

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**DESARROLLO DE PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DE UN EQUIPO DE  
CONCENTRACIÓN SOLAR DE CANAL PARABÓLICO**

**MONOGRAFÍA**

**QUE PRESENTA**

**JUAN FRANCISCO LEYVA ALVARADO**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES**

**TORREÓN, COAHUILA**

**DICIEMBRE DE 2011**

“UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO”  
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

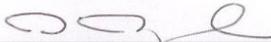
DESARROLLO DE PRINCIPIOS PARA EL DISEÑO DE UN EQUIPO DE  
CONCENTRACIÓN SOLAR DE CANAL PARABÓLICO

POR

JUAN FRANCISCO LEYVA ALVARADO

APROBADA POR EL H. CUERPO DE ASESORES

DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO  
ASESOR PRINCIPAL



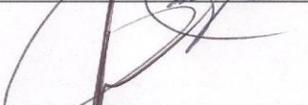
---

ING. JOEL LIMONES AVITIA  
ASESOR



---

M.C. JOSE LUIS RÍOS GONZÁLEZ ASESOR  
ASESOR



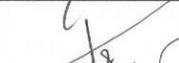
---

M.C. NORMA LETICIA ORTIZ GUERRERO  
ASESOR SUPLENTE



---

DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS  
EL COORDINADOR DE LA DIVISIÓN  
DE CARRERAS AGRONÓMICAS



---



Coordinación de la División de  
Carreras Agronómicas

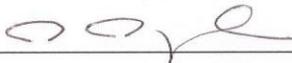
TORREÓN, COAHUILA

DICIEMBRE DE 2011

MONOGRAFÍA QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO  
EXAMINADOR COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO  
DE:  
INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO  
PRESIDENTE DEL JURADO



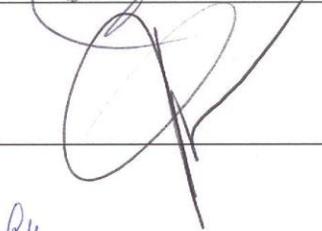
---

ING. JOEL LIMONES AVITIA  
VOCAL



---

M.C. JOSE LUIS RÍOS GONZÁLEZ  
VOCAL



---

M.C. NORMA LETICIA ORTIZ GUERRERO  
VOCAL SUPLENTE



---

DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS  
EL COORDINADOR DE LA DIVISIÓN  
DE CARRERAS AGRONÓMICAS



---



Coordinación de la División de  
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA

DICIEMBRE DE 2011

## **Agradecimientos.**

A Dios por darme la fuerza de terminar y siempre estar presente en mi vida.

A mis padres, Juan Francisco Leyva Martínez y Dulce María Alvarado Cervantes, que me dieron la vida compartir conmigo sus conocimientos, su amor por la vida, su cariño, por ser ejemplo de fortaleza y autonomía, le agradezco infinitamente. Me han enseñado a luchar por mis objetivos, por educarme con valores mediante el ejemplo y permitirme crecer en una gran familia, por su apoyo y consejos. Agradezco todos los valores inculcados, a ser servicial, y a nunca darme por vencido. A mi hermana, Dulce Sarai Leyva Alvarado, que me apoyan y demuestra su afecto en más de mil formas. Y ser cómplice en todo momento.

A mis grandes abuelos, Darío Alvarado Ceniceros y María Consuelo Cervantes Álvarez un gran ejemplo de vida en todo los aspectos. A toda mi familia en la cual siempre encontré palabras de apoyo.

## **Dedicatoria.**

Dedico este trabajo a toda mi familia con mucho cariño para todos.

A mis profesores por que se prepararon día con día para compartir sus conocimientos, el prestarme atención cada día que lo necesite y tener la paciencia necesaria.

Al Ing. Luis Bazaldua Zurita (D.E.P) en el cual encontré más que un amigo, el cual siempre tenía un buen consejo e incontables charlas.

A mis compañeros de clases que más que ser eso son verdaderos amigos con los cuales termine esta aventura.

Gracias a todos los que convivieron conmigo.

## **Resumen.**

Esta monografía recoge brevemente los principales desarrollos que se han realizado sobre los equipos de concentrador solar de canal parabólico para la producción directa de vapor de agua. Estos equipos son de gran importancia para el desarrollo de las fuentes renovables de energía, como alternativa viable para la sustitución de las fuentes convencionales de energía. En el presente trabajo describe el concepto para un concentrador solar para la generación de vapor sobrecalentado. En proceso de recirculación para generación de vapor húmedo. Se describe el modelo con mayor avance significativo de esta tecnología el cual recibe unas modificaciones estructurales. Y la modificación del tubo absorbedor, y el funcionamiento con diferente fluidos de transferencia de calor tomando en cuenta diferentes características.

**Palabras calves:** concentrados solar, canal parabólico, absortancia, transmitancia, reflectancia.

## Contenido

Agradecimientos.....	i
Dedicatoria.....	ii
Resumen.....	iii
Índice de tabla.....	v
Índice de figuras.....	vi
I.- Introducción.....	1
II.- Objetivo.....	3
2.1.- General.....	3
El objetivo de este trabajo es evaluar un sistema de concentrador solar de canal parabólico (CCP) para la producción directa de vapor de agua con baja entalpía.....	3
2.2.- Especifico.....	3
III. REVISION DE LITERATURA.....	4
3.1.- Origen y Evolución de los Captadores Solares.....	4
3.2 Proyecto EuroTrough.....	10
3.2.1- Tubo absorbedor UVAC.....	13
3.3 Fluidos de transferencia de calor para sistemas de concentración.....	14
3.4 Oportunidades de desarrollo.....	16
3.5 El concentrador parabólico.....	17
3.6. Generación de vapor como alternativa de sustitución a calderas de aplicaciones específicas.....	18
3.7 Diseño del concentrador de canal parabólico.....	19
3.7.1 .Colector de canal parabólico (CCP).....	21
3.8 Parámetros de diseño del colector de canal parabólico.....	23
3.9 Trazado de rayos.....	26
3.10. Prueba analítica de túnel de viento (Modelo teórico).....	30
Conclusión.....	33
Citas Bibliográficas.....	34

## **Índice de tabla.**

	Pág.
Tabla 1	20
Tabla 2.	32

## Índice de figuras.

	Pág.
Figura 1.1	5
Figura 1.2	7
Figura 1.3	9
Figura 1.4	9
Figura 1.5	13
Figura 1.6	13
Figura 1.7	25
Figura 1.8	26
Figura 1.9	28
Figura 1.10	29

## **I.- Introducción.**

Debemos considerar que actualmente la mayor parte de la generación de energía térmica en el mundo está basada en hidrocarburos provenientes del petróleo y gas natural cuyas reservas probadas permitirán satisfacer la demanda sólo para algunos años. Aún cuando que hubiera suficientes recursos fósiles para cubrir la creciente demanda, ahora el problema está relacionado también con la contaminación, específicamente con las altas emisiones de CO<sub>2</sub> y muchos otros, que afectan seriamente nuestro ecosistema. Se han realizados esfuerzos importantes por parte de la comunidad internacional para la protección del medio ambiente como son el protocolo de Montreal y el protocolo de Kyoto (Tyner *et al.*, 2001).

