, Cuitlahuac Iriarte Cornejo, Pablo Sosa Flores, Rodolfo Peón Anaya.

UAM-I: Hernando Romero Paredes Rubio

Resumen:

Se reporta el avance de los tres subproyectos del LACYQS II durante los trimestres 3 al 6 del mismo. Se tuvo un avance adecuado de acuerdo a los objetivos y plazos establecidos, aunque con reajustes con respecto al proyecto original. También se llevaron a cabo actividades no previstas para mejorar el desempeño de las instalaciones prexistentes, el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo y el Campo de Experimental de Torre Central, para que cumplan mejor su función en esta segunda etapa. Estas tareas adicionales han generado resultados de investigación interesantes. Se ha involucrado a un número importante de estudiantes en las tareas del proyecto y se han llevado a cabo una serie de esfuerzos de vinculación. Se considera que el ritmo actual de desarrollo del proyecto permitirá concluirlo exitosamente.







Tabla de contenido

1	Introd	lucción	3
2	Activi	dades propuestas	4
3	Activi	dades desarrolladas	9
	3.1 L	aboratorio de Termoquímica Solar	9
	3.1.1	Caracterización del HoSIER	9
	3.1.2	Mejoramiento del HoSIER	11
	3.1.3	Selección del proceso a ser desarrollado	13
	3.1.4	Selección, adquisición e instalación de equipos analíticos	16
	3.1.5	Evaluación de los materiales y reacciones involucradas en el proceso	17
	3.1.6	Diseño y construcción de reactores solares	18
	3.2 C	Campo Experimental de Torre Central	23
	3.2.1	Construcción del laboratorio anexo	23
	3.2.2	Desarrollo de prototipos mejorados de helióstatos	24
	3.2.3	Implementación de infraestructura y metodologías para evaluación de helióstatos	26
	3.2.4	Pruebas del prototipo desarrollado e identificación de puntos de mejora	27
	3.2.5	Mejora del diseño y construcción de 2300 m2 de helióstatos	29
	3.2.6	Diseño de comunicación inalámbrica para control de helióstatos	30
	3.2.7	Revisión literaria y estudio de transferencia de calor en receptores térmicos	31
	3.2.8	Elección del tipo de intercambiador a desarrollar y diseño del mismo	33
	3.3 L	aboratorio de sistemas fotovoltaicos con concentración	37
	3.3.1	Diseño de CPV	37
	3.3.2	Construcción de prototipos	38
	3.3.3	Evaluación y caracterización de prototipos de CPV	39
	3.3.4	Mejoramiento y optimización de los prototipos	40
	3.4 A	Actividades de difusión y vinculación	41
	3.4.1	Difusión	41
	3.4.2	Vinculación	45
4	Concl	usiones	. 46
Ar	nexos		. 47
	A1. Publi	caciones	47
	A2. Form	ación de Recursos Humanos	49
	A3. Lista	de Participantes	52
	A3.1 U	Iniversidad Nacional Autónoma de México	52
	A3.2 U	Iniversidad de Sonora	52
	A3.3 O	tras Instituciones Nacionales	53
	A3.4 Ir	nstituciones Extranjeras	53
	A4. Refer	rencias	54
	A4.1 P	rocesos termoquímicos solares	54
	A4.2 R	eceptores de cavidad	56
	A4.3 R	eceptores volumétricos	56
	A4.4 S	istemas CPV	57

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 incluye repotenciar la infraestructura previamente desarrollada en la primera etapa (proyecto CONACYT 56918) y consolidar la red de grupos de investigación que se ha logrado integrar en el área, gracias a este proyecto. También se pretende formar recursos humanos de alto nivel y especialización e impulsar el desarrollo de una industria nacional de tecnologías de concentración solar.

En particular, en el proyecto se propuso escalar y transformar el Campo de Prueba de Heliostatos (Fig. 1.1) 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. 1.2.) y hacer una instalación piloto de fotovoltaicos con concentración.



Figura 1.1. Instalaciones actuales del CETOC, en terrenos de la UNISON, en Hermosillo, Sonora.



Figura 1.2. 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 (LASIFOV)

Es necesario señalar que los objetivos del proyecto se plantearon considerando un presupuesto cercano a los 40 millones de pesos. El presupuesto real aprobado es un poco superior a 24 millones, lo que implica una reducción de alrededor de 40%. Es claro que una disminución de esta magnitud debe impactar en los alcances del proyecto; en particular, se reducirá a la mitad la meta de potencia total propuesta para el CETOC (1 MW) y se reducirá el proyecto LASIFOV a un mínimo. Estas reducciones se detallan más adelante.

Cada uno de los subproyectos cuenta con su propio cronograma de actividades, los cuales se estructuraron por trimestres, como se muestra a continuación. El primer reporte, correspondiente a agosto de 2012, abarcó los dos primeros trimestres del proyecto. Este segundo informe corresponde a los trimestres del 3 al 6; es decir, de septiembre de 2012 a septiembre de 2013.

2 Actividades propuestas

De acuerdo al proyecto original sometido, las actividades de los diferentes subproyectos se muestran a continuación en las Tablas 2.1, 2.3 y 2.5. En cada una de ellas se señala con líneas rojas verticales el momento hasta donde cubre este reporte; a saber, el sexto trimestre de actividades. Por otro lado, las Tablas 2.2, 2.4 y 2.6, presentan cronogramas actualizados que reflejan mejor el estado actual de los subproyectos y lo que se espera de su subsecuente ejecución.

En la Tabla 2.1 aparece el cronograma original para el Laboratorio de Termoquímica Solar. Hay dos tareas muy importantes que se han venido realizando y que no están reflejadas en esta tabla, pero que se incluyen en la Tabla 2.2: la caracterización y el mejoramiento del HoSIER. Respecto a la primera, es necesario

Laboratorio de termoquímica solar	Trimestre											
Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Selección del proceso a ser desarrollado												
2. Selección y adquisición e instalación de equipos analíticos												
3. Evaluación de los materiales y reacciones involucradas en el proceso termoquímico seleccionado: propiedades termodinámicas, reactividad, cinética química, propiedades ópticas y térmicas												
4. Diseño y construcción de reactores solares.												
5. Desarrollo de la ingeniería de procesos (análisis exergético, simulación dinámica, evaluación tecno-económica).												
6. Implementación y puesta en marcha de los procesos												
7. Elaboración de informes y publicaciones												

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

mencionar que aunque se contaba con una caracterización preliminar del sistema, ha sido necesario llevar a cabo una caracterización más precisa. La razón de esto es que ante el compromiso de poner en operación sistemas sofisticados como son reactores químicos solares en esta instalación, es necesario contar con información detallada del mismo para poder diseñarlos y después operarlos.

Tabla 2.2. Cronograma actualizado de actividades para el Laboratorio de Termoquímica Solar. En verde se señalan actividades originalmente no programadas y en naranja las que han tomado más tiempo del programado.

Laboratorio de termoquímica solar	Trimestre											
Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0. Caracterización del HoSIER												
00. Mejoramiento del HoSIER												
1. Selección del proceso a ser desarrollado												
2. Selección y adquisición e instalación de equipos analíticos												
3. Evaluación de los materiales y reacciones involucradas en el proceso termoquímico seleccionado: propiedades termodinámicas, reactividad, cinética química, propiedades ópticas y térmicas												
4. Diseño y construcción de reactores solares.												
5. Desarrollo de la ingeniería de procesos (análisis exergético, simulación dinámica, evaluación tecno-económica).												
6. Implementación y puesta en marcha de los procesos												
7. Elaboración de informes y publicaciones												

En cuanto a la segunda actividad, el mejoramiento del HoSIER, es necesario puntualizar que en la medida que comenzó su caracterización detallada se fueron encontrando necesidades de mejora y se fueron ideando mejores soluciones para algunos de los subsistemas del mismo.

Las modificaciones adicionales que aparecen en la Tabla 2.2, corresponden a la extensión en el tiempo asignado a (1) la selección del proceso a ser desarrollado y a (2) la selección y adquisición e instalación de los equipos analíticos. Ha sido necesario prolongar la actividad (1) buscando tomar la mejor decisión al respecto. Los primeros experimentos realizados en el horno con materiales, con calorímetros y con un prototipo de reactor han permitido tener una idea mucho más clara de las posibilidades y retos que se presentan al operar un sistema de tan alta concentración y capaz de alcanzar temperaturas tan altas como el HoSIER. Esto es comprensible, ya que probablemente existen en el mundo sólo otros dos hornos solares con capacidades comparables. La actividad (2) se ha tenido que extender debido fundamentalmente a trámites administrativos en la adquisición de los equipos.

En la Tabla 2.3 se presenta el cronograma original de actividades para el Campo Experimental de Torre Central y en la tabla 2.4 su cronograma actualizado. Una de los cambios importantes respecto al cronograma original es el retraso en la construcción de la obra civil debido a circunstancias ajenas al proyecto y que se explicarán más adelante. También se ha aumentado la duración del tiempo para el diseño de sistemas de comunicación inalámbrica para helióstatos. Este punto ha demostrado ser más complejo de lo esperado y de interés tecnológico actual, debido a las dificultades en la transmisión de señales entre los helióstatos y se considera que es un tema de investigación que vale la pena extender hasta el final del proyecto.

Campo Experimental de Torre Central						Tri	mes	tre				
Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
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												
3. Implementar la infraestructura y las metodologías para evaluar los prototipos de helióstatos desarrollados												
4. Probar el prototipo desarrollado e Identificar los puntos de mejora												
5. Mejorar el diseño y llevar a cabo la construcción de 2300 m2 de helióstatos con base en dicho diseño, para llevar área total instalada previamente hasta los 3000 m2												
6. Diseñar sistemas electrónicos de comunicación inalámbrica para el control de campos de helióstatos.												
7. Instalar los helióstatos												
8. Llevar a cabo la alineación de helióstatos y caracterización óptica del campo												
9. Revisar la literatura y estudiar los mecanismos de transferencia de calor asociados a la operación de los receptores térmicos en sistemas de TC.												
10. Elegir el tipo de intercambiador a desarrollar y diseñarlo												
11. Construir el receptor												
12. Desarrollar el sistema de control y adquisición de datos pata la automatización del sistema de TC												
13. Llevar a cabo pruebas térmicas de la planta de torre central con el receptor desarrollado												

Tabla 2.3. Cronograma original de actividades para el Campo Experimental de Torre Central.

Tabla 2.4. Cronograma actualizado de actividades para el Campo Experimental de Torre Central. En naranja aparecen las actividades que se han recalendarizado.

Campo Experimental de Torre Central	Trimestre											
Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
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												
 Implementar la infraestructura y las metodologías para evaluar los prototipos de helióstatos desarrollados 												
4. Probar el prototipo desarrollado e Identificar los puntos de mejora												
5. Mejorar el diseño y llevar a cabo la construcción de 650 m2 de helióstatos con base en dicho diseño, para llevar área total instalada previamente hasta los 1190 m2												
6. Diseñar sistemas electrónicos de comunicación inalámbrica para el control de campos de helióstatos.												
7. Instalar los helióstatos												
8. Llevar a cabo la alineación de helióstatos y caracterización óptica del campo												
9. Revisar la literatura y estudiar los mecanismos de transferencia de calor asociados a la operación de los receptores térmicos en sistemas de TC.												
10. Elegir el tipo de intercambiador a desarrollar y diseñarlo												
11. Construir el receptor												
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												

Finalmente, en el caso del LASIFOV se tenía el cronograma de la tabla 2.5, el cual se ha modificado sustancialmente de acuerdo a la tabla 2.6. Como ya se ha mencionado, debido al recorte de presupuesto al que se sometió al proyecto, se han debido reducir los alcances. En particular el LASIFOV es el proyecto más afectado, donde se ha decidido no construir una instalación demostrativa de 100 m2. Esto redunda en la eliminación de las dos últimas tareas y en la disminución del ritmo de trabajo en las demás, por lo que la calendarización de todas las actividades ha sido reajustada.

Tabla 2.5. Cronograma original de actividades para el Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos con Concentración.

Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos con Concentración	Trimestre											
Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Diseño de CPV												
2. Construcción de prototipos												
3. Evaluación y caracterización de prototipos de CPV.												
4. Mejoramiento y optimización de los prototipos												
5. Evaluación y caracterización de prototipos mejorados de CPV												
6. Diseño de planta de CPV												
7. Construcción y evaluación de planta demostrativa de 100 m2												

Tabla 2.6. Cronograma actualizado de actividades para el Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos con Concentración. En naranja de muestran las actividades que se han recalendarizado y las actividades que no se podrán ejecutar aparecen tachadas y en rojo.

Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos con Concentración				Trimestre											
Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1. Diseño de CPV															
2. Construcción de prototipos															
3. Evaluación y caracterización de prototipos de CPV.															
4. Mejoramiento y optimización de los prototipos															
5. Evaluación y caracterización de prototipos mejorados de CPV															
6. Diseño de planta de CPV			-	-	-	-		-	-	1	1	-			
7. Construcción y evaluación de planta demostrativa de 100 m2			-			-		-	-		-	-			

3 Actividades desarrolladas

Consideramos que las actividades del LACYQS II llevan a la fecha un avance adecuado. El cronograma ha sido cumplido en términos generales, aunque en algunos casos se han adelantado o retrasado actividades con respecto a lo programado. También se han llevado a cabo actividades adicionales no programadas, por considerarse importantes para el mejor desarrollo 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

Dentro de este subproyecto se requiere instalar en el HoSIER los equipos necesarios para poder llevar a cabo experimentación sobre procesos termoquímicos con energía solar concentrada, particularmente la producción de combustibles solares. Entre los equipos a instalar se encuentran los reactores químicos solares necesarios para llevar a cabo estos procesos. El desarrollo de los reactores debe ser específico para el HoSIER y su diseño requiere tener una caracterización precisa del horno. Por lo tanto, ha sido necesario caracterizar el HoSIER, lo cual es una tarea adicional a las comprometidas en el proyecto y que ha planteado sus propios problemas tecnológicos. Esta tarea se describe a continuación, junto con las otras comprometidas inicialmente.