Bajo estos acuerdos internacionales es donde la tecnología relacionada con el aprovechamiento de la radiación solar se reconoce como una solución apropiada para la generación de energía térmica y eléctrica. Debemos recordar que la transformación de la radiación solar es la fuente primordial de las tecnologías renovables ya que el viento, olas, hidroeléctrica e incluso biomasa son resultado de la potencia proveniente del Sol. Si bien las fuentes renovables de energía tienen gran potencial económico, sin olvidar desde luego su bajo impacto ambiental, hasta la fecha no han sido ampliamente explotadas y comercializadas. Lo anterior se debe principalmente al costo de inversión relativamente alto para desarrollar estas tecnologías, además, estos sistemas no han tenido amplia aceptación debido a la intermitencia y requerimientos de almacenamiento de energía por lo que es común que se opte por fuentes convencionales, sin embargo, en los sistemas con fuentes renovables, además de su bajo impacto ambiental, un punto que se debe tener en mente es el costo de operación ya que estas tecnologías no presentan consumo de combustible para su operación. Así, la amortización de los sistemas con fuentes renovables ocurre eventualmente por el ahorro de los costos asociados al consumo de combustible. Dado que la

energía solar por sí misma es gratuita, el reto es diseñar sistemas de captación y aprovechamiento que transformen esta energía con sistemas que sean económicos y fácilmente operables. Sin embargo, para el aprovechamiento de la energía solar se tiene como primera limitante su baja densidad de potencia comparada con los combustibles fósiles, por lo que se busca sistemas con elevada eficiencia de conversión. Otra limitante es su intermitencia, ya sea por el ciclo día-noche o bien por condiciones atmosféricas adversas como lluvia o nublados (Maxwell y Renne, 1994).

## **II.- Objetivo.**

### **2.1.- General**

El objetivo de este trabajo es evaluar un sistema de concentrador solar de canal parabólico (CCP) para la producción directa de vapor de agua con baja entalpía.

### **2.2.- Especifico.**

El principal alcance de este trabajo es encontrar un diseño útil y con disponibilidad termodinámica apropiada de un concentrador de canal parabólico que cuente con un costo accesible con opción para su comercialización mediante su producción en serie y que sea rentable tanto para aplicaciones industriales como agrícolas.

### **III. REVISION DE LITERATURA.**

#### **3.1.- Origen y Evolución de los Captadores Solares.**

Uno de los compromisos más importantes en el desarrollo de tecnologías de fuentes renovables de energía es precisamente la generación de energía limpia como alternativa viable para sustitución de las fuentes convencionales de energía; tanto en calor de procesos como en generación eléctrica. Cabe recordar que la mayoría de las fuentes convencionales utilizan combustibles fósiles que contribuyen con la emisión de gases de efecto invernadero. Actualmente, las fuentes renovables de energía (FRE) se destinan a la producción de energía eléctrica (por ejemplo por medio de fotoceldas o aerogeneradores) o la generación de energía térmica o calor de proceso (por ejemplo, en el caso de colectores solares). Las tecnologías de FRE solares aún no presentan un costo competitivo ante las tecnologías convencionales. Sin embargo se espera que esto último llegue a su fin en pocos años debido a que el agotamiento de petróleo incrementa significativamente el costo de los hidrocarburos, lo que conducirá a la sustitución de energéticos convencionales por las FRE. En la década de 1870 el sueco-americano John Ericsson hizo funcionar su máquina de aire caliente con un concentrador parabólico, este invento sumaba tres elementos fundamentales: un espejo concentrador, una caldera y una máquina de vapor. En 1872, Ericsson probó un método totalmente diferente: calentar el aire, en lugar de utilizar agua, contenido en un cilindro situado en el foco de un reflector curvo. Ericsson quedó sorprendido por el rendimiento de su motor. Pero tres años después, se templaron sus ánimos al darse cuenta que el aparato concentrador es tan grande y tan caro que los motores activados por energía solar resultaban en la práctica más costosos que sus análogos movidos por carbón (Kalogirou, 2004)

Quince años más tarde en 1885, el ingeniero francés Carles Tellier, sería una de las primeras personas en desarrollar colectores solares de baja temperatura para impulsar máquinas. Mientras que los motores convencionales empleaban vapor de agua a cierta presión, los desarrollos tecnológicos de Tellier utilizaban vapor

presurizado de líquidos con temperaturas de ebullición muy por debajo de la del agua. Tellier instaló un colector solar (Similar a los colectores planos domésticos de ahora) y en lugar de llenarlos con agua para producir vapor, el fluido de trabajo que escogió fue amoniaco. Después de la exposición solar el obtenía una razón de 300 galones por hora durante las horas más iluminadas del día. El pensó que simplemente añadiendo colectores podría usarse como un sistema industrial (Beohanasolar, 2011).

En 1907 se patentó por primera vez en Alemania un diseño sobre colectores parabólicos (Parabolic trough collector, PTC), por Dr. Wilhelm Maier (en Aalen) y Adolf Remshardt (en Stuttgart). En la Figura 1.1 se muestra parte de la patente obtenida por Maier y Remshard (Cohen, 1994).

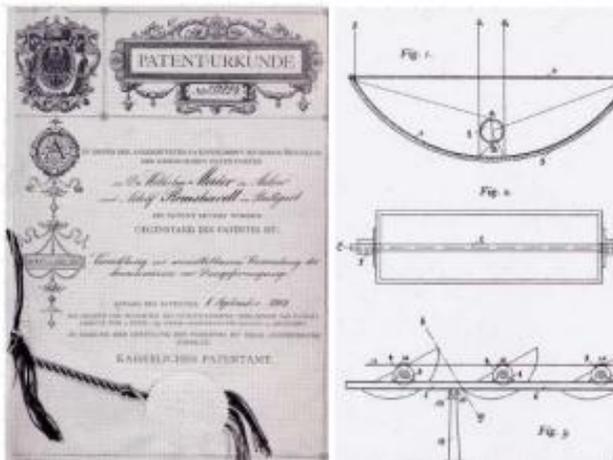


Figura 1.1. Primer patente de colector solar parabólico por Maier y Remshard (Cohen, 1994).

En esa misma época, en los comienzos del siglo XX, el ingeniero americano Frank Shumann, se dio cuenta que en los sistemas de captación solar las altas temperaturas favorecían las pérdidas por conducción y convección, además se tenía un elevado costo asociado a los espejos que eran revestidos de plata. Por ello, retomó los estudios con las cajas calientes, afirmando la idea de Saussure y Langley principalmente, de que con estas cajas se podían conseguir temperaturas lo suficientemente altas como para hervir agua. (Kalogirou, 2004) Tras algunos éxitos conseguidos, Shumann forma la compañía Sun Power Company, teniendo

un importante objetivo a largo plazo: la construcción de una planta solar a gran escala en Egipto. Ahí la mano de obra era barata, y el potencial solar enorme. Antes de dar este gran paso, se construyó una planta piloto. Dicha planta se emplazó sobre 2,700 m<sup>2</sup> en un terreno cercano a su a casa en Tacony, Pennsylvania. Para incrementar la cantidad de calor producida en los colectores, se sumaron a los colectores una serie de reflectores (espejos de vidrio), y se añadió un mecanismo para ajustar el ángulo de los colectores a su exposición óptima. Conectado a una bomba, el dispositivo podía elevar 12,000 litros de agua por minuto a 10 metros de altura, y podía producir una potencia máxima de 32 caballos de fuerza. Dispuestos para iniciar el desarrollo de la planta africana, en 1912 Shumann y su equipo de operarios llegan a Maadi, pequeña comunidad agrícola junto al Nilo. Se construyeron cinco colectores solares con reflector parabólico con orientación sobre el eje Norte-Sur, cada uno de 60 metros de largo por 4 de ancho y separados 8 metros entre sí, con un área total de apertura de 1200 m<sup>2</sup>. A finales de 1913, y después de un intento fallido, la planta estaba nuevamente preparada para su inauguración. Se alcanzaron 55 caballos de potencia, captando el 40 % de la energía solar disponible, obteniendo resultados muy superiores a los de la planta de Tacony. A pesar del éxito de la planta, fue cerrada en 1915 debido a la primera guerra mundial. (Kalogirou, 2004) En la Figura 1.2 se muestra la planta de colectores parabólicos de Maadi, Egipto.



Figura 1.2. Primera planta de generación de energía mediante colectores parabólicos en Maadi, Egipto, 1912

Es hasta la década de 1970 que se retoma el verdadero interés en esta tecnología como una clara respuesta a la crisis petrolera por el incremento disparado de los precios de los hidrocarburos. En dicha época tanto el departamento de energía de los Estados Unidos (DOE), así como el Ministerio Alemán de Investigación y Tecnología, se encargaron de patrocinar en sus respectivos países el desarrollo de una serie de procesos y sistemas de bombeo de agua y calor con concentradores parabólicos (Beohanasolar, 2011).

Michael W. Edenburn reportó un análisis de rendimiento teórico de un CCP y lo comparó con resultados experimentales. Tomó en cuenta un tubo absorbedor aislado por un tubo envolvente transparente para disminuir las pérdidas térmicas. El análisis considera las pérdidas por transferencia de calor y la transferencia de energía hacia el fluido de trabajo. Tomó en cuenta las diferentes posibles orientaciones del colector (Edenburn, 1976).

En el mismo año se presentó un trabajo sobre la posibilidad de construir un colector solar eficiente y de bajo costo. Determinó que la precisión óptica y los mecanismos de seguimiento del sol son los factores que aumentan el costo de la tecnología de CCP. También determinó que si se lograra ubicar al tubo absorbedor en el punto focal de manera más o menos constante, con un error aproximado de  $6^\circ$ , podría usar un mecanismo mucho más barato de seguimiento, basado en un motor que gira a 1 revolución por año. La forma en la que lo demostró, fue ubicando una elipse que tuviera el tamaño suficiente para interceptar los rayos provenientes desde el reflector. El ángulo total de aceptación de un borde del tubo de agua al otro, variaba desde  $10^\circ$  a  $17^\circ$  en las unidades probadas. En 1981 fue probado en Tabernas, España, un sistema de 500 KW de la Agencia Internacional de Energía para generación eléctrica usando concentradores parabólicos en la plataforma solar de Almería. La planta generaba vapor de agua a  $520^\circ\text{C}$  y 10 bar de presión. A la fecha la instalación más grande financiada con recursos privados que no produce energía eléctrica, es el sistema

industrial de calor de proceso basado en colectores parabólicos con 5580m<sup>2</sup>, ubicado en Chandler, Arizona y que ha estado operando desde 1983 (Pierce, 1976).

De 1984 a 1991, los avances en sistemas de concentración parabólica fueron notables con el desarrollo de una serie de plantas comerciales solares de 15 MW a 80 MW a cargo de Luz Internacional Ltd. Esta compañía desarrolló por muchos años los componentes y sistemas en una instalación en Jerusalén y fue responsable de la construcción y operación de dos instalaciones de calor de proceso en Israel. Las nueve plantas diseñadas por esta empresa, con una capacidad total de generación de 354 MW de electricidad son llamadas SEGS (Sistemas de generación solar-eléctrica por sus siglas en inglés) y están operando continuamente en el desierto de Mojave al sur de California. Actualmente en este desierto hay 9 centrales SEGS que forman la mayor instalación solar del planeta. Son centrales híbridas, esto es, que producen electricidad a partir de las energía solar y de combustible fósil. La producción a partir de combustible fósil no puede sobrepasar un determinado porcentaje de la producción total para así tener derecho a subvenciones (Dudley *et al.*, 1994).



Figura 1.3. SEGS III ubicada en Kramer's Junction, 1988, Luz LS-3 (Cohen, 1994).

Heinzel desarrolló un modelo óptico de colector parabólico en 1995. (Heinzel, 1995) Dicho modelo fue usado con un modelo básico de pérdida de calor para

simular el colector parabólico usado en LS-2 (SEGS), cuando tiene aceite sintético como el fluido de trabajo. El modelo muestra concordancia con los resultados reportados por Dudley que midió la eficiencia del colector para varios ángulos de incidencia (Dudley *et al.*, 1994).

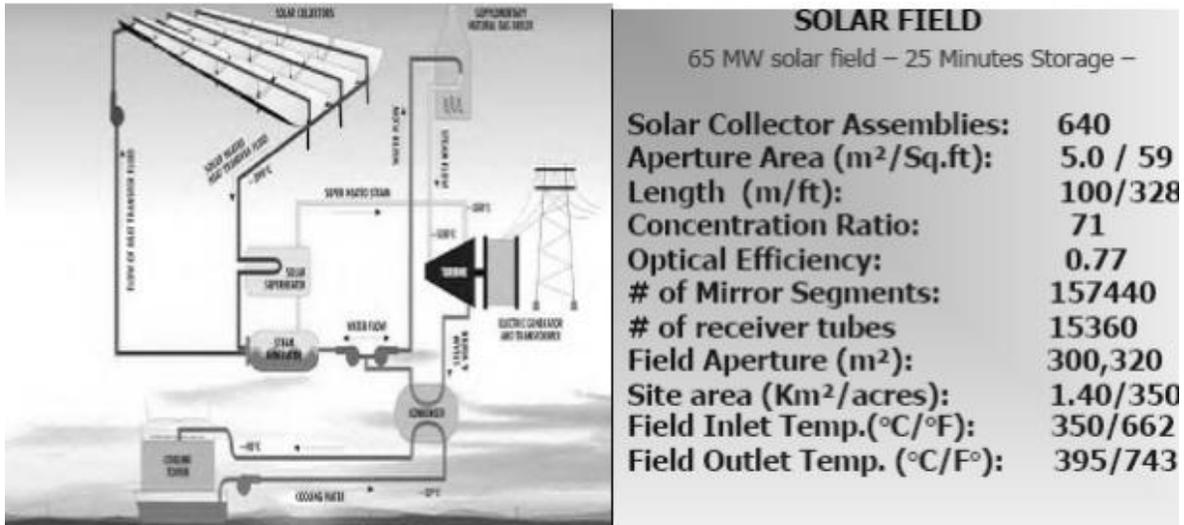


Figura 1.4. Esquema simple de una planta de potencia SEGS

Un colector de generación directa de vapor (GDV) fue propuesto por Cohen y Kearney, como un desarrollo futuro de los colectores en nuevas SEGS, con la finalidad de eliminar el aceite sintético tan costoso, evitar el transporte de fluido intermediario con las pérdidas que esto ocasiona y suprimir el intercambiador de calor de aceite-vapor (Kearney y Cohen, 1994).