3.1.1 Caracterización del HoSIER

Durante este período se continuó con la tarea de caracterización del HoSIER. Como se señaló en el pasado reporte, para poder medir con precisión la potencia concentrada por el horno se diseñó y construyó un calorímetro de cavidad cónica (Fig. 3.1.1). El diseño de cavidad y la selección de los materiales del dispositivo permiten reducir las pérdidas térmicas, para medir con mucha mayor precisión que lo que permite los radiómetros convencionales. El dispositivo funciona basado en la técnica de calorimetría de agua fría. Los parámetros que se miden son las temperaturas de entrada y salida y flujo másico del agua que circula por el calorímetro, la distribución de temperaturas en la pared de la cavidad (con 11 termopares, Fig. 3.1.1 derecha) y la irradiancia solar directa. Una primera evaluación mediante el calorímetro arriba descrito dio como resultado una potencia de 20.0 ±0.83 kW para el horno solar en condiciones reales de irradiancia solar directa de 950 W/m2.



Figura 3.1.1 Calorímetro de cavidad cónica en operación (derecha) en el horno e instrumentación de la cavidad del mismo mediante termopares (izquierda).

Otro resultado útil que se ha podido obtener con el calorímetro es la caracterización del atenuador (persiana) del horno. En principio el diseño requiere que la potencia concentrada sea directamente proporcional al

porcentaje de apertura del atenuador. Esta potencia se midió con el calorímetro variando el porcentaje de apertura y se encontró, en efecto, una relación lineal muy bien definida entre ambos parámetros (Fig. 3.1.2.).



Figura 3.1.2. Comportamiento del calorímetro y del atenuador a diferentes porcentajes de apertura.

Para estudiar la distribución de flujo radiativo concentrado en la zona focal del HoSIER se hicieron experimentos mediante una pantalla Lambertiana refrigerada, que se fue desplanzando a lo largo de la zona focal, en dirección normal al eje óptico del sistema (Fig. 3.1.3). Este desplazamiento se puede controlar con precisión (±0.05 cm) mediante la mesa XYZ del horno. Usando una cámara CCD se tomaron imágenes con separación de 5 mm de desplazamiento y con ello se construyeron superficies de flujo radiativo constante. Estas isosuperficies también se generaron teóricamente mediante trazo de rayos (Fig. 3.1.3) derecha).



Figura 3.1.3. Arreglo experimental para la evaluación de superficies de flujo constante (izquierda) y esquema de la simulación (derecha).

Se pudo llevar a cabo comparaciones de las superficies obtenidas experimental y teóricamente, encontrándose una muy buena coincidencia (Fig. 3.1.4). Esto ha permitido ganar confianza en la metodología de evaluación por imágenes, la cual ha permitido estimar a la fecha una concentración pico de alrededor de 18,000 soles (18 ±1 MW/m2) (Fig. 3.1.5).



Figura 3.1.4. Superficies de flujo constante teóricas (izquierda) y experimentales (derecha), en la zona focal del HoSIER.



Figura 3.1.5. Comparación de la distribución de flujo concentrado a lo largo del eje vertical, teórica y experimental.

Los resultados obtenidos hasta ahora, en la caracterización del HoSIER, permiten conocer mejor las características del instrumento y por lo tanto contar con más elementos para diseñar los diferentes tipos de dispositivos experimentales que en el futuro se podrán implementar en esta instalación.

3.1.2 Mejoramiento del HoSIER

Sistema de control de seguimiento solar del helióstato

Debido a las dimensiones del helióstato H81 (81 m²), las cargas de viento, las deformaciones estructurales, el backlash de las trasmisiones, el dispositivo presentaba después de algunas horas de operación un error en el seguimiento aparente del sol, lo que producía un desplazamiento progresivo de la radiación solar concentrada en la zona focal del concentrador. Para determinar las causas posibles de este error, se inició con la comparativa de las ecuaciones que se usan para el cálculo de la posición solar y como resultado de este análisis se cambiaron las ecuaciones originales por las desarrolladas en el NREL, por Reda. Además del análisis de las ecuaciones, se detectó que el mecanismo de movimiento del H81 tiene un juego entre la

corona y el sinfín, lo que produce un backslash y como consecuencia un desplazamiento brusco de la radiación solar concentrada cuando se presentan condiciones de viento sobre el H81, este problema se corrigió implementando un sistema de desbalanceo por medio de cargas.

Una vez que se cambiaron las ecuaciones de cálculo del movimiento aparente del sol y se corrigió el problema del backslash, el error disminuyó aproximadamente a la mitad. Debido a que es necesario que la radiación solar concentrada se mantenga fija a lo largo de todo el tiempo en que se esté operando el HoSIER, fue necesario implementar un sistema de seguimiento de lazo cerrado para poder hacer las correcciones necesarias. Primero se desarrolló un sensor basado en fotorresistencias con el que se puede detectar la desviación de la radiación reflejada por el H81, este sensor tiene una resolución de corrección angular del orden de 1.5 mrad. Posteriormente, al encontrarse esta corrección todavía insuficiente, se desarrolló un sistema de lazo cerrado basado en la detección de la desviación de la radiación solar por medio de un sistema de visión que detecta la imagen del sol reflejada por el H81, con este sistema de visión se logra tener una resolución menor a 1 mrad, lo que en términos prácticos es despreciable. Con esto se logra mantener prácticamente fija la radiación solar concentrada en la zona focal a lo largo de todo el tiempo en que se esté usando el HoSIER.

Medición de la potencia solar concentrada

La metodología que se ha empleado hasta ahora para conocer distribución de flujo de la mancha solar que forma el concentrador del HOSIER han sido indirecta, a través del análisis de imágenes y de la medición de la potencia por medio del calorímetro de cavidad. Para la operación cotidiana del horno, se requiere una metodología directa, más rápida aunque menos exacta, para aplicar al inicio de cada corrida experimental. Esto se logra a través de sensores de flujo radiativo, de tipo Gardon. Para lograr que la radiación solar concentrada incida únicamente en la superficie de medición del sensor, escudando de la radiación solar concentrada al resto del sistema de medición, se diseñó un dispositivo que tiene una placa refrigerada a través de la cual se asoma el sensor (Fig. 3.1.6).



Figura 3.1.6. Imagen de diferentes ángulos del sistema de medición de flujo con placa refrigerada y radiómetro tipo Gardon (izquierda) y el mismo sistema en operación en el HOSIER (derecha).

Durante el diseño se hicieron modelaciones de transferencia de calor para definir la forma en la que se realizaría la remoción de calor de la placa del dispositivo (Fig. 3.1.7). El diseño que se definió fue el del flujo horizontal con 8 perforaciones de 3 mm distribuidas uniformemente en cada extremo como se puede observar en las imágenes inferiores de la Fig. 3.1.7.



Figura 3.1.7. Imágenes de las modelaciones de 4 configuraciones de flujo en la placa enfriada; las flechas en azul representan la dirección del flujo de entrada y las naranja de salida.

Con este dispositivo se pueden conocer los niveles de concentración solar en la zona focal y la distribución fotónica. Con esos datos obtenidos se calcula el coeficiente global de perdida de potencia del HoSIER (K_p), lo que define las condiciones de operación del HoSIER al momento de realizar un experimento o prueba. Para calcular el K_p se requiere medir la potencia del HoSIER (Q_{oc}) a un porcentaje definido de apertura del atenuador (A_{ap}), el área efectiva del concentrador (A_e) y la radiación solar directa (G_b).

Una vez definido el coeficiente global de perdida de potencia del HoSIER es posible determinar en cualquier momento durante la experimentación la potencia concentrada por el HoSIER dependiendo únicamente de la intensidad de la radiación solar (G_b) y del porcentaje de apertura de atenuador (A_{ap}).

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, en particular, aquellos enfocados en la producción de hidrógeno.

Estado del arte

Para producir hidrógeno con energía solar existen básicamente 3 métodos, la producción electroquímica, fotoquímica y termoquímica [1]. De estos tres métodos, los procesos termoquímicos son los que se consideran los más favorables termodinámicamente hablando [2]. A su vez, la producción termoquímica de hidrógeno se da por 5 posibles rutas que son [1]: la gasificación, el reformado, el craqueo, la termólisis del agua y los ciclos termoquímicos. En todas estas rutas se lleva a cabo una reacción endotérmica (una reacción que consume calor), la cual puede utilizar como fuente a la energía solar concentrada.

La gasificación del carbón es una de las reacciones que se ha utilizado por más de cien años. En ella se lleva a cabo una combustión parcial de carbón con vapor de agua a una temperatura que está entre los 800-1500 grados centígrados, donde el producto principal es un combustible que es la mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno en proporciones variables, conocida como gas de síntesis o syngas [3-7]:

$$C(s) + H_2O(g) \rightarrow CO(g) + H_2(g)$$

En el reformado de hidrocarburos el compuesto más utilizado es el metano, ya que con éste se obtiene más hidrógeno por gramo que con otros hidrocarburos [8]. En este proceso, el metano reacciona con vapor de agua, a alta temperatura y presión, en presencia de un catalizador (níquel), a una temperatura de entre 800-900 grados centígrados y como resultado se obtiene gas de síntesis [3]:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO(g) + 3H_2$$

Esta manera de producir hidrógeno es una de las más usadas industrialmente, ya que la reacción es rápida y tiene una conversión casi del 100% [8]. En el reformado también se puede emplear CO2 en lugar de agua; esto es:

 $CH_4 + CO_2 \rightarrow 2CO(g) + 2H_2$

En los últimos 15 o 20 años se ha realizado una cantidad significante de investigación en la reformación del metano y otros hidrocarburos con energía solar concentrada [8,3,2,9]

El craqueo o "cracking" de hidrocarburos consiste en la producción de hidrocarburos más ligeros a partir de la ruptura de enlaces de hidrocarburos más pesados [3]. En esta ruta se utilizan diversos catalizadores y se producen diversas substancias; entre ellos se encuentra el hidrógeno. La reacción general de este proceso es:

 $C_xH_y\ \rightarrow xCH_{y\text{--}1}(g) + y/2H_2$

El craqueo de hidrocarburos con energía solar concentrada ha sido básicamente explorada para el metano y para coque de petróleo, mientras que para otros hidrocarburos hay muy poca investigación; por ejemplo en 1995 Flechsenhar y Sasse [10] gasificaron petróleo bituminoso [3,11-16]

La termólisis del agua consiste en la disociación de la molécula del agua con el objeto de romper el enlace O-H para obtener hidrogeno y oxígeno, esto es:

 $H_2O \leftrightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$

Sin embargo, esto no es fácil ya que esta unión es una de las más energéticas que existen. Esta reacción necesita temperaturas de aproximadamente 2900 K para alcanzar un grado de disociación razonable (alrededor del 35%) [17]. Este nivel de temperatura es uno de los principales inconvenientes por los que este proceso casi no se ha desarrollado ya que, para tan altas temperaturas, se tienen problemas con los materiales. Otro inconveniente es que los productos gaseosos deben ser separados inmediatamente después de efectuada la reacción para evitar su recombinación. Si no se realiza una separación efectiva, se puede terminar con una mezcla explosiva [1].

En los años 70s y 80s se realizaron los primeros experimentos de disociación del agua usando energía solar [18-21]. Actualmente el estudio de la termólisis del agua no se ha analizado exhaustivamente ya que aún persiste el problema de la disponibilidad de materiales que soporten tan altas temperaturas [22].

Finalmente, están los ciclos termoquímicos para disociación del agua [23,4]. Los ciclos más sencillos, los de dos pasos, que requieren temperaturas mayores que los de más pasos, pero son mucho más eficientes. El primer ciclo solar termoquímico de dos pasos que fue propuesto consistía en la reducción del Fe₃O₄ a FeO [24]. En este tipo de procesos se usan temperaturas altas, pero menores a la termólisis del agua y se evita el problema de separación del H₂/O₂ [2] debido a que ambos se producen en diferentes pasos, esto es:

 $MO_{ox} \rightarrow MO_{red} + (\frac{1}{2})O_2$

 $MO_{red} + H_2O \rightarrow MO_{ox} + H_2$

El primer paso de este ciclo es una reacción endotérmica y se lleva a cabo a temperaturas mayores de 1500 K. En ella, la molécula de óxido metálico se reduce y el producto que se obtiene se utiliza para llevar a cabo el segundo paso. En este último se realiza una reacción exotérmica a temperaturas menores de 1000 K. Aquí el óxido reducido se utiliza para disociar el agua y obtener hidrógeno. Una diferencia importante que tienen los ciclos termoquímicos de los otros procesos, como la gasificación y craqueo entre otros, es que en los ciclos se regeneran los compuestos iniciales, los cuales pueden ser utilizados nuevamente [25]; de ahí el término de "ciclo" en su nombre. En estos ciclos se obtiene hidrógeno puro, es decir, sin trazas de contaminantes, como el monóxido de carbono que se tienen cuando se produce a partir de combustibles fósiles; o bien sin presencia de oxígeno que se tiene cuando se produce a partir de la termólisis del agua.

Procesos seleccionados

Los criterios aplicados para seleccionar los procesos a ser implementados deben ser múltiples: (1) que dichos procesos sean científicamente interesantes y tecnológicamente prometedores, (2) que puedan ser de relevancia para la industria nacional, (3) que sean adecuados al tipo de condiciones obtenibles con el HoSIER y, finalmente, (4) que permitan adquirir mayor experiencia al grupo de trabajo, al ser los primeros desarrollados en México.

Aplicando los criterios arriba mencionados y basándonos en la revisión del estado del arte arriba expuesta, se ha considerado conveniente llevar a cabo dos tipos de experimentos sobre los procesos de producción de hidrógeno: en el primero se pretende obtener hidrogeno mediante ciclos de óxidos metálicos. En particular se ha considerado comenzar con la reducción de óxidos no volátiles como el óxido de Cerio (CeO2), debido a que es un proceso ya estudiado y que puede ser llevado a cabo con mayor simplicidad; para este ciclo ya se tiene el diseño de un reactor solar, el cual está en construcción.