Han sido propuestos desde entonces tres conceptos para un sistema colector de GDV, principalmente bajo el concepto de generar vapor sobrecalentado en un único paso a través del colector. Esto se basa en el proceso de recirculación para generar vapor húmedo y el agua inyectada al sistema para controlar la calidad del vapor y modificar la inestabilidad del flujo bifásico a lo largo del tubo absorbedor. En el trabajo reportado por (Odeh *et al.*, 1998) se compara el funcionamiento de un CCP con dos fluidos de trabajo: Aceite Syltherm 800 y agua. El modelo está basado en la temperatura de pared en lugar de temperatura del líquido, de forma que puede determinarse el rendimiento con cualquier fluido de trabajo. También

evaluó los efectos de la emisividad del absorbedor y los efectos internos de convección del fluido de trabajo. Finalmente observó que reduciendo el diámetro del tubo absorbedor para un área de apertura del colector dada, incrementa la eficiencia debido a la reducción de pérdidas de calor (Dagan *et al.*, 1992).

Kalogirou analizó un sistema de baja presión para generación de vapor, que está basado en el calentamiento de agua en un colector parabólico, para después convertirla en vapor en un recipiente separado. El flujo en el colector, usado en este método con evaporación repentina o “flasheo”, se mantiene en fase líquida por lo que no es entonces considerado como un colector GDV (Kalogirou *et al.*, 1997).

Las primeras investigaciones sobre el flujo en colectores GDV han sido reportadas por Müller y Dagan pero no reportan ningún rendimiento térmico para los sistemas concentradores parabólicos. El último avance en este tipo de tecnología, es el colector parabólico conocido como EuroTrough, tiene un gran número de ventajas sobre la mayoría de los sistemas actuales en concentración solar de canal parabólico. Por esta razón la siguiente sección se dedica a describir en detalle esta tecnología (Dagan *et al.*, 1992).

### **3.2 Proyecto EuroTrough.**

Los avances más significativos de esta tecnología se reportaron en el "11th Int. Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies", que fue llevado a cabo del 4 al 6 de septiembre del 2002 en Zurich, Suiza. Se trata de un nuevo colector parabólico que ha sido desarrollado para varias aplicaciones y cuenta con un rango de temperaturas de operación entre 200 y 400 °C. La planta solar fototérmica dispuesta con esta tecnología está destinada para producir cientos de mega watts (Geyer *et al.*, 2002).

Es un concentrador parabólico con una estructura de soporte diferente a las convencionales (ver Figura 1.5 y Figura 1.6), hecha de acero pre galvanizado, con bajo peso y baja torsión. Cada espejo está apoyado sobre la estructura en cuatro

puntos sobre su parte posterior. Esto le permite doblarse dentro de la gama de su flexibilidad sin efecto sobre el foco (Geyer *et al.*, 2002).

Cada elemento presenta una longitud de 12 metros y es posible acoplar de 10 a 12m colectores para lograr un total de 120 a 144 metros. Su manipulación es hidráulica y en operación soporta una carga de viento con una velocidad máxima de 14 m/s (50km/h). Su control de rastreo del Sol es por reloj y un sensor solar. Su parábola tiene un foco de 1.71 m y la longitud de apertura es de 5.8 m. El tubo absorbedor también es de tecnología de punta, es un tubo evacuado que puede usar como fluido de trabajo aceite o vapor (Geyer *et al.*, 2002).

Para el diseño de este concentrador de alto rendimiento, se aprovecharon los siguientes potenciales de reducción de costo:

1. Simplificación del diseño: perfiles menos diferentes y ligeras, mejoran su transporte; concepto de ensamble; reducción de costo por reducción de peso de la estructura; perfiles cerrados, protección a la corrosión; método de elemento finito para cálculos de diseño estructurales; análisis de carga del viento.
2. Mejora del funcionamiento óptico del colector: estructura rígida que compensa el momento de rotación; fabricación, exactitud de ensamble.
3. Tubo UVAC y fluido de transferencia de calor.
4. Pasos adicionales: posible inclinación del colector y extensión de longitud de colector por módulo (de unidad de disco) (ET150, EuroTrough, Colector de 150 m de largo)

En el sur de España se sitúa el primer campo solar de canal parabólico, el ET150, con al menos 500,000 m<sup>2</sup>. Los diseñadores del Eurotrough estiman un costo del campo solar de 206 €/m<sup>2</sup>, incluyendo el líquido de transferencia de calor y la instalación. Conforme al contrato Solar Millennium AG de Alemania, se planea instalar el Eurotrough en el proyecto de Andasol, una planta de 50 MW solar con 549,360 m<sup>2</sup> y 9 horas de almacenamiento de energía térmica (Eckhard Lüpfert *et al.*, 2001).

Este campo de colectores de Eurotrough ET150 suministrará energía para producir vapor en un ciclo Rankine con una eficiencia anual del 38%. El costo de este contrato (Sin contar el costo de terreno ni contingencias) se acerca a los 181 millones de euros (Más de 2,500 millones de pesos mexicanos) (Eckhard Lüpfert *et al.*, 2001).

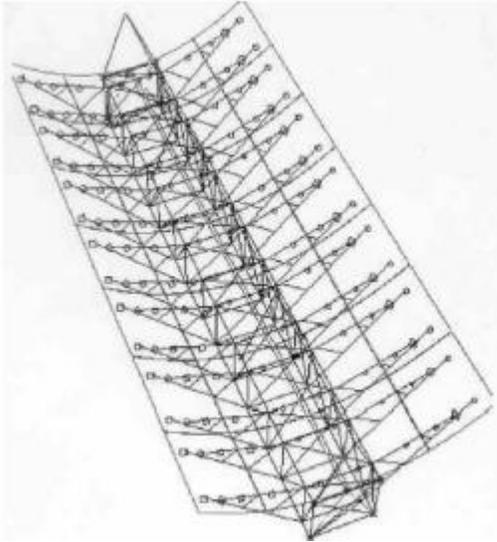


Figura 1.5. Diseño conceptual del Colector Eurotrough. Fuente: Esteban, Osuna, Zarza, Nava. CIEMATPSA y Flabeg Solar Internacional, “Eurotrough design issues and prototype testing at PSA”, Proceedings of Solar

Forum 2001, Solar Energy: The Power to Choose, April 21-25, 2001, Washington, DC.



Figura 1.6. Estructura de soporte del Eurotrough. Fuente: Esteban, Osuna, Zarza, Nava. CIEMAT-PSA y Flabeg Solar Internacional, “Eurotrough design issues and prototype testing at PSA”, Proceedings of Solar Forum 2001, Solar Energy: The Power to Choose, April 21-25, 2001, Washington, DC.

Con una vida útil mínima esperada de 25 años, la depreciación considerada de 6.7% a una tasa anual de descuento de 9%, una tasa de seguridad de 1% y una tasa de impuesto de 36% anual, el costo nivelado de energía de acuerdo con el método de la agencia internacional de energía (IEA) sería de 0.15 €/Kwh (\$2.10 pesos mexicanos por Kwh).

### **3.2.1- Tubo absorbedor UVAC.**

El modelo de tubo absorbedor, UVAC (Colector Universal de Vacío, SOLEL) 2003 es la tercera generación de los tubos de vacío. Ha sido desarrollado por la empresa israelí SOLEL.

Mejora la eficiencia anual de un 12% a un 20%, particularmente en el invierno (el 20% al 30%). Genera ahorros de cientos de dólar/euro por el colector-tubo instalado o por la energía producida. Su eficiencia creciente, según lo medido y validado por las instituciones internacionales y plantas en sitio (desierto del Mojave), es el resultado de las características mejoradas siguientes:

*f* Factor mejorado de la absorción. La absorción del tubo metálico revestido del colector se aumentó hasta el 96%.

*f* Factor mejorado de la emisividad. La emisividad del tubo metálico revestido del colector se ha reducido a un nivel menor a 0.10 con una temperatura de 400°C (750°F).