Además de esta reacción de alta temperatura, se trabajará en la implementación de un proceso de descarbonización de un hidrocarburo. En particular se ha considerado iniciar con el reformado de metano (CH4), el cual transcurre a temperaturas inferiores. La mayoría del hidrogeno que se usa a nivel mundial se obtiene por este proceso y dada la importancia de la industria petrolera en México consideramos que este es un proceso atractivo a nivel nacional. El diseño y construcción de un reactor para estudiar este proceso se realizará en los siguientes trimestres.

En el futuro, después de finalizado el presente proyecto se trabajaría con óxidos volátiles, como el ZnO y el SnO2. Estas son reacciones a muy alta temperatura, las cuales pueden sacar el mejor provecho de las características del HoSIER y que se tiene interés desde el punto de vista tecnológico.

Adicionalmente a los procesos de termoquímicos de producción de hidrógeno, se tiene otra línea de investigación que se lleva a cabo en el HoSIER, a saber, la producción y el estudio de materiales a altas temperaturas. La energía solar concentrada puede ser usada para producir nuevos materiales con alta resistencia a la corrosión y a la oxidación a alta temperatura; o bien para obtener materiales con procesos convencionales reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. En esta dirección, actualmente se lleva a cabo una campaña experimental para la síntesis de óxidos de tungsteno con energía solar concentrada. Estos óxidos son materiales con valor comercial debido a que tienen varias aplicaciones, por ejemplo, como catalizador en diversos procesos industriales, como sensor de gases, como pigmento de cerámicos y pinturas controladas, entre otros.

En conclusión, para implementar en el HoSIER durante el presente proyecto se han seleccionado 3 procesos principales:

- Reformado de metano
- Ciclo de óxido no volátil (CeO₂)
- Producción de óxidos de tungsteno

3.1.4 Selección, adquisición e instalación de equipos analíticos

De acuerdo al tipo de reacciones químicas que se van ha desarrollar, se seleccionó una gran parte del equipo analítico y sistemas periféricos que serán instalados en el HoSIER. El tipo de equipos seleccionados incluyen un sistema para analizar los gases de salida de los reactores solares, en particular se seleccionó un equipo de la marca SIEMENS para analizar CO, CO₂, H₂, CH₄ y O₂ en dos rangos. Los equipos seleccionados y los rangos de operación mínimos y máximos se muestran en la Tabla 3.1.1.

También se está adquiriendo un equipo para acondicionar los gases de salida del reactor y que entrarán a los analizadores debido a que estos equipos necesitan condiciones muy específicas para su correcto funcionamiento. Este sistema es de la marca Universal Analyzers Inc. Modelo 514.

El siguiente sistema es para la medición de temperatura de no contacto, el cual incluye una cámara termográfica de la marca FLIR, modelo SC2500, que registra temperaturas en tiempo real desde los 400 a los 3000 °C, y se puede integrar fácilmente al control del HoSIER. Finalmente, este sistema también incluye un pirómetro que está por seleccionarse.

El siguiente grupo de equipos permitirán 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 permitiran regular el flujo de Argón, CO2, nitrógeno y metano en dos rangos diferentes: 0-10 L/min y 0-30 L/min. También se está adquiriendo un equipo de generación de vapor y mezclas controladas (Controlled Evaporative Mixer, CEM, Marca Bronkhorst, modelo W303A) con el que se regulará y medirán las mezclas de gases que entran a los reactores. Todos estos equipos (excepto el pirómetro) están en proceso de adquisición.

Tabla 3.1.1. Características de los diferentes sensores marca Siemens seleccionados para el LATEQS

	Mínimo (%Vol)	Normal (%Vol)	Máximo (%Vol)
CO	0	10	50
O ₂	0	0.5	20
CO ₂	0	10	50
CH ₄	0	10	100

Ultramat 23

Oxymat 64

	Mínimo (ppm)	Normal (ppm)	Máximo (ppm)
O ₂	0	7500	100000

Calomat 6

	Mínimo (ppm)	Normal (ppm)	Máximo (ppm)
H ₂	0	1000	10000

3.1.5 Evaluación de los materiales y reacciones involucradas en el proceso

Para los procesos seleccionados se requieren construir reactores que soportes las condiciones de temperatura y presión para diferentes configuraciones de zona de exposición a los altos flujos radiativos, así como de inyección de gases, entre otros.

Para definir los materiales y reacciones a ser estudiados se requiere conocer los tipos de reactores empleados para cada tipo de proceso. Para ello se hace una clasificación básica de reactores dependiendo del tipo de intercambio térmico que tiene lugar en el reactor: directo e indirecto. Esto va a repercutir en la potencia calorífica que les llega a los reactivos, la temperatura que estos alcanzan y las eficiencias térmicas y químicas de los procesos. Dentro de cada una de estas dos categorías principales, se pueden distinguir una serie de tipos de reactores, que se diferencian principalmente en el diseño mecánico del equipo. En la Tabla 3.1.2 se presenta un resumen de esta clasificación en reactores de intercambio directo e indirecto, así como la correspondiente subdivisión con base a la configuración del equipo.

En la tabla 3.1.3 se esquematizan los parámetros de temperaturas, eficiencias térmicas y tamaños de los reactores desarrollados en otras experiencias revisadas en la bibliografía. No obstante hay que tener en cuenta que esta información está generalizada y que cada modelo particular que sea diseñado puede ser ajustado para mejorar cualquiera de sus parámetros de funcionamiento.

Reactores de	Reactores tubulares: for doble pared con flujo int	ma de bobina, doble pared con sección anular cerámica, erior y exterior, entre otros.					
intercambio indirecto	Reactores de doble cámara						
	Reactores de microcana	les					
	Reactores volumétricos						
Depateros de		Lecho arrastrado: cortina de partículas, ciclones/vórtices,					
intercombio directo	Reactores de	rotativos					
	partículas	Lecho fluidizado: con y sin recirculación interna					
		Lecho fijo					

Tabla 3.1.2. Clasificación de las distintas tecnologías de reactores solares

Tabla 3.1.3. Resumen de los parámetros característicos de los distintos modelos de reactor.

	Reacto	res de inte indirecto	rcambio	Re	actores de in	tercambio dir	recto
	adores de metano s	es tubulares is	es de doble cámara	es volumétricos	React	ores de partí	culas
	Reforma tubulare	Reactor	Reactor	Reactor	Lecho arrastrado	Lecho fluidizado	Lecho fijo
Temperatura (°C)	1000	1700	1200 - 1300	1700	1800	1200	2000
Conversión química (%)	100	90 - 98		30 - 40	90	95	
Eficiencia térmica (%)	50		40				60 - 70
Tamaño máximo Construido (kW)	500	2000	50	10			

3.1.6 Diseño y construcción de reactores solares

Actualmente se diseña y construye tres modelos diferentes de reactores para llevar a cabo los procesos seleccionados en el HOSIER.

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. Consiste en una esfera de vidrio Pyrex®, que es un material inerte a varios químicos, además de que resiste temperaturas altas (hasta 800°C) 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. 3.1.8). Con este reactor actualmente se está trabajando en una campaña experimental en el horno solar para llevar a cabo la síntesis de óxidos de

tungsteno, a saber, WO3, WO2, W24O68. Este material es un compuesto muy prometedor ya que tiene aplicaciones tecnológicas y científicas importantes, debido a que se utiliza como catalizador y como un material electrocrómico, fotocrómico o gasocrómico. Con este experimento se espera identificar las condiciones de presión y temperatura bajo las cuales se obtiene cada tipo de óxido.



Figura 3.1.8. Cámara inerte esférica de vidrio Pyrex®, con sus diferentes bridas y pasamuros, montada en la mesa de experimentación del HOSIER.

Reactor tubular multipropósito

La UAM-I, en colaboración con el IER-UNAM, está trabajando en el diseño de un reactor solar de 30 kWt. La premisas que se emplearon para el diseño fueron:

- 1. Deberán usarse materiales soporten las elevadas temperaturas que se alcanzan en un horno solar.
- 2. Los materiales se seleccionaran de manera que sean idoneos cada parte del reactor, que soporten los choques térmicos y que permita tener una larga duración.
- 3. Dado que los materiales del reactor resultan onerosos al igual que su construcción, deberá ser multipropósito dentro del contexto de la termoquímica solar. Por ello habrá de pensarse en un reactor en el que se puedan realizar una multitud de tareas en paralelo o en serie, continuo o batch.
- 4. Deberá ser sencillo en su conceptualización para evitar gastos que conllevan a piezas muy costosas e innecesarias.
- 5. Deberá ser diseñado de tal forma que se reduzcan las pérdidas térmicas al máximo.

El reactor diseñado es una cámara que consiste en un receptor cuadrado cerrado al ambiente por medio de una ventana hemisférica de Pyrex (Fig. 3.1.9). Un flujo de gas inerte entra por la parte lateral frontal inferior del reactor y sale en la parte lateral opuesta trasera superior. Este flujo se usa para tener una atmósfera inerte en el interior de la cámara, así como para arrastrar a los productos de la reacción cuando se opere solamente con la cámara. La carcasa del reactor se construirá de aluminio, de esta manera se disminuye el peso total del dispositivo. Sólo la ventana frontal del reactor necesitará un sistema de refrigeración.



Figura 3.1.9. Vista frontal, sin cúpula transparente, donde se muestra la colocación de los tubos de reacción.

En la Fig. 3.1.10 se presenta la conformación del set de tubos, diferentes para cada uso y dependiendo del nivel de temperatura deseado en el reactor solar. El primer semi-círculo es diseñado para trabajar con temperaturas inferiores a los 2000 K. El segundo semicírculo es para llegar a los 2500 K y, finalmente, el tubo que se encuentra solo al frente del reactor es el que podrá alcanzar temperaturas de hasta 3000 K. Idealmente, en ese mismo sitio, pero en la parte inferior interior del reactor, se podrá colocar algún cuerpo que desee su tratamiento a elevadas temperaturas (v.g. cerámicos).



Figura 3.1.10. Vista de conjunto de la colocación de los diferentes set de tubos.

También se ha trabajado en la modelación de la transferencia de calor en reactores para la reducción de óxidos metálicos en colaboración con el PROMES-CNRS. Se desarrolló un modelo transitorio de un reactor solar de 1kWt diseñado para la disociación térmica del ZnO y del SnO₂. Los resultados del modelo se compararon con resultados experimentales obtenidos en una campaña experimental realizada anteriormente, obteniendo una muy buena correlación.

Reactor rotativo de 10 kWt para estudios termoquímicos con óxidos metálicos no volátiles

El diseño de este reactor consiste en una cavidad cilíndrica que aloja un crisol (Fig. 3.1.12), el cual sostiene una muestra pequeña de partículas del material a estudiar, colocada en la zona focal del concentrador. En esta cavidad se introducen gases inertes que permiten tener una atmósfera inerte alrededor del portamuestras. Es importante destacar que el diseño del porta-muestras permitirá que el contacto sea el mínimo posible, consiguiendo que la muestra se encuentre a una temperatura muy elevada, superior a los 1600 °C, mientras las paredes de la cavidad del reactor no deberán alcanzar temperaturas superiores a los 1250 °C.



Figura 3.1.12. Diseño de reactor rotativo

El diseño propuesto es cae en la categoría de lecho arrastrado, ya que para optimizar el proceso de reducción de los óxidos metálicos, se busca que las partículas se encuentren en constante movimiento y expuestas directamente a la radiación. Para ello se propone hacer girar el porta-muestras y que sea este recipiente el único que reciba el flujo de radiación y la corriente de gas de arrastre. Al girar el recipiente (crisol) las partículas expuestas a la radiación constantemente se estarán volcando unas contra otras lo que facilita su exposición más uniforme al flujo de radiación y la liberación de oxígeno en el momento que se alcance la temperatura de reducción. Para ello se fijará tanto el cuerpo, la ventana y tapa del reactor y se hará girar únicamente el pequeño crisol que confina las partículas y que será soportado por un tubo que girará a menos de 10 rpm. Para el diseño del reactor además se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Potencia concentrada del HoSIER en el crisol, alrededor de 10 kW térmicos
- Radiación pico de 1400 soles
- Temperatura deseada en la muestra de 1600 °C
- Ángulo de visión de 46°
- Presión en el interior del reactor por encima de la atmosférica
- Flujo de gas de arrastre mayor a 9 L/min ya sea Argón o Nitrógeno

Para determinar las dimensiones optimas del crisol empleado para este reactor, se realizó un estudio de la distribución de radiación concentrada incidente en las propias paredes del crisol a través de una modelación de trazado de rayos Fig. 3.1.13. Con este estudio de la distribución de flujo radiativo concentrado se estimaron las temperaturas de estancamiento alcanzada por las paredes del porta-muestras y esta distribución de temperaturas se tomó como punto de partida para el diseño del resto de los componentes. En las paredes del crisol la distribución de radiación máxima que incide es de 1417 kW/m² y un promedio de 595 kW/m², lo que produce una potencia concentrada en las paredes del crisol de 7.97 kW térmicos y se produce una temperatura de estancamiento de alrededor de 1799 K, como se observa en la figura 3.1.13.



Figura 3.1.13. Distribución de flujo radiativo en las paredes del crisol.

Para conseguir un efecto de cavidad e incrementar la emisividad aparente del reactor, se propuso colocar en el interior de la ventana frontal un diafragma cerámico que permita la entrada de la radiación al interior de la cavidad con un ángulo mayor al de aceptación del HoSIER. Por último este dispositivo cumplirá también la finalidad de hacer una inyección homogénea de los gases de arrastre, los cuales entran a través de cuatro tubos distribuidos a 90° uno de otro en la cámara frontal de este diafragma (Fig. 3.1.14). Este reactor se encuentra en fase de construcción y se espera estar haciendo las primeras pruebas para finales de este año.



Figura 3.1.14. Render del diseño del reactor señalando las entradas y salidas de los flujos de gas de arrastre del reactor rotativo.

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 del laboratorio anexo

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 llevado a cabo el diseño general de los espacios y en el período que se reporta llevaron a cabo dos rondas de revisión del diseño arquitectónico para llegar a la propuesta final. Esta si ilustra en las Figs. 3.2.1 y 3.2.2



Figura 3.2.1. Planta del diseño propuesto para los nuevos espacios del CETOC, señalando en rojo el espacio actualmente existente.



Figura 3.2.2. Perspectivas de los espacios propuestos para el CETOC.