*f* Transmisión mejorada. Las mejoras en las capas de cristal antirreflexivas han conducido a un factor de transmisión igual a 96.8%. Además, se desarrolló para ser más resistente a las condiciones climáticas y para ser estable durante períodos más largos de tiempo.

*f* Protectores de calor internos y externos. Estos protectores se han diseñado para maximizar la eficacia y la confiabilidad sobre el curso de vida del tubo. El tamaño reducido del protector, con respecto al protector de calor original desarrollado por la compañía Luz, tiene producción una eficacia óptica adicional. *f* Vida útil. Está diseñado para 30 años. Se asume que el tubo está instalado, funcionando y mantenido bajo condiciones normales de la instalación y de funcionamiento. En caso de pérdida de vacío debido a la operación anormal, el tubo no sufrirá del fenómeno de fluorescencia y su funcionamiento óptico permanecerá estable en un cierto periodo.

*f* Escudo solar. Fue diseñado en forma tal que protege la zona de conexión del vidrio con el metal y sus conexiones adicionales, manteniendo fija la posición relativa al desplazamiento axial del tubo durante el calentamiento.

### **3.3 Fluidos de transferencia de calor para sistemas de concentración.**

Este tipo de líquidos transportan el calor producido en colectores solares para almacenarlo en tanques de almacenamiento térmico o para ser usado en sistemas de calentamiento o enfriamiento. Los fluidos usados comúnmente son el agua, glicol-propileno, glicol-etileno y aire. Es menos común el uso de hidrocarburos sintéticos, parafinas, aceites minerales refinados, refrigerantes y silicones.

Para seleccionar un fluido de transferencia de calor se deben tener en cuenta las siguientes características:

*f* Coeficiente de expansión

*f* Viscosidad

*f* Capacidad térmica

*f* Punto de congelamiento

*f* Punto de ebullición

*f* Punto de explosión

Por ejemplo, fluidos expuestos a altas temperaturas requerirán de un punto de ebullición más alto que para fluidos expuestos a bajas temperaturas. La viscosidad y la capacidad térmica determinan la cantidad de energía requerida en el bombeo. Un fluido con baja viscosidad y alto calor específico es más fácil de bombear, porque es menos resistente a fluir y transfiere más calor. Otras propiedades que ayudan a determinar la efectividad del fluido son su corrosividad y estabilidad.

Por ejemplo, el aire no se congelaría ni herviría y no es corrosivo. Sin embargo, tiene una baja capacidad calorífica y tiende a fugarse de colectores y ductos. El agua no es tóxica y es muy barata. Tiene un elevado calor específico y una viscosidad muy baja, haciendo fácil su bombeo. Desafortunadamente el agua tiene un punto de ebullición relativamente bajo y un punto de congelación elevado. También puede ser corrosiva si el pH (nivel de acidez/alcalinidad) no se mantiene a un nivel neutral. El agua con contenido mineral puede causar depósitos de éste, tapando las tuberías y el sistema de flujo del líquido.

Se han probado mezclas de glicol/agua al 50/50 o 60/40. El glicol-etileno o glicolpropileno son anticongelantes. El glicol-etileno es extremadamente tóxico y solo puede ser usado en un sistema con doble pared o en un sistema completamente cerrado. La mayoría de los glicoles se deterioran a altas

temperaturas, pero estas mezclas deben revisarse, al menos en su pH para determinar si requieren reemplazarse o mantienen su estabilidad y eficacia.

Cabe mencionar que las pérdidas térmicas del colector son mayores utilizando aceite sintético en lugar de agua, pero la temperatura de entrada del agua afecta la condición de salida del vapor, con menores temperaturas de entrada se incrementa la eficiencia del colector y se reduce la calidad de salida del vapor.

### **3.4 Oportunidades de desarrollo.**

La Agencia Internacional de la Energía suscribe a más de 40 acuerdos internacionales de cooperación y colaboración en la tecnología, investigación y desarrollo de la energía. A través de SolarPACES (Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems) que es una organización de cooperativa internacional que reúne a equipos de expertos nacionales alrededor del mundo para enfocarse en el desarrollo y la comercialización de sistemas de concentración de energía solar (también conocidos como sistemas de energía solar térmica).

En dicha organización se llevan a cabo varias tareas relevantes, entre las cuales podemos mencionar:

1. Tecnología y aplicaciones de concentración solar. En esta tarea se lleva a cabo el Desarrollo y prueba de componentes y subsistemas; refinamiento de técnicas e instalaciones de cómputo para control y dispositivos de medición. Se buscan avances en áreas específicas de tecnología solar. Países participantes: Brasil, Egipto, Comunidad Europea, Francia, Alemania, Israel, México, Sudáfrica, España, Suiza y Estados Unidos.

2. SHIP Calor solar para procesos industriales (Por sus siglas en inglés Solar Heat for Industrial Processes). Este es un proyecto de investigación del Programa de Calentamiento y Enfriamiento Solar (IEA) y el Programa de SolarPaces, quienes juntan a expertos e industrias de los campos de calentamiento solar y potencia solar de alta temperatura. Para lograr los objetivos, los participantes son

invitados a la investigación y desarrollo en el marco de los siguientes cuatro sectores:

1. Calor solar de proceso (País líder: España),
2. Investigación de sistemas industriales de energía (País líder: Austria),
3. Colectores y componentes (País líder: Alemania)
4. Integración de componentes y demostración (País líder: Alemania). Países participantes: Egipto, Alemania, México, España (Entre otros).

Los retos para el diseño de nuevas estructuras y concentradores se resumen en:

1. Reducción de costo y mejora de rendimiento. Basado en los estimados iniciales, parece ser posible una reducción de hasta un 50% en el costo de esta tecnología.
2. Desarrollo industrial. De forma que tome fuerza nuevamente esta tecnología y se aporte en su desarrollo una mejora significativa.
3. Reducción del riesgo. Este riesgo debería ser reducido, resulta de incertidumbre en costo, tecnología y disponibilidad del recurso, ventas, parámetros financieros, estabilidad política y ubicación.

### **3.5 El concentrador parabólico.**

Las altas temperaturas generadas por los CCP se logran debido a la concentración de la energía solar por el reflector parabólico. En un concentrador de este tipo, se aprovecha la radiación directa del sol. Cuando CCP esta adecuadamente orientado, los rayos solares se reflejan en la superficie parabólica e inciden en una región a lo largo de una línea que corresponde al foco de la sección transversal de la canal parabólica. En esta línea focal está colocado un receptor normalmente cilíndrico, donde la radiación es absorbida y transformada en energía térmica. Dicha energía es removida mediante un fluido con propiedades térmicas adecuadas, ya sea agua o algún aceite térmico, y posteriormente es

utilizada como calor. Las pérdidas térmicas de este sistema son en su mayor parte debidas a la convección (velocidad del viento) y la radiación emitida en la superficie del absorbedor (temperaturas por arriba de los 400° C).

En los CCP la construcción de la superficie parabólica es normalmente una lámina de metal pulido con sección parabólica aunque también se pueden utilizar segmentos de espejos inclinados. El receptor está localizado en la línea focal del canal parabólico e incluye al absorbedor (asociado con cubiertas y aislamiento). El receptor es comúnmente un con ducto por donde circula el fluido que transporta el calor hacia una máquina térmica para su utilización. El sistema debe estar motorizado para seguir el movimiento diurno del sol ya que el concentrador debe obtener el máximo posible de radiación solar directa y formar una imagen del Sol en el absorbedor lineal. El requerimiento de rastreo en conjunto con el uso de materiales que deben resistir altas temperaturas, eleva el costo y mantenimiento de estos sistemas CCP hasta el punto en que se restringe su uso a instalaciones de gran escala.

Es común que los CCP presenten un sistema motorizado para seguir el movimiento aparente del sol cuando su orientación es norte-sur, pues el concentrador debe obtener el máximo posible de radiación solar directa y formar una imagen del Sol en el absorbedor lineal.

Pero también puede tener una orientación este-oeste donde la correcta orientación del colector se lleva a cabo diariamente o en algunos casos dependiendo del tamaño del receptor hasta quincenalmente. (Kalogirou *et al.*, 1997)

### **3.6. Generación de vapor como alternativa de sustitución a calderas de aplicaciones específicas.**

En relación con la generación directa de vapor el sistema que hemos elegido es el concentrador de canal parabólico (CCP), por su costo, versatilidad y su capacidad modular.

Se propone diseñar, construir y evaluar un módulo concentrador CCP para que caliente el agua hasta 120° C con una presión mayor a 1.4 atmósferas absolutas. Se tiene especial atención en la reducción del costo neto de fabricación -sin la necesidad de sacrificar su rendimiento- así como en la elaboración de un diseño práctico y de fácil manufactura, que pueda disminuir su costo de fabricación, transporte e instalación y mantenimiento.

Para una caldera, por ejemplo, de 30 HP, a 100°C su capacidad nominal es de 469.47 kg/hr (0.13 kg/s de agua), con una capacidad de salida de 253.08 Mcal/hr (294.14 KW), y consume combustible como se muestra a continuación en la Tabla 1 (Powermaster, 2009)

Consumo aproximado de combustible			
Combustible	Capacidad calorífica	Cantidad	Unidades
Aceite Diesel	9250 kcal/l	31.45	l/hr
Gas natural	8200 kcal/m <sup>3</sup>	35.89	m <sup>3</sup> /hr
Gas LP	6350 kcal/l	46.34	l/hr
Gas LP	11000 kcal/kg		

Tabla 1. Capacidad nominal de calderas, Calderas Powermaster, 2009. (Powermaster, 2009)

Se pueden comparar los costos de ambas tecnologías, pero el impacto más positivo al usar FRE es el ambiental. En este trabajo se presenta la opción de diseño de un colector que forma parte de un campo de colectores solares, como alternativa sustentable de sustitución de tecnologías convencionales.

### 3.7 Diseño del concentrador de canal parabólico.

Los colectores solares de energía son un tipo especial de intercambiadores de calor que transforman la energía de la radiación solar en energía térmica que es transportada mediante un fluido de trabajo. En los concentradores solares, la energía proveniente del sol se concentra en un dispositivo receptor donde dicha energía se absorbe en la superficie y se transforma en calor por conducción. Este calor es removido por un fluido (normalmente el aire, agua, o aceite) que fluye a

través del receptor. Dependiendo de la óptica utilizada para llevar a cabo la concentración de la energía solar, los colectores concentradores se pueden clasificar en concentradores de imagen o de no-imagen, dependiendo de si se forma una imagen bien definida del Sol en el receptor o no, respectivamente. Cabe mencionar que la energía solar colectada se puede almacenar como energía interna del fluido en un tanque de almacenamiento y que se puede utilizar posteriormente durante la noche o en días nublados.

La clasificación de colectores solares también puede realizarse en dos categorías: los que tienen sistema de concentración y los que carecen de éste. En un colector no concentrador con seguimiento aparente del Sol el área de abertura del colector es igual al área de recepción, mientras que en un colector concentrador con seguidor solar el área de abertura es más grande que el área de recepción. En los colectores concentradores se usan dispositivos que reflejan o refractan la luz hacia el área de receptor más pequeña, es decir, la energía solar se concentra teniendo una mayor densidad de flujo radiativo por unidad de área (Beckman y Duffie, 1991).

Los colectores concentradores tienen ciertas ventajas comparados con los colectores planos convencionales:

- Se obtienen mayores temperaturas en un colector concentrador para la misma superficie de colección. Esto significa que se puede lograr una mejor eficiencia termodinámica.
- La eficiencia térmica es mayor debido a que el área de pérdida de calor es pequeña comparada con el área de recepción.
- Es económicamente viable el tratamiento de superficies selectivas y la instalación de tubos de vacío para reducir pérdidas de calor.

Las desventajas son:

- Los sistemas de concentración prácticamente no colectan la radiación difusa y sólo aprovechan la radiación solar directa. Por lo tanto, no pueden funcionar en días nublados.
- Se requiere de un sistema de seguimiento del movimiento aparente del Sol, de forma que se intercepte la radiación directa y mejore su eficiencia.
- Las superficies reflectivas pueden perder su reflectancia con el tiempo, además requieren limpieza y mantenimiento periódicos.

Este tipo de sistemas de concentración pueden ser rotados para seguir al Sol de manera que intercepten la mayor cantidad de radiación directa posible. Pueden tener uno o dos ejes, y pueden estar orientados norte-sur o este-oeste. (Beckman y Duffie, 1991) Hay diferencias significativas en la cantidad de radiación incidente, su dependencia del tiempo y la calidad de imagen obtenida por estos sistemas. Para los sistemas de baja concentración es posible ajustar su posición intermitentemente, ya sea semanal o mensualmente, dependiendo del diseño. La ventaja de los sistemas de orientación este-oeste es que generalmente se alinean cada semana sin que esto afecte en gran medida a su rendimiento, lo cual elimina la necesidad de acoplar un sistema electromecánico de seguimiento automático del sol.

### **3.7.1 .Colector de canal parabólico (CCP).**

Con este tipo de colectores se pueden obtener razones de concentración geométrica de hasta 216 para seguimiento de un eje y temperaturas de hasta 400°C. Recordemos que la concentración geométrica, o simplemente concentración, se refiere a la relación que existe entre el área de abertura del colector y el área de recepción. Los CCP son diseñados con estructuras ligeras y costo bajo, su aplicación más común es la producción de calor de proceso. Tienen una buena eficiencia y un alto rendimiento. Este tipo de colector se conforma mediante el doblado de lámina (comúnmente de material reflectivo) con un perfil parabólico.

En la línea focal que se logra mediante el conformado de dicha lámina se coloca un tubo que consta de una superficie absorbidora que es típicamente una cubierta selectiva que tiene alta absorción para radiación solar, pero una baja emisividad para pérdidas térmicas por radiación. También es práctica común que dicho tubo esté confinado por un tubo de vidrio como envolvente, lo que permite reducir las pérdidas de calor por convección hacia los alrededores ya que el tubo de vidrio se encuentra evacuado. Cuando la apertura del canal parabólico está apuntada hacia el Sol, esto es, los rayos incidentes son paralelos al eje de la parábola, el reflector permite que estos sean dirigidos hacia el foco donde se localiza el tubo receptor (Kalogirou, 2004).