A la fecha no se ha podido avanzar en la construcción de los nuevos espacios por razones de índole institucional, más que técnica: El presupuesto comprometido para la obra por la Universidad de Sonora fue negociado con el Gobierno del Estado, el cual ha enfrentado una serie de dificultades financieras, razón por la que no se ha podido concretar dicha aportación. Los contactos con las autoridades estatales continúan y se confía en poder resolver esta situación próximamente.

3.2.2 Desarrollo de prototipos mejorados de helióstatos

Durante el período reportado se desarrollaron dos nuevos prototipos de helióstatos: uno de 37.5 m^2 y otro de 2.25 m². El primero, como ya se discutió, parte de un rediseño total del modelo base de 36 m² que se ha utilizado en el campo. El prototipo se diseñó a detalle, se construyó y probó en el presente período. En el diseño se buscó reducir el costo global del helióstato a través de reducir su peso, así como simplificar el canteo y limpieza del mismo. Cuenta con un marco estructural de acero tubular en forma de herradura para soportar 32 facetas. Las dimensiones de cada espejo son 1.3 m x 0.9 m x 0.003 m. Las armaduras de acero están sustentadas por un pedestal y dos brazos de tubo estructural. Las principales características del prototipo de heliostato desarrollado, en comparación con el anterior, se presentan en la Tabla 3.2.1:

Concentrador	Modelo anterior	Prototipo actual
Estructura del soporte	brazos y pedestal en forma T con 4 armaduras	brazos y pedestal en forma T con cuatro armaduras
Superficie reflectiva	25 facetas de 1.2 m x 1.2 m	32 facetas de 1.3 m x 0.9 m
Área reflectiva	rectangular de 36 m ²	herradura de 37.5 m ²
Frecuencia de limpieza	Cada 15 días	Cada 5 meses
Peso de facetas	600 kg	416 kg
Peso total estructural	1,312 kg	757.4 kg
Concentración pico ideal	(sin deformación) 18.3 kW	(con deformación) 33.6 kW
Cabezal	corona tornillo sinfín, actuador lineal. (Joyce-Dayton/Winsmith)	Cabezal "cero juego" (UNAM/Pirámide)
Backlash	32 mrad	< 3 mrad
Posición de descanso	horizontal hacia arriba (90°)	horizontal hacia abajo (-90°)

Tabla 3.2.1. Comparación de características entre los dos diseños de helióstatos.

En éste helióstato se integra una nueva versión del cabezal "cero juego", que se ha desarrollado como tecnología propia de la UNAM en colaboración con la empresa Pirámide Estructural del Golfo. El cabezal

provee los movimientos en elevación y acimut, mediante el mecanismo de cable tensado por el acoplamiento de ejes a la transmisión de poleas-banda dentada. En la Fig. 3.2.3 se muestra una imagen del prototipo de heliostato instalado en el campo, junto con la versión 2 del cabezal "cero juego", diseñado para él.





Figura 3.2.3. prototipo de helióstato de 37.5 m² en herradura y cabezal "cero juego", versión 2. durante la instalación del helióstato.

Para el diseño mecánico del helióstato se llevó a cabo un análisis de esfuerzos y deformaciones de la estructura, mediante el software Solid Works®, considerando tanto las cargas por peso como por viento (Fig. 3.2.4). Esto para garantizar que en condiciones de operación (40 km/h) y de supervivencia en vertical (70 km/h), el helióstato pueda resistir dichas cargas sin destruirse.



Figura 3.2.4. Análisis de deformaciones del prototipo de helióstatos de 37.5 m², bajo cargas de viento.

A partir del diseño llevado a cabo, el prototipo de helióstato de 37.5 m² fue construido e instalado en el CETOC. Se colocó en una de las posiciones más lejana del campo, la N2, localizada 206.9 m al norte de la torre y 7.34 m al oriente del eje norte sur. Se procedió a llevar a cabo pruebas para evaluarlo, las cuales se encuentran concluidas y se describirán en una sección posterior.

El segundo prototipo que se propuso en el período anterior y que se ha venido desarrollado es el de 2.25 m². Este prototipo incorpora una idea novedosa de mecanismos reductores cuyo principio de transmisión es por fricción. Se utilizan 2 etapas de reducción, la primera mediante un juego de engranes tipo tornillo sinfín y corona, a la salida de los motores y la segunda consta de una rueda y un tambor de fricción (Fig. 3.2.5).



Figura 3.2.5. Diseño del prototipo de helióstato de 2.25 m².

El prototipo diseñado ha sido construido (Fig 3.2.6) y se han llevado a cabo pruebas con el mismo en interiores, para caracterizar la respuesta de la transmisión así como probar diferentes opciones para encoders. Esto ha servido para corregir problemas de funcionamiento con los mecanismos. Próximamente se comenzarán las pruebas de este prototipo en el CETOC.





Figura 3.2.6. Fotografías del prototipo de heióstato de 2.25 m², durante as pruebas de laboratorio (sin facetas reflejantes).

3.2.3 Implementación de infraestructura y metodologías para evaluación de helióstatos

Como se ha reportado en el período anterior se tienen implementadas varias metodologías para evaluación de helióstatos en el CETOC, como las pruebas: de mancha solar reflejada, de reflexión de franjas, de medición radiométrica del flujo radiativo concentrado de helióstatos, de prueba seguimiento solar y de prueba de precisión de cabezal.

En particular, la prueba de apuntamiento de cabezal, es una prueba de repetitividad que se realiza montando un láser en el cabezal y apuntándolo hacia diferentes puntos alternativamente (Fig. 3.2.7). La prueba se efectúa nocturnamente para optimizar la visión de la luz láser por las cámaras. Esta prueba se realiza con el cabezal sin carga de estructura o espejos y sirve para evaluar el backlash o juego de la transmisión con precisión. Moviendo el láser de ida y vuelta entre varios blancos fijos, se puede evaluar la precisión con que el sistema puede regresar a un mismo punto con y sin cambio de dirección de giro.



Figura 3.2.7. Arreglo experimental de la prueba de apuntamiento de cabezal

A pesar de que las actividades fundamentales en este apartado ya se han concluido, se ha continuado con la investigación sobre metodologías de evaluación. En particular, se ha seguido llevando a cabo investigación sobre el método de reflexión de franjas para evaluación de concentradores solares. En este período se ha hecho investigación y desarrollo sobre la aplicación de estos métodos a la evaluación de sistemas de canal parabólico (Fig. 3.2.8).

También se viene trabajando sobre la evaluación de la distribución de flujo radiativo concentrado producido por helióstatos individuales, con base a un método combinado de toma de imágenes, mediciones radiométricas y simulaciones de trazo de rayos.



Figura 3.2.8. Imagen de franjas reflejadas por una faceta de canal parabólico y mapeo de desviación de franjas obtenidas a partir de ellas.

3.2.4 Pruebas del prototipo desarrollado e identificación de puntos de mejora

Como se mencionó más arriba el prototipo de 37.5 m² fue instalado y puesto a prueba en el Campo Experimental de Torre Central. Se aplicaron tres pruebas: precisión de apuntamiento de cabezal, mancha solar reflejada y de reflexión de franjas.

La prueba de precisión de apuntamiento del cabezal, se pudo observar que, en efecto, la versión 2 del cabezal "cero juego" tiene un juego (backlash) muy reducido, dando una precisión de 0.67 mrad en el cambio de dirección. Por otra parte, en la prueba de mancha solar reflejada (Fig. 3.2.9) se pudo identificar oscilaciones con una desviación estándar de 2.01 mrad.

Una observación adicional en la prueba de mancha solar reflejada, fue un comportamiento de agrandamiento y reducción oscilatoria del tamaño de la macha debido a las cargas de viento. Esto es indicativo de una deformación de la estructura que va más allá de lo deseable.

En la prueba de reflexión de franjas (Fig. 3.2.10) pudo registrarse el efecto de deformación de la faceta mediante los tornillos actuadores instalados para ese propósito. Como puede observarse, la deformación de las facetas para producirles curvaturas fue sólo parcialmente exitosa, pues aunque en el centro se logra una curvatura apreciable en las esquinas casi no se logra deformarla.



Figura 3.2.9. Prueba de mancha solar reflejada aplicada al prototipo de 37.5 m². Imagen de la mancha solar producida en el blanco Lambertiano (izquierda) y curvas de posición vertical y horizontal, con sus respectivos ajustes polinómicos.

Como observación general cabe destacar que la imagen observada presenta un spot central bien definido, aunque se puede apreciar cierto desbordamiento del spot central (Fig. 3.2.9). El desbordamiento es provocado por cinco facetas tensionadas, efecto causado por deformaciones del marco estructural, el cual resulta ser demasiado flexible. La Fig. 3.2.10 nos revela como, aun en ausencia de actuación de los deformadores, la estructura de soporte de faceta induce tensión en el espejo provocando falta de planicidad.

De hecho, en cuanto a la deformación de las facetas para curvarlas pudo observarse que no tiene caso incorporarla para helióstatos que estén a distancias mayores de 100 m con respecto a la torre. Debido a los errores ópticos que aparecen en las facetas debido a deformación de sus marcos y de la estructura en general y a la precisión en la deformación, la curvatura de las facetas no hace una diferencia notoria en el tamaño de spot para distancias tan grandes. Se observa que el espesor de vidrio de 3 mm ha sido suficientemente resistente aún en condiciones de altas velocidades de viento y por lo tanto es adecuado.



Figura 3.2.10. Mapa de pendientes de la faceta con y sin deformación, obtenidas a partir de la prueba de reflexión de franjas.

El concepto de cabezal "cero juego" resulta muy satisfactorio en términos de precisión y velocidad de movimiento. El cabezal es capaz de operar en un amplio rango de giro adecuadamente, para producir una posición de descanso boca abajo del helióstato. Sin embargo, se pudo observar también un problema importante con el cabezal: presenta cierto grado de reversibilidad, debido a la configuración interna de la transmisión. Esto da como resultado que bajo cargas de viento importantes (mayores a 100 km/h) el helióstato pueda llegar a salirse de la posición de seguridad horizontal y encarar parcialmente al viento. De hecho, una tormenta con velocidades de viento superiores a los 120 km/h, ocurrida el 19 de agosto de 2013 en el CETOC produjo un accidente de este tipo, ocasionando la ruptura de una de estas transmisiones (la Versión 1, instalada en la posición J0).

A partir de las pruebas y las observaciones realizadas los puntos de mejora que deberán considerarse para una siguiente versión del helióstato son los siguientes:

- Es necesario reforzar las armaduras (celosías), para reducir la flexibilidad de la estructura y las consecuentes pulsaciones del spot.
- Es necesario modificar el mecanismo de canteo de las facetas, que en definitiva no resultó tan práctico como se esperaba.
- Debe modificarse el mecanismo de deformación de facetas y considerar sólo incorporarlo en helióstatos cercanos a la torre.
- Debe eliminarse la reversibilidad del cabezal.
- Podría ser conveniente reforzar un poco los marcos de las facetas, para reducir la deformación no deseada de las mismas.

3.2.5 Mejora del diseño y construcción de 650 m2 de helióstatos

A partir de los resultados obtenidos en la evaluación descrita en la sección anterior, se ha comenzado el diseño de un nuevo prototipo de helióstato. Se construirán nuevos prototipos que incorporen estas mejoras y

una vez probados, se procederá a la fabricación del resto de los helióstatos del CETOC durante el siguiente período.

3.2.6 Diseño de comunicación inalámbrica para control de helióstatos.

Se tiene actualmente instalados en el CETOC cuatro helióstato que utilizan comunicación inalámbrica (3 Zig Bee y 1 Wi-Fi) y se ha encontrado que la comunicación con ellos es problemática. Para iniciar la recopilación de datos e información para estudiar estos problemas se colocaron equipos tales como analizadores de espectro (fijo y portátil), antenas (directivas y omnidireccionales) y transmisores, dentro del campo de helióstatos. Se realizó el trabajo siguiendo un método específico para la detección de problemas en sistemas de comunicaciones inalámbricas:

- 1. Análisis espectral del sitio.
- 2. Pruebas de reflectometría del sitio por ubicación de obstáculos metálicos (estructuras de helióstatos).
- 3. Análisis espectral del segmento de radiofrecuencia "Zig Bee".
- 4. Emular con portadora pura, la transmisión (en frecuencia Zig Bee) omnidireccional y direccional y así obtener el diagrama de potencia radiada para distintas "Azimuth" y "Rangos".
- 5. Establecer horarios para realizar monitoreo/pruebas, diurno o nocturno.
- 6. Verificar la configuración Radios-Tx/Rx, potencia, frecuencia, antenas.

Las frecuencias en las que trabaja la tecnología Zig Bee en algunos países es de 800 a 900 MHz, pero en la mayor parte de América el utilizado es de 2 a 2.5 GHz. En el CETOC la utilizada es 2.4 GHz, pero con una baja potencia. La frecuencia de trabajo de la radio base de telefonía móvil es de 886 MHz. El ancho de banda en que el CERESO 2 de Hermosillo, situado 500 m del CETOC, trabaja para atenuar las ondas electromagnéticas es de 800 a 900 MHz.

Con el analizador de espectro se buscó alguna otra portadora que no se tuviese contemplada al iniciar el análisis espectral, por ejemplo algún problema con las torres de transmisión de alta tensión cercanas al lugar. La prueba de reflectometría arrojó resultados valiosos (Fig. 3.2.11) que dan cabida a posibles soluciones al problema. Se encontró que la atenuación de la señal debido al obstáculo de los soportes metálicos es considerable, por lo tanto, con estos dos últimos puntos se concluye que la localización de las antenas de cada helióstato no es la mejor. Al estar las antenas con los heliostatos en posición segura no se reduce considerablemente la señal, pero al estar el heliostato operando (reflejando hacia la torre) la señal será atenuada casi en su totalidad.

A partir de las pruebas realizadas, se han propuesto una serie de posibles soluciones que deberán ser exploradas:

- Utilizar tecnología Wi-Fi para la transmisión de datos con una antena directiva.
- Aumentar la potencia considerablemente de la transmisión Zig Bee actual, requiriendo un amplificador.
- Cambiar la localización de transmisión el extremo norte del campo y de igual manera con una potencia considerable.
- Bajar la antena de transmisión a media altura de la torre.
- Subir las antenas receptoras por arriba de las estructuras de los helióstatos.