El colector puede ser orientado de dos formas: este-oeste, de tal modo que sigue al Sol de norte a sur o bien el otro modo de orientación es norte-sur donde el colector presenta la latitud del lugar y sigue al Sol de este a oeste. El primer modo de seguimiento requiere un menor ajuste durante el día y la apertura siempre está frente al Sol a mediodía pero el rendimiento del colector durante la mañana y la tarde se ve reducido significativamente debido a los ángulos de incidencia pronunciados. El segundo modo de seguimiento tiene su mayor pérdida al medio día solar. En el periodo de un año, un campo de colectores orientado de norte-sur colecta más energía que un campo orientado este-oeste. Sin embargo, el sistema norte-sur colecta mucha energía en el verano y muy poca en el invierno (Debido a la duración del día REF), contrario a lo que sucede con un sistema de este-oeste. Además, la orientación norte-sur requiere de sistemas de seguimiento continuo lo que resulta en sistemas más complicados que los empleados en los sistemas orientados este-oeste.

En la mayoría de los campos de CCP son construidos con varios módulos conectados en serie (filas de CPC) y en paralelo (columnas de CPC) y son soportados por pedestales. Es la tecnología más madura para generar calor a temperaturas que superan los 200°C, ya sea para generación de electricidad o para aplicaciones de calor de proceso (Beckman y Duffie, 1991).

Como se mencionó, es común que se coloque un tubo de vidrio alrededor del receptor para reducir las pérdidas convectivas de calor, reduciendo así el coeficiente de pérdidas de calor ya que el espacio entre el tubo de vidrio y el tubo receptor está evacuado. La desventaja es que dicha cubierta funciona como filtro de la luz reflejada desde el concentrador, lo que añade una pérdida por transmitancia de alrededor de 5 a 10%, a pesar de que el vidrio esté limpio. La envolvente de vidrio a veces tiene una capa antirreflexiva para mejorar la transmitancia. Cabe señalar que para poder disminuir los costos y hacerlos competitivos ante otras tecnologías, los CCP deben tener una buena relación de rigidez y peso, así como una adecuada disponibilidad termodinámica respecto a su aplicación, de tal forma que sea fácilmente manufacturable y cuente con una vida útil lo suficientemente larga para su amortización (Bakos *et al.*, 2001).

Por otro lado, se tiene el sistema de seguimiento para el movimiento aparente del Sol. Un mecanismo de seguimiento debe ser confiable y capaz de seguir al Sol con cierto grado de exactitud, regresar al colector a su posición original al fin del día o durante la noche y también de seguirlo en periodos de nubosidad intermitente. Estos mecanismos también deben de servir para protección de los colectores, por ejemplo, pueden girar el colector fuera de foco para protegerlo de condiciones peligrosas de trabajo o ambiente como ráfagas de viento, sobrecalentamiento y falla del mecanismo del flujo de fluido térmico. La exactitud requerida del mecanismo de seguimiento depende del ángulo de aceptación del colector. Estos mecanismos de seguimiento pueden ser puramente mecánicos o eléctricos y electrónicos (Bakos, 2005).

### **3.8 Parámetros de diseño del colector de canal parabólico.**

En este trabajo se diseñó un CCP con la idea de construir un dispositivo modular que pueda generar vapor con temperaturas de hasta 120°C y una presión de 1.4 atmósferas absolutas, presente un costo de inversión bajo y que su fabricación, operación y mantenimiento sean fáciles de llevar a cabo. El colector se construyó sin complicados procesos de manufactura, de forma tal que se asegura que se

puede duplicar fácilmente. Se eligió el aluminio como material de construcción pues es ligero y resistente a las condiciones climáticas. Se debe mencionar que para construir la superficie parabólica se escogió una lámina reflejante de aluminio anodizado, de la marca Alanod, con dimensiones 1.22 x 2.44 m y una reflectividad cercana a 95%.

Además del tamaño de la lámina comercial de aluminio, se decidió utilizar como parámetro de diseño un ángulo de borde ( $\phi$ ) de  $90^\circ$ . Este ángulo corresponde al ángulo medido desde el borde del colector hasta la línea que forma el eje de la parábola. Se ha demostrado que con el ángulo de  $90^\circ$ , se minimiza la distancia media entre el foco y el reflector y entonces la desviación de la radiación directa, de tal forma que los errores de inclinación y seguimiento son menos pronunciados. (Beckman y Duffie, 1991) Además, ya que en este caso los bordes del colector y la línea focal quedan en el mismo plano, el ángulo de borde seleccionado permite colocar un vidrio plano que cubre al colector y reduce las pérdidas de calor por convección hacia los alrededores y al mismo tiempo proteger la superficie reflectiva del polvo, la lluvia y del granizo.

Con base en el ángulo de borde requerido por diseño ( $90^\circ$ ) y las dimensiones de la lámina reflejante 1.22 x 2.44 m, se fijó el valor de la distancia focal ( $f$ ) en 0.25 m. Cabe mencionar que con base en estos dos parámetros geométricos quedan definidos los demás parámetros ópticos como se muestra posteriormente.

Para obtener el perfil parabólico del CCP, se utilizaron costillas transversales formadas por dos láminas encontradas y unidas por rieles como se muestra en la Figura 1.7. Dichas costillas fueron cortadas con la forma de la sección de la parábola y buscan dar rigidez a la estructura al colector. En total, el CCP cuenta con seis costillas, de las cuales dos están en los extremos laterales donde son colocadas las tapas para conformar lo que puede ser visto como una caja sin tapa. Para unir los bordes de la lámina reflectiva que descansa sobre dichas costillas a la carcasa del colector se usaron rieles de aluminio. Estos rieles sirven de soporte para un marco, también de aluminio, que soporta un vidrio de 4 mm de espesor, cuya principal función es disminuir las pérdidas convectivas del sistema. El resto

de la lámina de aluminio utilizada en el colector es comercial de fácil adquisición y bajo costo. En la Figura 1.8 se muestra una vista del CCP una vez construido.

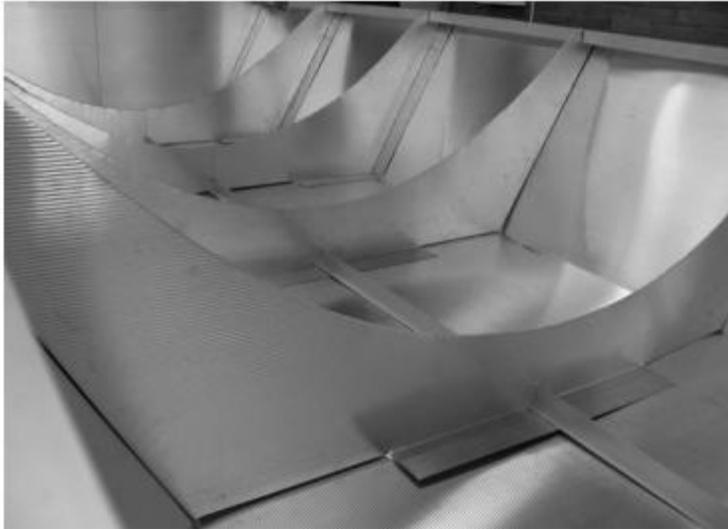


Figura 1.7. Vista interior del concentrador de canal parabólico. Se muestran las costillas transversales con el corte de perfil parabólico.



Figura 1.8. El colector concentrador de canal parabólico.

Para determinar el tamaño del receptor es necesario considerar el ángulo que sustenta el disco solar visto desde la Tierra y establecer cómo se lleva a cabo la reflexión de la luz por la lámina reflectiva. De tal suerte que se establece la manera en la que incide la radiación solar concentrada en la región focal. Esto se

lleva a cabo mediante la técnica de trazado de rayos que se explica a continuación.