- Instalar una línea de transmisión terrestre que rodee a todos los helióstatos, y cada uno de éstos será conectada a éste, provocando una transmisión Punto-Multipunto (la misma información llegará a todos, solo el indicado la llevará a cabo).
- Diseñar un protocolo de comunicación a una frecuencia de 600 MHz, con antena omnidireccional y amplificador, la ventaja es no tener necesariamente una transmisión muy directiva y que permitirá que llegue a todos los puntos del campo. La frecuencia de 2.4 GHz fue buena, pero requerirá de una antena muy directiva.



Figura 3.2.11. Valores obtenidos con las prueba de reflectometría.

3.2.7 Revisión literaria y estudio de transferencia de calor en receptores térmicos

Se llevó a cabo una revisión de la literatura relacionada a los receptores de sistemas de torre central y a los mecanismos de transferencia de calor en los mismos. La lista de referencias se presenta en los apéndices A4.2 y A4.3, para receptores de cavidad y volumétricos, respectivamente.

Receptores de cavidad

Las principales conclusiones a las que se llegó en la revisión para receptores de cavidad fueron:

- Se aprecia que los estudios al inicio consideraron solamente la convección natural y necesitaba datos experimentales que corroboraran los mecanismos e hipótesis supuestas, como el caso de Clausing (1981 y 1983).
- Recientemente Fang et al. (2011) encontraron que el viento afecta al receptor de cavidad especialmente cuando este incide en forma paralela a la abertura, es decir, cuando el viento llega con

una dirección de 90° alcanzando un máximo de 16% para una velocidad de 9 m/s. Lo anterior contradice lo reportado por McMordie (1984) que concluyó que las pérdidas de calor debido a las corrientes de viento eran despreciables.

- La mayoría de los estudios que toman en cuenta la transferencia de calor por radiación como Steinfeld y Schubnell (1993), Wang et al. (2010) y Fang et al. (2011), utilizan el método de Monte Carlo, a excepción de Reynolds et al (2004) que utilizan el método radiativo de transferencia discreta y Hahm et al (1998) que utilizan el método de radiacion-irradiancia.
- Hasta el momento no se ha encontrado ningún estudio que consideré un régimen de flujo de fluido turbulento para el estudio de pérdidas de calor en el receptor de sistemas de torre central.
- En el año del 2002, Romero et al. realizaron una actualización sobre el estado del arte en sistemas solares de torre central teniendo como una de las conclusiones que los receptores solares alcanzan una eficiencia que oscila entre el 75 y 90%.
- Diseños recientes de plantas termosolares han retomado el diseño de sistemas de almacenamiento de energía con sales fundidas como es el caso de Hasuike et al (2006).
- Se puede concluir a partir de la revisión bibliográfica, que no se ha reportado un estudio teóricoexperimental de la transferencia de calor, que considere la convección (natural y forzada) en régimen turbulento y el intercambio radiativo en forma combinada, en receptores de sistemas de torre central.

Receptores volumétricos

Se analizaron las publicaciones recientes sobre receptores volumétricos. Las referencias principales y sus aportaciones se describen a continuación

Pitz-Paal et al (1997), propusieron un enfoque analítico para tomar en cuenta la distribución radiativa en tres dimensiones y su influencia sobre el flujo del fluido. Garcia-Martin et al. (1999), propusieron un control automático que permite una distribución de temperatura apropiada para un receptor volumétrico. Marcos et al. (2004), estudiaron el efecto de varios parámetros geométricos y el sistema de inyección del aire sobre la tasa de retorno. Fend et al. (2004), analizaron dos materiales altamente porosos adecuados para la construcción de receptores volumétricos. Fend et al. (2004 b), reportaron la metodología y resultados de la conductividad térmica, el coeficiente convectivo de transferencia de calor y la eficiencia de materiales monolíticos. Becker et al. (2006), estudiaron analítica y numéricamente el comportamiento del flujo en un material poroso. Avila-Marin (2011), presentó un resumen de más de veinte receptores volumétricos: diseño, materiales y desempeño.

Villafán-Vidales et al. (2011), analizaron numéricamente la transferencia de calor en un receptor volumétrico de espuma cerámica porosa de 1 kW para generar hidrógeno. Wu et al. (2011), desarrollaron un modelo macroscópico en estado estable para encontrar la distribución de temperatura en una espuma cerámica en un receptor volumétrico. Wu et al. (2011 b), estudiaron numéricamente el coeficiente convectivo de transferencia de calor entre el flujo de aire y una espuma cerámica porosa en un receptor volumétrico. Xu et al. (2011), resuelven un modelo de transferencia de calor en un medio poroso de un receptor solar.

Cui et al. (2012), desarrollaron un modelo óptico tridimensional para un receptor volumétrico presurizado y se simuló la propagación de la radiación solar con el método de Monte Carlo. Veeraragavan et al. (2012), desarrollaron un modelo analítico para investigar el efecto de las pérdidas de calor, carga de partículas, concentración solar y altura del canal sobre la eficiencia de un receptor. Behar et al. (2013) realizaron un análisis sobre estudios de receptores en plantas termosolares. Cheng et al. (2013), combinaron el método de volumen finito y el método de trazado de rayos de Monte Carlo para examinar el desempeño del proceso de conversión en un receptor volumétrico presurizado.

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

En el proceso de análisis del problema para seleccionar el tipo de receptor a desarrollar, se han llevado a cabo simulaciones de dos tipos de intercambiadores para recibir la radiación solar y transferir el calor a un fluido: receptores de cavidad y receptores externos de placa plana.

Receptores de cavidad

En el primer caso, se ha simulado la transferencia de calor combinada convectiva radiativa en el interior de cavidades de diferente geometría basada en dimensiones adecuadas al CETOC y geometrías similares a las que se han descrito en la literatura (Fig. 3.2.12). Se estudió casos con sólo convección natural, pero también el efecto de la velocidad y dirección de viento en las pérdidas por los receptores.



Figura 3.2.12. Configuración de cavidades estudiadas.

En la Fig. 3.2.13 se muestran algunos resultados comparando las distribuciones de temperatura que se obtienen en los diferentes receptores, incluyendo la cavidad y parte de su dominio extendido. Por otra parte en la Tabla 3.2.2 se presentan los flujos de pérdidas de calor radiativos y convectivos para los diferentes casos y para incidencia de viento tanto perpendicular como paralela al plano de apertura de la cavidad.



Figura 3.2.13. Distribución de temperaturas para transferencia de calor combinada en las diferentes configuraciones bajo estudio. La línea punteada vertical separa el interior de la cavidad de su dominio extendido, que se encuentra a la derecha de la línea.

Algunos de los resultados principales que se encontraron en el estudio de transferencia de calor en las diferentes configuraciones de cavidad son:

- El cambio (mayor área) en la geometría del receptor trae como consecuencia el aumento de las pérdidas de calor.
- La aportación radiativa a las pérdidas de calor es de alrededor de 70% cuando solo se considera la convección natural, mientras que cuando se considera la convección forzada esta aportación decae

hasta ser de alrededor de 30%.

- Para la temperatura en la abertura se presentan valores máximos de 560 K en casos 1 y 3, mientras que para el caso 2 se tiene el valor mínimo de 420 K. Al considerar convección forzada estos valores decaen hasta 220 K para el caso 3 perpendicular y un valor máximo de 480 K para el mismo caso con corriente paralela.
- Los valores máximos de velocidad se tienen en 1 y 3 con valores de 2.2 y 2 m/s mientras que para el caso 4 se tiene el valor mínimo de 1.4 m/s. Al considerar la acción del viento se presentan un valor mínimo de 4 m/s para el caso 3 perpendicular y un máximo de 24 m/s para el caso 4 paralelo.
- En el flujo de calor en la pared caliente se tienen similitudes en los casos de convección natural (1 al 4) pero al considerar convección forzada se puede apreciar cambios significativos en estos. Así también, es apreciable el aumento de pérdidas de calor para los casos en donde se considera la acción de una corriente de viento.

Tabla 3.2.2. Flujos de pérdidas de calor en receptores de las diferentes configuraciones para direcciones de viento paralela y perpendicular a la abertura.

Cavidad	Velocidad (m/s)	Total (kW)	Radiativo (kW)	Convectivo (kW)
1	0	187	134 [71 %]	52 [29 %]
2	0	192	131 [68 %]	60 [32 %]
3	0	215	147 [68 %]	67 [32 %]
4	0	214	148 [69 %]	65 [31 %]
3	10	307	118 [38 %]	189 [62 %]
4	10	324	117 [36 %]	207 [64 %]
3	10	249	137 [55 %]	112 [45 %]
4	10	358	109 [30 %]	249 [70 %]
4 y	10	445	109 [24 %]	336 [76 %]

Receptor externo

Además de los receptores de cavidad se ha llevado un estudio sobre un receptor calorimétrico plano enfriado con agua. Debido a que la remoción de calor se encontró inapropiada en un receptor de placas paralelas simple, se decidió incorporar un diseño de aletas internas para aumentar el flujo de calor.

En el caso de este receptor se hizo el estudio de la transferencia de calor interna para establecer la mejora en la transferencia de calor al agregar aletas (Fig. 3.2.14). En dicho estudio (Fig. 3.2.15) se observaron los siguientes cambios al agregar las aletas al interior del receptor, con respecto al caso sin aletas:

- La magnitud máxima de velocidad se incrementó 40%.
- El valor más bajo de la velocidad se incrementó en 150%.
- La temperatura de salida del fluido se incrementó ligeramente debido a la adición de aletas.
- Se produjo mayor estratificación de la temperatura en el interior.
- La capa límite térmica sufrió un adelgazamiento considerable.
- El flujo total de calor removido por el fluido de la pared se incrementó 127%.



Figura 3.2.14. Diseño del receptor calorimétrico plano con aletas internas para incrementar la transferencia de calor al agua.



Figura 3.2.15. Distribución de temperaturas en la placa (derecha) y en cortes transversales del receptor calorimétrico plano.

Finalmente, se llevó a cabo un estudio para estimar el efecto de diferentes tamaños de receptor calorimétrico en la evaluación de la potencia concentrada por un helióstato. Esto se hizo basándose en evaluar la potencia contendida en diferentes áreas de distribuciones de irradiancia reales de helióstatos, las cuales se tomaron de imágenes obtenidas en el receptor de la torre del CETOC (Fig. 3.2.16). Se analizó el efecto de desplazamientos aleatorios del spot debido a cargas de viento en dicha evaluación.



Figura 3.2.16. Representación de la distribución de irradiancia relativa producida por un helióstato (izquierda) y mancha reflejada correspondiente a la misma, donde se ilustra el efecto del tamaño y desplazamiento de un receptor cuadrado en la captación de potencia (derecha).

En la Tabla 3.2.3 se muestra el resultado de esta evaluación para tres imágenes representativas diferentes y diferentes tamaños de receptor. Como puede observarse, las desviaciones estándar, las cuales serán la medida aproximada de la desviación estándar obtenida en un experimento, son en general menores al 10%. En particular, se observa que con un área de calorímetro de 1x1 m² se obtendrían desviaciones estándar menores al 2% de la potencia total interceptada por dicha área, las cuales se reducen a cerca del 1% con un área de 1.5x1.5 m². Por lo tanto, se concluyó que un calorímetro con área entre estos dos valores sería perfectamente adecuado para el objetivo de medir la potencia concentrada por los helióstatos.

	1666	ptoi	
Receptor	Imagen A	Imagen B	Imagen C
Tamaño (cm)	$\sigma_Q/\langle Q \rangle$ (%)	$\sigma_Q/\langle Q \rangle$ (%)	$\sigma_Q/\langle Q angle$ (%)
50	2.8	1.7	2.9
100	1.6	1.9	1.5
150	1.2	1.3	0.9
250	0.4	0.5	0.4
400	0.1	0.1	0.2

Tabla 3.2.3. Desviación estándar normalizada de la potencia medida debida a desplazamientos aleatorios del receptor

3.3 Laboratorio de sistemas fotovoltaicos con concentración

Se ha decidido que este subproyecto Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos con Concentración sea el que se reduzca más para compensar el recurso limitado aprobado para el proyecto, al ser un proyecto totalmente nuevo. Esto, buscando consolidar las infraestructuras de los otros dos, las cuales ya se encuentran desarrolladas del LACYQS I. Por lo tanto se considera destinar una cantidad no superior a 1.5 millones de pesos para este subproyecto.

3.3.1 Diseño de CPV

Para esta tarea, en primer lugar se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre los sistemas fotovoltaicos con concentración (CPV).

Revisión bibliográfica.

Se revisaron 40 artículos relacionados con el tema de concentración solar fotovoltaica, se observan dos grandes directrices, la primera se enfoca al desarrollo de materiales que puedan ser sometidos a altos flujos radiativos y su respuesta a estos, y la segunda que se enfoca a los elementos ópticos secundarios o terciarios del concentrador, con el fin de optimizar la manera en que se homogeniza el flujo de radiación solar concentrado que sale del primer elemento óptico del concentrador fotovoltaico.

En esta primera etapa del proyecto, nos enfocamos principalmente en recabar y analizar información publicada de la segunda directriz mencionada en los artículos de concentración fotovoltaica, ya que es prioritaria para el diseño óptico de los prototipos y la óptima operación de las celdas. Algunas de las publicaciones de sistemas de homogenización de flujo radiativo concentrado incluyeron lentes Fresnel y muchos otros de plato parabólico, en ambos casos sus homogeneizadores pueden seguir siendo útiles con otros tipos de concentradores bajo ciertas adaptaciones, ya que el principio de concentración es puntual; en el caso de la homogeneización para focos lineales el tratamiento es diferente y conviene hacer una valoración propia dada la escasa información, en gran parte debida a la competencia de los mercados y la protección de sus productos.

Simulación de prototipos de CPV para el HOSIER y mini horno

Los primeros prototipos de concentración solar fotovoltaica que se ha diseñado en el IER, serán implementados en el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HOSIER) y el mini horno solar, ya que estos sistemas permiten tener condiciones controladas de prueba. En particular, el HOSIER cuenta con infraestructura sofisticada, tanto óptica como de automatización, lo que nos permitirá tener absoluto control de la intensidad y posicionamiento de la radiación concentrada. De esta manera es posible proteger las celdas fotovoltaicas que sean sometidas a altos, medios o bajos flujos radiativos, de su deterioro o destrucción debido al incremento de la temperatura.

Dado que el principal problema que representa la concentración solar en celdas fotovoltaicas es precisamente la no uniformidad de intensidades de radiación incidentes en su superficie, es necesario desarrollar sistemas de homogeneización de flujo radiativo concentrado. En este sentido se están llevando a cabo simulaciones de trazado de rayos de homogenizadores de diferentes geometrías, tales como los "Mirror light pipes" (Fig. 3.3.1). Estas simulaciones se realizan considerando como concentradores el HOSIER y el Mini Horno Solar del IER. Se encontró que las secciones transversales de 4, 6 y 8 caras resultan las mejores para homogeneizar y que cuentan con una longitud característica en la que su desempeño es mejor, sin ser esta la longitud máxima como lo reportan algunos autores.



Figura 3.3.1. Uniformidad de flujo radiativo (desviación estándar del flujo normalizada al promedio) para homogeneizadores de diferente geometría, en función de la longitud, basada en el HOSIER como concentrador.

En el caso del mini horno y debido a su número reducido de facetas se planteó un diseño más complejo de homogenizador a simular: un homogeneizador de área transversal Hexagonal, conectado a un conjunto de 7 Homogeneizadores Hexagonales y 6 Homogeneizadores con romboides como área transversal, con el fin cubrir toda el área de salida, a este homogeneizador se le llamo "homogeneizador panal de miel". En la Fig. 3.3.2 se muestran la configuración propuesta y los resultados de la simulación de trazo de rayos.





Figura 3.3.2. Vista transversal del Homogeneizador Panal de Miel (derecha) y distribución de flujo radiativo obtenida del trazo de rayos en la apertura de salida del mismo (derecha).

3.3.2 Construcción de prototipos

El prototipo es una adaptación al HoSIER resultado de los análisis anteriormente mencionados, este consiste en un homogeneizador cuadrangular con paredes interiores reflectivas de 50 cm de longitud y 12 cm de lado interior de cada cara, el cual descansa en un soporte inmóvil que lo centra en el foco del concentrador, sujetado lateralmente por cuatro estructuras que la dan rigidez mecánica y una correcta alineación respecto al eje focal (Fig. 3.3.3).



Figura 3.3.3. Prototipo de homogenizador para CPV, instalado en la mesa de posiciones del HOSIER.

En el próximo período, una vez caracterizado el comportamiento y los parámetro de operación segura del CPV, se colocarán a la salida del homogeneizador un arreglo de celdas fotovoltaicas, para la generación de corriente eléctrica, sin utilizar necesariamente la potencia máxima que ofrece el HOSIER, aunque con las adaptaciones pertinentes y aplicando homogeneizadores de mayor área de salida pueda llegarse a tener una apertura del atenuador del 100% y un arreglo fotovoltaico más grande.

3.3.3 Evaluación y caracterización de prototipos de CPV

El primer prototipo de prueba para estudiar los homogenizadores tipo "Mirror light pipes" se ha instalado en el HOSIER (Fig. 3.3.3 y 3.3.4). Los experimentos para evaluar el homogenizador utilizarán una cámara digital, unida por un brazo a un blanco Lambertiano, los cuales se desplazarán dentro del homogeneizador por medio de la mesa de trabajo móvil, a la cual ambos se encuentran sujetos. Esto permitirá analizar la homogeneización de flujo radiativo en un rango de 0-50 cm de longitud, sin necesidad de reajustar el enfoque de la cámara o detener en algún momento el experimento.



Figura 3.3.4. Montaje de cámaras para el experimento, visto a través del homogenizador.

Este experimento permitirá analizar también el incremento y distribución de la temperatura en el homogeneizador y a la salida de este, las pérdidas de energía debidas a la absortividad del material con el que este fue fabricado, la correcta caracterización del flujo concentrado y la disipación de calor en celdas fotovoltaicas de concentración densamente empaquetadas.

Otras formas de evaluar el flujo homogeneizado y que pueden realizarse, dada la experiencia en la adquisición y manejo de datos que posee el grupo son las siguientes:

- Caracterización por medio de la visualización de una pantalla parcialmente transparente a la salida o en alguna posición dentro del homogeneizador con una cámara CCD.
- Caracterización del flujo radiativo en el receptor dentro o a la salida del homogeneizador por medio de un enmallado de fotodiodos.
- Caracterización de la distribución del flujo radiativo en el receptor dentro o a la salida del homogeneizador por medio de termopares.

3.3.4 Mejoramiento y optimización de los prototipos

No ha habido avances en esta actividad debido a la recalendarización discutida en la sección 1 de este reporte.

3.4 Actividades de difusión y vinculación

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

3.4.1 Difusión

En la parte de difusión existen varias acciones que se han desarrollado:

Visitas guiadas

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.

Fecha	Institución	# Visitantes
10/01/0010		
10/01/2013	AERNO	6
31/01/2013	Ganadores Concurso Regional	50
14/02/2013	Televisión China	3
04/03/2013	Licenciatura en Arquitectura UNISON	15
21/03/2013	Escuela Secundaria 66	17
16/05/2013	Universidad de la Sierra	35
27/06/2013	Universidad Tecnológica de Hermosillo	36
Año 2012	Visitas varias	250
	TOTAL:	312

Tabla 3.4.1. Visitas de divulgación al CETOC durante 2013.



Figura 3.4.1. Visita de la Universidad de La Sierra – Mayo 16, 2013.

De la misma manera, en el Centro de Investigación en Energía, ahora Instituto de Energías Renovables, se tiene implementado un programa de visitas guiadas a la institución que se realiza todos los jueves y que incluye la visita al HOSIER del LATEQS. Estas visitas son de grupos de estudiantes de diferentes instituciones del país, principalmente de nivel bachillerato y licenciatura. Aproximadamente los grupos han contado con 30 personas, por lo que en el período, la instalación la han visitado aproximadamente 1,000 personas.

Conferencias de divulgación

Se han impartido una serie de conferencias de divulgación para diversos públicos por parte de algunos académicos participantes en el proyecto y en las cuales se hace referencia explícita a LACYQS II, entre ellas están las siguientes:

- 1. "Energía Solar", Marzo 21, 2012. Camilo Alberto Arancibia Bulnes, Secundaria Nuevos Horizontes, Hermosillo, Sonora.
- 2. "Investigación realizada en la Coordinación de Concentración Solar", Abril 13, 2012. Heidi Isabel Villafán Vidales. Centro de Investigación en Energía.
- 3. "Combustibles solares limpios a partir de energía solar concentrada", Junio 29, 2012. Heidi Isabel Villafán Vidales. Posgrado de la facultad de Ingeniería Química, UMSNH.
- 4. Conferencia Magistral: "La Energía Solar en el Noroeste de México", Septiembre 5, 2012. Claudio A. Estrada. 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..
- 5. Conferencia Magistral: "Energía Sostenible para Todos", Octubre 8, 2012. Claudio A. Estrada. LV Congreso de la Sociedad Mexicana de Física. Morelia, Michoacán.
- "Laboratorio nacional de sistemas de concentración solar y química solar", Octubre 22, 2012 Camilo Arancibia Bulnes, , dentro de la 19a Semana Nacional de Ciencia y Tecnología, Universidad del Valle de México, Campus Hermosillo.
- 7. "Energía sustentable para todos". Camilo Alberto Arancibia Bulnes, Noviembre 13, 2012, dentro de la Feria Científica 2012, Facultad de Ingeniería de la UADY, Mérida, Yucatán.
- 8. "Tecnologías de aprovechamiento de la energía solar", Enero 23, 2013. Claudio A. Estrada. División de Ingeniería Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora.
- 9. "Tecnologías de aprovechamiento de la energía solar", Enero 24, 2013. Claudio A. Estrada. Estación Regional del Noroeste del Instituto de Geología UNAM. Hermosillo, Sonora.
- 10. "Producción de combustibles solares con energía solar concentrada", Marzo 14, 2013. Heidi Isabel Villafán Vidales. Universidad Politécnica del Estado de Guerrero.
- 11. "Energía y Cambio Climático", Abril 18, 2013. Claudio A. Estrada. Coloquio Planeación y Desarrollo Energético en Sonora. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora.
- 12. "Investigación en Concentración Solar", Septiembre 13, 2013. Claudio A. Estrada. Seminarios de la Dirección del Instituto de Energías Renovables UNAM. Temixco, Morelos.

Visitas Especiales

1. Visita del Secretario de Energía del Gobierno Federal al CEToC del LACYQS

El 17 de abril del 2013, el secretario de Energía, Pedro Joaquín Coldwell, acompañado de la subsecretaria de electricidad Lourdes Melgar, realizaron una visita al CEToC del LACYQS para conocer las instalaciones y lo que ahí se está desarrollando. Lo recibió el Dr. Heriberto Grijalva Monteverde rector de la UNISON, en compañía del Dr. Enrique Velázquez, Secretario Académico General de la UNISON y del Dr. Claudio A. Estrada, responsable general del proyecto. También estuvieron presentes otras autoridades y académico tanto de la UNISON como de la UNAM. El Dr. Estrada dio una explicación del proyecto durante el recorrido y el secretario comentó: "....Vemos aquí en este campo el gran potencial solar que tiene el país, lo mismo que las grandes urgencias de diversificar nuestra 'canasta' de energía solar para ya no depender de una sola fuente, sino más bien preparando la transición energética que la humanidad hace de las fósiles a las renovables, y México no puede quedar rezagado en este esfuerzo". También afirmó que Sonora tiene condiciones excepcionales para este tipo de investigación, y aseguró que el Gobierno Federal dará todo el respaldo para tener aquí un centro de innovación tecnológica con toda la infraestructura que se requiere.

El rector Grijalva Monteverde, por su parte destacó la trascendencia de desarrollar investigación sobre el aprovechamiento de la radiación solar como alternativa para la generación de energía eléctrica y combustibles, y sostuvo que esta tecnología constituye una sede de investigación y desarrollo tecnológico para también generar conocimiento científico y tecnológico. Dijo: ".... Aquí se tiene una tecnología basada en voluntad y colaboración con distintas instancias en la búsqueda de cumplir un papel importante en esa área prioritaria para México". El rector agradeció el respaldo del Gobierno Federal, a través de la Secretaría de Energía, así como de la UNAM, por su disposición de establecer una alianza estratégica para crecer en esta área. (Fuente: Comunicación y Difusión, Universidad de Sonora).



Fotografías del evento donde aparece el Secretario de Energía y el Rector de la UNISON con otros funcionarios y académicos responsables del proyecto.

2. Inauguración del Campo de Pruebas de Helióstatos

La inauguración del Campo de Pruebas de Helióstatos ocurrió fuera del período del presente informe, sin embargo por considerar importante documentar el evento, se incluye en el informe actual.

El pasado 28 de octubre de 2011, se llevó a cabo la inauguración del Campo de Pruebas de Helióstatos en el Campo Experimental del Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora (UNISON) en Hermosillo, Sonora.

Esta instalación es una de las tres con las que cuenta el Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS). Este Laboratorio Nacional ha sido cofinanciado por el CONACYT, la UNAM y la UNISON.

Entre las autoridades que estuvieron presentes en la inauguración se encuentran el Gobernador de Sonora (Lic. Guillermo Padrés Elías), el Rector de la UNAM (Dr. José Narro Robles), el Rector de la UNISON (Dr. Heriberto Grijalva Monteverde), el Subsecretario de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico de la Secretaría de Energía (Dr. Sergio Alcocer de Castro), el Director Adjunto de Desarrollo Tecnológico y Negocios de Innovación del CONACYT (Dr. Leonardo Ríos Guerrero) y el Coordinador de la Investigación Científica de la UNAM (Dr. Carlos Arámburo de la Hoz).

Después del acto inaugural, se realizó un recorrido por las instalaciones donde el Dr. Claudio A. Estrada Gasca, Director Técnico del Proyecto, explicó las características del CPH y al final se llevó a cabo una demostración que resultó exitosa. (Fuente: Comunicación y Difusión, Universidad de Sonora)



Varias fotografías del evento donde aparece el gobernador del Estado de Sonora, Guillermo Padrés, el rector José Narro de la UNAM y el rector Heriberto Grijalva de la UNISON con otros funcionarios y académicos.

Páginas Web

Se han creado dos páginas web ligadas al proyecto LACYQS, una por parte de la UNAM y otra por parte de la UNISON. La primera es la página específica del proyecto LACYQS, que está alojada por el IER-UNAM, con la dirección <u>http://lacyqs.cie.unam.mx/es/</u>.

La segunda es la página de la Plataforma Solar de Hermosillo, denominación que se le ha dado al espacio físico y organizacional que alberga al CETOC. El concepto es más amplio que el LACYQS, ya que se pretende que este espacio albergue una variedad de diferentes proyectos solares en el futuro, además de este. La dirección es: <u>http://psh.isi.uson.mx/</u>.

Ambas páginas se encuentran todavía en construcción, por lo cual no se les ha dado una divulgación amplia todavía.

3.4.2 Vinculación

Desde el inicio del proyecto se ha buscado tener contactos con empresas para promover la vinculación del proyecto a los sectores productivo y público. En algunos casos ya existe una fuerte relación con empresas que han ayudado a desarrollar componentes importantes del proyecto en plan de proveedores y con las cuales se ha logrado tener una relación fructífera de colaboración. Esta relación se formalizará próximamente mediante la firma de convenios. En particular se trata de:

- Pirámide Estructural del Golfo, S.A. de C.V. Empresa desarrolladora de sistemas y componentes mecánicas con diseño único para aplicaciones especializadas. Destaca el desarrollo de bombas de tornillo para aplicaciones de crudo pesado de PEMEX.
- Barmex, S.A. de C.V. Es uno de los principales comercializadores a nivel nacional de productos integración para transmisión de potencia mecánica y control de movimiento. También realizan de componentes para proyectos específicos.

Por otro lado, actualmente la UNISON, a través del CETOC, participa en un proyecto denominado "Desarrollo tecnológico para el control de precisión de helióstatos basado en sistemas-embebidos para aplicaciones termosolares", que fue presentado por la empresa Caru Ardica S.A. de C.V., dedicada a la construcción de estructuras mecánicas y maquinaria especializada para procesos industriales ante el CONACYT, resultando favorecido en la convocatoria estímulos a la innovación 2013, en la modalidad PROINNOVA. En este proyecto el grupo del LACYQS colaborará en el desarrollo de prototipos de helióstatos de 15 m².

Además de estos vínculos, se han sostenido reuniones con empresas y autoridades para buscar otras vinculaciones, algunas de las cuales se listan en la Tabla 3.4.2.

Adicional a lo anterior se menciona que desde el proyecto LACYQ-1 se tienen convenios firmados que siguen vigentes con varias instituciones de investigación internacionales que participan en el proyecto, entre estas están: el Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (España), el Centro Nacional de Energías Renovables (España) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (España).

Tabla 3.4.2. Visitas al CETOC y reuniones con empresas y sector público

Fecha	Institución
27/02/2013	Empresa Tierra Luna Solar
17/04/2013	Secretario Energía del Gobierno de la República
11/05/2013	Morgan Stanley
11/07/2013	Secretaría Economía del Gobierno del Estado de Sonora
15/08/2013	Empresa Solar Snaps
21/08/2013	Empresa Suncore
21/08/2013	Empresa RainBird Eólica
11/09/2013	Empresa BCB Automatización

4 Conclusiones

Consideramos que el periodo que se reporta, el proyecto avanzó adecuadamente y dentro de los plazos establecidos. Lo anterior tomando en cuenta los reajustes debido a restricciones presupuestales y los tiempos involucrados en los tramites burocráticos en la gestión de los recursos. Algunas actividades han sido recalendarizadas y se han efectuado otras actividades no programadas.

Por otra parte, se están generando una importante cantidad de resultados de investigación, como se puede ver en la lista de trabajos publicados. También se considera que se está incidiendo de manera importante en la formación de recursos humanos.

Atendiendo a las sugerencias de la evaluación anterior, se han fortalecido los esfuerzos de vinculación y divulgación del proyecto, teniéndose ya los primeros resultados con empresas del sector.

Consideramos que LACYQS, por el tipo de laboratorio que es, inédito en el país y en América latina, que impulsa una industria emergente, tendrá impactos a mediano plazo una vez consolidados las instalaciones y fortalecidos los grupos de investigación y su vinculo con el sector industrial.

Anexos

A1. Publicaciones

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

Artículos en revistas indizadas: 6 (2 publicados, 2 aceptados, 2 enviados)

- 1. D. Riveros-Rosas, R. Castrejón-García, C. A. Arancibia-Bulnes, C. A. Pérez-Rábago, C. A. Estrada-Gasca. "Assessment of a polymeric reflective coating for high concentration point focus applications", Journal of Renewable and Sustainable Energy 4, 063140 (2012).
- H.I. Villafán-Vidales, S. Abanades, C.A. Arancibia-Bulnes, D. Riveros-Rosas, H.Romero-Paredes, G. Espinosa-Paredes, C.A. Estrada. "Radiative heat transfer analysis of a directly irradiated cavity-type solar thermochemical reactor by Monte-Carlo ray tracing". Journal of Renewable and Sustainable Energy 4, 043125 (2012).
- 3. V. H. Benítez Baltazar, J. H. Pacheco Ramírez, N. Pitalúa Díaz. Developing a mini-heliostat array for a solar central tower plant: a practical experience. Aceptado para publicación en Journal of Intelligent Automation and Soft Computing (2013).
- 4. M. Montiel Gonzalez, J. Hinojosa Palafox, C. Estrada Gasca. Numerical study of the Boussinesq approach validity for natural convection and surface thermal radiation in an open cavity. Aceptado para publicación en Revista Mexicana de Física, 2013.
- 5. M. I. Peña-Cruz, C. A. Arancibia-Bulnes, A. Monreal Vidal, M. Sánchez González. Improving parabolic trough mirror module qualification by FOCuS tool. Submitted to Journal of Renewable and Sustainable Energy (2013).
- H.I. Villafán-Vidales, S. Abanades, M. Montiel-González, H. Romero-Paredes, C.A. Arancibia-Bulnes, C.A. Estrada. Transient heat transfer simulation of a 1 kWth moving front solar thermochemical reactor for thermal dissociation of compressed ZnO. Submitted to Chemical Engineering Journal (2013).

Artículos en memorias de congresos internacionales: 15

- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- C. A. Arancibia-Bulnes, R. Peón-Anaya, D. Riveros-Rosas, J.J. Quiñones, R. E. Cabanillas, C.A. Estrada. Beam Solar Irradiation Assessment for Sonora, Mexico. Proceedings of the SolarPACES 2013 Conference, Las Vegas, Nevada, September 17-20. Sometido a Elsevier Energy Procedia.
- C. Iriarte-Cornejo, C. A. Arancibia-Bulnes, J. Waissman, R. E. Cabanillas, C. A. Estrada. Dynamic Drift Compensation for Heliostats. Proceedings of the SolarPACES 2013 Conference, Las Vegas, Nevada, September 17-20. Sometido a Elsevier Energy Procedia.
- L. A. Díaz-Félix, M. Escobar-Toledo, J. Waissman, N. Pitalúa-Díaz, C. A. Arancibia-Bulnes. Evaluation of Heliostat Field Global Tracking Error Distributions by Monte Carlo Simulations. Proceedings of the SolarPACES 2013 Conference, Las Vegas, Nevada, September 17-20. Sometido a Elsevier Energy Procedia.
- L. Ceballos-Mendivil, R. Cabanillas-López, J. Tánori-Córdova, R. Murrieta-Yescas, P. Zavala-Rivera, C. Estrada-Gasca, J. Castorena-González. Materials used in receptors in central tower thermo-solar plants; a review. Proceedings of the SolarPACES 2013 Conference, Las Vegas, Nevada, September 17-20. Sometido a Elsevier Energy Procedia.
- H.I. Villafán Vidales, A. Bautista-Orozco, A. Jiménez-González, C.A. Estrada. Synthesis of tungsten oxides by using the IER-UNAM solar furnace. ISES Solar World Congress, Cancún, Mexico, November 3-7 2013. Sometido a Elsevier Energy Procedia.
- A. Piña Ortiz, J. F. Hinojosa Palafox, C. A. Estrada Gasca. Numerical Study of Heat Transfer Losses by Mixed Convection and Surface Thermal Radiation in an Open Cavity Receiver for a Solar Tower System. ISES Solar World Congress, Cancún, Mexico, November 3-7 2013. Sometido a Elsevier Energy Procedia.
- 15. R. Perez-Enciso, D. Riveros-Rosas, M. Sanchez, C.A. Pérez-Rabago, C.A. Arancibia-Bulnes, H. Romero-Paredes, C.A. Estrada. Three-dimensional analysis of solar radiation distribution at the focal zone of the solar furnace of IER-UNAM. ISES Solar World Congress, Cancún, Mexico, November 3-7 2013. Sometido a Elsevier Energy Procedia.

A2. 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 Concluidas: 11 (Licenciatura 5, Especialidad 1, Maestría 3, Doctorado 2)

- 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.
- 2. Enrique Alejandro Enríquez Velázquez, "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: Víctor Hugo Benítez Baltazar.
- 3. Daniela 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.
- 4. 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 A. Estrada Gasca y Gabriel Ascanio Gasca.
- Elberth Andrés Enríquez Montoya, "Control de Motores vía Bluetooth", Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, Universidad de Sonora, 8 de febrero de 2013. Director de tesis: Víctor Hugo Benítez Baltazar
- Cuitláhuac 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.
- 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.
- 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.
- 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 A. 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.

11. 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.

Tesis en proceso: 19 (Doctorado 7, Maestría 6, Licenciatura 6)

- 1. Ricardo Arturo Pérez Enciso; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM.
- 2. Diana Elisa Rodríguez Sánchez; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM.
- 3. Manuel Ignacio Peña Cruz; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM.
- 4. Alejandro Bautista Orozco; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM.
- 5. Ernesto Anguera Romero; Doctorado en Ingeniería en Energía, UNAM.
- 6. Armando Piña Ortiz; Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Sonora.
- 7. Laura Guadalupe Ceballos Mendivil; Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Sonora.
- 8. Pablo Sosa Flores; Maestría en Ciencias de la Ingeniería (Ingeniería Química), Universidad de Sonora.
- 9. Víctor Manuel Maytorena Soria; Maestría en Ciencias de la Ingeniería (Ingeniería Química), Universidad de Sonora.
- 10. Luís Omar Lara Cerecedo; Maestría en ciencias de la sustentabilidad, Universidad de Sonora.
- 11. Fernando Martínez Coyol; Maestría en Ingeniería Energética. Universidad Veracruzana.
- 12. Militza Rosales Valles; Maestría en Ingeniería en Energía, UNAM.
- 13. Isaías Moreno Cruz; Maestría en Ingeniería en Energía, UNAM.
- 14. Álvaro Chaira; Ingeniería en Tecnología Electrónica, Universidad de Sonora.
- 15. Martha Escobar Toledo; Licenciatura en Física, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- 16. Rodrigo Rubí Nava; Licenciatura en Ingeniería Industrial, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- 17. Adriana Guadalupe Vázquez Fernández, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma de Nayarit.
- 18. Irving Paul García Martínez, Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- 19. 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

A3. Lista de Participantes

- Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca (IER-UNAM): Coordinador General del Proyecto LACYQS, responsable técnico ante CONACYT e investigador responsable del LATEQS.
- 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. 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, Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar.

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

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

Instituto de Ingeniería Dr. Javier Eduardo Aguilón 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. Víctor Hugo Benítez, Dr. Ricardo Rodríguez Carbajal, Dr. Iván Salgado Tránsito, Dr. Nún Pitalúa Díaz, M. C. Jesús Horacio Pacheco, M. C. María Elena Anaya, M. I. Rodolfo Peón, M. C. Cuitlahuac Iriarte Cornejo, Ing. Pablo Sosa Flores.

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

Departamento de Matemáticas Dr. Julio Waissman Vilanova

A3.3 Otras Instituciones Nacionales

Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa Dr. Hernando Romero Paredes Rubio, Dr. Gilberto Espinosa Paredes

Universidad Autónoma de Querétaro 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

A3.4 Instituciones Extranjeras

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

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

<u>Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (España)</u> Dr. Felix Téllez Sufrategui,

<u>PROMES-CNRS (Francia)</u> Dr. Stephane Abanades, Dr. Gabriel Olalde, Dr. Gilles Flamant

A4. Referencias

A4.1 Procesos termoquímicos solares

- 1. Steinfeld A. Solar thermochemical production of hydrogen a review. Solar Energy, 78 (2005) 5:603-15.
- Steinfeld A. Palumbo R. Solar thermochemical process technology. Encyclopedia of Physical Science & Technology, Academic Press. 15(2001) 237-56.
- 3. Charvin P. Production d'hydrogène par cycles thermochimiques de dissociation de l'eau couplés à une source d'énergie solaire. Thèse de doctorant, Université de Perpignan, Laboratoire PROMESCNRS, 2007.
- 4. Kodama T. High-temperature solar chemistry for converting solar heat to chemical fuels. Progess in Energy and Combustion Science, 29(2003) 567-97.
- 5. Gregg, D.W., Aiman, W.R., Otsuki, H.H., Thorsness, C.B. Solar coal gasification. Solar Energy 24 (1980), 313–321.
- 6. Gregg, D.W., Taylor, R.W., Campbell, J.H., Taylor, J.R., Cotton, A., Solar gasification of coal, activated carbon, coke and coal and biomass mixtures. Solar Energy, 25 (1980), 353–364.
- 7. M. Puig-Arnavat, E.A. Tora, J.C. Bruno, A. Coronas. State of the art on the reactor designs for solar gasification of carbonaceous feedstock. Solar Energy 97 (2013) 67-84.
- 8. Kotz, Treichel, Weaver Chemistry & Chemical reactivity. Sixth edition. Thomson Brooks/Cole, 2006.
- 9. Stein W., Edwards J., Hinkley J., Sattler C. Natural Gas: Solar-Thermal Steam Reforming. Fuels-Hydrogen production. Encyclopedia of Electrochemical Power sources. 2009. 300-312.
- 10. Flechsenhar, M., Sasse, C. Solar gasification of biomass using oil shale and coal as candidate materials. Energy (1995) 20, 803–810.
- 11. Dahl JK, Buechler KJ, Finley R, Stanislaus T, Weimer AW, Lewandowski A, Bingham C, Smeets A, Schneider A. Rapid solar-thermal dissociation of natural gas in an aerosol flow reactor. Energy (2004) 29:715–25.
- 12. Dahl JK, Tamburini J, Weimer AW, Lewandowski A, Pitts R, Bingham C. Solar-thermal processing of methane to produce hydrogen and syngas. Energy Fuels (2001) 15:1227–32.
- 13. Dahl JK, Buechler KJ, Weimer AW, Lewandowski A, Bingham C. Solar-thermal dissociation of methane in a fluidwall aerosol flow reactor. Int J Hydrogen Energy (2004) 29: 725–36.
- 14. Hirsch D, Steinfeld A. Solar hydrogen production by thermal decomposition of natural gas using a vortexflow reactor. Int J Hydrogen Energy (2004) 29:47–55.
- 15. Abanades S, Flamant G. Production of hydrogen by thermal methane splitting in a nozzle-type laboratoryscale solar reactor. Int J Hydrogen Energy (2005) 30:843-853.
- 16. Rodat S, Abanades S, Flamant G. Co-production of hydrogen and carbon Black from solar thermal methane splitting in a tubular reactor prototype. Solar Energy (2011) 85: 645-652.
- 17. Ihara S. Feseability of hydrogen production by direct water splitting at high temperature. Int J Hydrogen Energy, 3(1978) 287-96.
- 18. Bilgen E, Ducarroir M, Foex M, Sibiede F, Trombe F. Use of solar energy for direct and two-step water decomposition, Cyles. Int J Hydrogen Energy 1977;2:251–7.
- 19. Bilgen E, Galindo J, Baykara SZ. Experimental study of hydrogen production by direct decomposition of water. Proceedings of the 18th IECEC 1983;3:564–7.
- 20. Diver RB, Pederson S, Kappauf T, Fletcher EA. Hydrogen and Oxygen from Water-IV, quenching the efluent from a solar furnace. Energy 1983;8(12):947–55.
- 21. Gauthier D., Olalde G., Vialaron A. Film boiling around a Zirconia tarjet: Application to water thermolysis, Adv Ceramics, 24(1988) 879-83.
- 22. Baykara S.Z. Experimental solar water thermolysis. Int J Hydrogen Energy, 29 (2004)1459-1469.

- 23. Funk J. Thermochemical hydrogen production: past and present. Int J Hydrogen Energy, 26 (2001) 185-190.
- 24. Nakamura T. Hydrogen production from water utilizing solar heat at high temperatures. Solar Energy, 19 (1977) 467-75.
- 25. Ohta T. Solar- Hydrogen Energy Sistems. Pergamon press, 1979.
- 26. Abanades A., Charvin P., Flamant G., Neveu P. Screening of watersplitting thermochemical cycles potentially attractive for hydrogen production by concentrated solar energy. Energy, 31(2006) 2805-22.
- 27. Steinfeld A. Sanders S., Palumbo R. Design aspects of solar thermochemical engineering-A case of study: two-step water-splitting cycle using the Fe₃O₄/FeO redox system. Solar Energy, 65(1999) 43-53.
- 28. Sibieude F., Ducarroir M., Tofighi A., Ambriz J. High- temperature experiments with a solar furnace: Decomposition of Fe₃O₄, Mn₃O₄, CdO. Int J Hydrogen Energy, 7(1982) 79-88.
- 29. Charvin P., Abanades S., Florent L., Flamant G. Analysis of a solar chemical processes for hydrogen production from water splitting thermochemical cycles. Energy Conversion and Management, 49(2008) 1547-1556.
- 30. Palumbo R., Rouanet A., Pichelin G. The solar thermal decomposition of TiO2 above 2200 K and its use in the production of Zn from ZnO. Energy- Int J, 20(1995) 857-68.
- 31. Lundberg M. Model calculations on some feasible two-step water splitting processes. Int J Hydrogen Energy,18(1993) 369-76.
- 32. Steinfeld A. Solar hydrogen production via two- step water- splitting thermochemical cycle based on Zn/ZnO redox reactions. Int J Hydrogen Energy, 27(2002) 2: 611-19.
- 33. Perkins C., Weimer A. Likely near-term solar-thermal water splitting technologies. Int J Hydrogen Energy, 29(2004) 1587-99.
- 34. Weidenkaff A., Steinfeld A., Wokaun A., Eichler B.,Reller A. The direct solar thermal dissociation of ZnO: condensation and crystallization of Zn in the presence of oxygen. Solar Energy, 65(1999) 59-69.
- Palumbo R., Lédé J., Boutin O., Elorza-Ricart E., Steinfeld A., Möller S., Weidenkaff A., Fletcher E., Bielicki J. The production of Zn form ZnO in a single step high temperature solar decomposition process. Chem Eng Sci, 53(1998) 2503-18.
- 36. Lédé J., Boutin O., Elorza-Ricart E., Ferrer M. Solar thermal splitting of zinc oxide: a review of some of the rate controlling factors. J Solar Energy Eng, 123(2001) 91-97.
- 37. Moeller S. Palumbo R. The development of a solar chemical reactor for the direct thermal dissociation of zinc oxide. J Solar Energy Eng, 123(2001) 83-90.
- 38. Abanades A., Flamant G. Thermochemical hydrogen production from a two- step solar- driven watersplitting cycle based on cerium oxide. Solar Energy, 80(2006) 1611-23.
- 39. Sturzenegger, M., Nuesch, P., 1999. Efficiency analysis for a manganese-oxide-based thermochemical cycle. Energy 24, 959–970.
- 40. Kräupl S., Steinfeld A. Monte Carlo Radiative heat transfer Modeling of a solar chemical reactor for the co-production of zinc and syngas. J Solar Energy Eng, 127(2005) 102-07.
- Abanades A., Charvin P., Flamant G. Design and simulation of a solar thermochemical reactor for the thermal reduction of metal oxides: case study of zinc oxide dissociation. Chem Eng Sci, 62(2007) 2: 6323-33.
- 42. Vishnevetsky I., Epstein M.Production of hydrogen from solar zinc in steam atmosphere. Int J Hydrogen Energy, 32(2007) 5-6: 2791-802.
- 43. Haueter P. Moeller S. Palumbo R., Steinfeld A. The production of zinc oxide-solar chemical reactor design. Solar Energy, 67(2000) 1-3:161-67.
- 44. Lipínski W., Thommen D., Steinfeld A. Unsteady radiative heat transfer within a suspension of ZnO particles undergoing thermal dissociation. Chem Eng Sci, 61(2006) 7029-35.

- 45. Romero-Paredes H. Torres A., Ambriz J. Characterization of a thermochemical reactor for thermal solar energy. Renew Energy, 10(1997) 2: 231-34.
- 46. Geyer M., Mancini T., Meier A., Meyer R., Richter C., Weiss W. Solar-Paces. Annual Report 2005. International Energy Agency, 2005.
- 47. Steinfeld A., Kuhn P., Reller A., Palumbo R., Murray J., Tamaura Y. Solar-processed metals as a clean energy carriers and water- splitters. Int J Hydrogen Energy, 23 (1998) 767-74.

A4.2 Receptores de cavidad

- Clausing, A. M. (1981). An analysis of convective losses from cavity solar central receivers. Solar Energy. 27, p. 295.
- Clausing, A. M (1983). Convective losses from cavity solar receivers-comparisons between analytical predictions and experimental results. Journal of Solar Energy Eng. 105, p. 29.
- McMordie, R. K. (1984). Convection heat loss from a cavity receiver. J. Sol. Energy Eng. 106, p. 98.
- Kribus, A., Doron, P., Rubin, R., Karni, J., Reuven, R., Duchan, S., Taragan, E. (1999). A multistage solar receiver: the route to high temperature. Solar Energy. 67, p. 3.
- Hasuike, H., Yoshizawa, Y., Suzuki, A., Tamaura, Y. (2006). Study on design of molten salt solar receivers for beam-down solar concentrators. Solar Energy. 80, p. 1255.
- Kim, J. K., Yoon, H. K., Kang, Y. H. (2007). Experimental study on heat loss from cavity receiver for solar power tower. Proceedings of ISES Solar World Congress 2007: Solar Energy and Human Settlement. 5, p. 1719.
- Wang, Y., Dong, X., Wei, J., Jin, H. (2009). Numerical simulation of the heat flux distribution in a solar cavity receiver. Frontiers of Energy and Power Engineering in China. 4, p. 571.
- Yao, Z., Wang, Z., Lu, Z., Wei, X. (2009). Modeling and simulation of the pioneer 1 MW solar thermal central receiver system in China. Renewable Energy. 34, p. 2437.
- Li, X., Kong, W., Wang, Z., Chang, Ch., Bai, F. Thermal model and thermodynamic performance of molten salt cavity receiver. Renewable Energy. 35, p. 981 (2010).
- Fang, J. B., Wei, J. J., Dong, X. W., Wang, Y. S. (2011). Thermal performance simulation of a solar cavity receiver under windy conditions. Solar Energy. 85, p. 126.
- Heller, P., Pfander, M., Denk, T., Tellez, F., Valverde, A., Fernandez, J., Ring, A. (2004). Test and evaluation of a solar powered gas turbine system. Proceedings of 12th SolarPACES International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies.
- Heller, P., Pfander, M., Denk, T., Tellez, F., Valverde, A., Fernandez, J., Ring, A. (2006). Test and evaluation of a solar powered gas turbine system. Solar Energy. 80 (10), p. 1225.

A4.3 Receptores volumétricos

- Ávila-Marín, L. 2011. Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review, Solar Energy, vol. 85, pp. 891-910.
- Pitz-Paal, R., B. Hoffschmidt, M. Böhmer y M. Becker, 1997. Experimental and numerical evaluation of the performance and flow stability of different types of open volumetric absorbers under non-homogeneous irradiation, Solar Energy, vol. 60, pp. 135-150.
- Garcia-Martin, F. J., M. Berenguel, A. Valverde y E. F. Camacho, 1999. Heuristic knowledge-based heliostat field control for the optimization of the temperature distribution in a volumetric receiver, Solar Energy, vol. 66(5), pp. 355-69.

- Marcos, M. J., M. Romero y S. Palero, 2004. Analysis of air return alternatives for CRS-type open volumetric receiver», Energy, vol. 29, pp. 677-86.
- Fend, T., R. Pitz-Paal, O. Reutter, J. Bauer y B. Hoffschmidt, 2004. Two novel high-porosity materials as volumetric receivers for concentrated solar radiation, Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 84, pp. 291-304.
- Fend, T., B. Hoffschmidt, R. Pitz-Paal, O. Reutter y P. Rietbrock, 2004. Porous materials as open volumetric solar receivers: Experimental determination of thermophysical and heat transfer properties, Energy, vol. 29, pp. 823-833.
- Becker, M., T. Fend, B. Hoffschmidt, R. Pitz-Paal, O. Reutter, V. Stamatov, M. Steven y D. Trimis, 2006. Theoretical and numerical investigation of flow stability in porous materials applied as volumetric solar receivers, Solar Energy, vol. 80, pp. 1241-1248.
- Villafán-Vidales, H. I., S. Abanades, C. Caliot y H. Romero-Paredes, 2011. Heat transfer simulation in a thermochemical solar reactor based on a volumetric porous receiver, Applied Thermal Engineering», vol. 31, pp. 3377-3386.
- Wu, Z., C. Caliot, G. Flamant y Z. Wang, 2011. Coupled radiation and flow modeling in ceramic foam volumetric solar air receivers, Solar Energy, vol. 85, pp. 2374-2385.
- Wu, Z., C. Caliot, G. Flamant y Z. Wang, 2011. Numerical simulation of convective heat transfer between air flow and ceramic foams to optimise volumetric solar air receiver performances, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 54, pp. 1527-1537.
- Xu, C., Z. Song, L. Chen, Y. Zhen. 2011. Numerical investigation on porous media heat transfer in a solar tower receiver», Renewable Energy, vol. 36, pp. 1138-1144.
- Cui, F. Q., Y. L. He, Z. D. Cheng, D. Li, Y. B. Tao, 2012. Numerical simulations of the solar transmission process for a pressurized volumetric receiver, Energy, vol. 46, pp. 618-628.
- Veeraragavan, A., Lenert, B. Yilbas, S. Al-Dini y E.N. Wang, 2012. Analytical model for the design of volumetric solar flow receivers, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, pp. 556-564.
- Behar, O., A. Khellaf y K. Mohammedi, 2013. A review of studies on central receiver solar thermal power plants, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 23, pp. 12-39.
- Cheng, Z. D., Y. L. He y F. Q. Cui, 2013. Numerical investigations on coupled heat transfer and synthetical performance of a pressurized volumetric receiver with MCRT-FVM method, Applied Thermal Engineering, vol. 50, pp. 1044-1054.

A4.4 Sistemas CPV

- Baig, H., Heasman, K. C., & Mallick, T. K. (2012). Non-uniform illumination in concentrating solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(8), 5890–5909. doi:10.1016/j.rser.2012.06.020
- Benítez, P., Miñano, J. C., Zamora, P., Mohedano, R., Cvetkovic, A., Buljan, M., Chaves, J., et al. (2010). High performance Fresnel-based photovoltaic concentrator. *Optics express*, *18*(9), A25–40. Retrieved from <u>http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20607884</u>
- Chen, M. M., & Glaser, P. E. (1963). The Use of a Kaleidoscope to Obtain Uniform Flux Over a Large Area in a Solar or Arc Imaging Furnace. *Applied Optics*, 2(3), 265–272.
- Coughenour, B., Wheelwright, B., & Angel, J. R. P. (2012). Illumination characterization of glass and metal secondary concentrator elements in a photovoltaic solar concentration system. (K. VanSant & A. P. Plesniak, Eds.)*SPIE*, *8468*, 84680E–84680E–8. doi:10.1117/12.929101
- Dross, O., Mohedano, R., Hernández, M., Cetkovic, A., Miñano, J. C., & Benítez, P. (n.d.). Köhler integrators embedded into illumination optics add functionality.

- Frost, B. S., & Gourlay, P. M. (1988). Geometrical optics treatment of rectangular lightguides. *Applied optics*, 27(7).
- Glaser, P. E., Chen, M. M., & Berkowitz-mattuck, J. (1962). The Flux Redistributor. Solar Energy, 12–17.
- Helmers, H., Thor, W. Y., Schmidt, T., Rooyen, D. W. Van, & Bett, A. W. (2013). Optical analysis of deviations in a concentrating photovoltaics central receiver system with a flux homogenizer. *Applied optics*, 52
- Hernández, M., Cvetkovic, A., Benítez, P., & Miñano, J. C. (2008). High-peformance Köler concentrator with uniform irradiance on solar cell. (R. Winston & R. J. Koshel, Eds.), *7059*, 705908–705908–9. doi:10.1117/12.794927.
- Kreske, K. (2002). Optical design of a solar flux homogenizer for concentrator photovoltaics. *Applied optics*, *41*(10), 2053–8. Retrieved from <u>http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11936811</u>
- Nevin K. Hiester, T. E. T. (1957). Theoretical Considerations on Performance Characteristics of Solar Furnaces. *Applied optics*, 27, 507–513.
- Ries, Harald Gordon, J.M. Lasken, Michelle, "High-flux photovoltaic solar concentrators with kaleidoscopebased optical designs", Solar Energy (1996)
- Swift, P. D., Lawlor, R., Smith, G. B., & Gentle, A. (2008). Rectangular-section mirror light pipes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 969–975. doi:10.1016/j.solmat.2008.02.029.