### **3.9 Trazado de rayos.**

El trazado de rayos es el proceso gráfico para seguir la trayectoria de un gran número de rayos de radiación incidente en el sistema óptico de concentración y determinar su distribución en la superficie que los intercepta. Para un colector concentrador, el trazado de rayos inicia con el ensamble de rayos de radiación incidente en la apertura y determina la distribución e intensidad de aquellos rayos en el receptor.

El trazado de rayos se realiza mediante vectores. Para una superficie reflejante, se determinan la dirección y sentido, así como el punto de intersección de un rayo incidente con la superficie reflejante. La normal a la superficie se determina con base en la forma de la superficie reflejante y con base en la ley de reflexión donde el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, se establece la dirección de los rayos reflejados. Dado el tamaño finito del Sol y el ángulo que sustenta visto desde la Tierra es necesario considerar que los rayos solares se encuentran en un cono de 16 minutos de arco, es decir que en lugar de tener sólo puntos que describen una línea focal se tiene un región espacial donde llegan los rayos solares una vez concentrados (Riveros, 1986).

Con base en el tamaño de la lámina reflejante y el ángulo de borde, y mediante el dibujo asistido por computadora (CAD), se llevó a cabo la determinación del ancho de la abertura ( $W_a$ ) del CCP, así como del área de abertura ( $A_a$ ), esta última es el área donde incide la radiación solar directa ( $G_b$ ) del colector. Así, al considerar los 16' que sustentan los rayos solares se determinó el tamaño mínimo del receptor cilíndrico. Para llevar a cabo esto se ubicaron 21 puntos representativos a lo largo de la superficie de la parábola (Figura 2.3) considerando tres rayos reflejados, uno de estos es el rayo central que se dirige al foco de la parábola y los dos restantes con un ángulo desviado  $\pm\delta$  con respecto al rayo central debido al tamaño del Sol

(Kalogirou, 2004). El cono de radiación reflejada desde cualquier punto pasa a través del plano focal y forma una elipse con el eje mayor Amaj (Kamal-Eldin, 1973).

Si bien la forma óptima del receptor resulta elíptica, se considera un receptor tubular de sección transversal circular. El tamaño se determina de forma que el receptor intercepte la mayor cantidad de rayos reflejados desde todos los puntos de la parábola, es decir, el diámetro del receptor cilíndrico debe ser más grande que la máxima desviación de los rayos reflejados. Para estos receptores, el radio mínimo está dado por el rayo reflejado desde el borde, porque es el que recorre la mayor distancia  $D$  hacia el foco  $f$  (Beckman y Duffie, 1991).

$$R_{\min} = D \sin \delta = \left( \frac{x_o^2}{4f} + f \right) \sin \delta$$

Donde  $x_o$  es la mitad del ancho de la abertura ( $Wa$ ),  $f$  es la distancia focal y  $\delta$  el ángulo de dispersión. En la Figura 1.9. se muestra la dispersión angular  $\delta$  y sus tres posibles razones.

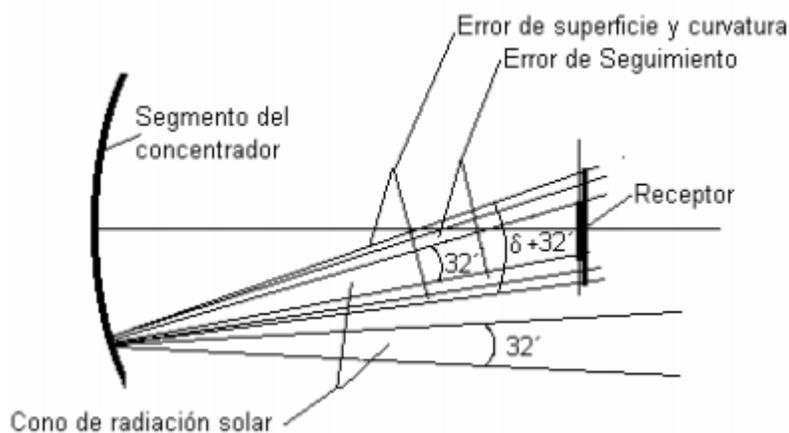


Figura 1.9. Factores que afectan el diámetro del receptor.

Una ecuación equivalente a la ecuación (1) es:

$$R_{\min} = \frac{2f \sin \delta}{(1 + \cos \phi)}$$

Donde  $\phi$  es el ángulo de borde.

La ecuación (2) indica que para una distancia focal fija si el ángulo de borde  $\phi$  se incrementa también lo hace  $R_{\min}$ . Así, el óptimo se logra al incrementar la longitud de  $x_0$  (que es la mitad del ancho de la abertura ( $W_a$ ) y sólo se considera ésta por simetría) y minimizar el diámetro del receptor, lo que implica maximizar la razón de concentración.



Figura 1.10. Diagrama de trazado de rayos y diámetro mínimo requerido de tubería. Con base en las dimensiones y la geometría de la parábola, el diámetro teórico del receptor del CCP es (Beckman y Duffie, 1991).

$$D = \frac{W_a \sin 0.267}{\sin \phi_r} = \frac{1.05 \sin 0.267}{\sin 90^\circ} = 0.005m$$

Donde  $A_a$  es el área de aceptación del CCP y  $A_r$  es el área del receptor.

Los errores asociados con la superficie de la CCP son clasificados como aleatorios y no aleatorios. Los errores aleatorios son definidos como aquellos cuya naturaleza es completamente aleatoria y se pueden representar mediante una distribución de probabilidad normal. Los errores no aleatorios son consecuencia de la manufactura y ensamble, y la operación del colector.

(Kalogirou, 2004) En el siguiente capítulo se habla con más detalle sobre este tipo de errores.

Los errores aleatorios son modelados estadísticamente mediante la desviación estándar de la distribución de la energía total reflejada y se pueden estimar mediante (Kalogirou, 2004).

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{sun}^2 + 4\sigma_{sem}^2 + \sigma_{mirror}^2}$$

Donde  $\sigma_{sun}$ , es la desviación del ángulo del cono solar,  $\sigma_{sem}$  es el error por ajuste de seguimiento y  $\sigma_{mirror}$  errores de superficie.

Para el caso en particular del concentrador parabólico que se construyó, se considera  $\sigma_{sun}=0.004rad$  para condiciones de cielo claro,  $\sigma_{sem}=0.009rad$  como el error por ajuste semanal (ya que se pretende realizar ajustes semanales únicamente para el concentrador con orientación este-oeste) y  $\sigma_{mirror}=0.008rad$  como error de superficie parabólica debido a la distorsión en la pendiente de la curva parabólica por carga de viento y errores de superficie:

$$\sigma = \sqrt{(0.004rad)^2 + 4(0.009rad)^2 + (0.008rad)^2} = 2.0 \times 10^{-2} rad$$

El valor del diámetro del receptor considerando los errores ópticos del CCP está dado

Por:

$$D = \frac{W_a \sin(0.267 + \delta / 2)}{\sin \phi_r} = \frac{1.05 \sin(0.267^\circ + 1.15^\circ / 2)}{\sin 90^\circ} = 0.015m$$

Donde se considera que

$$\frac{180}{\pi} \sigma \cong \delta$$

Es decir, al considerar una desviación de  $1.15^\circ$  de los rayos que inciden en el receptor respecto a un concentrador ideal, el diámetro del receptor es de 15.0 mm en lugar de 5.0 mm.

El resultado obtenido mediante un software de CAD, corresponde a un diámetro de receptor de  $2/3$  de pulgada (16.9 mm) que concuerda con el obtenido analíticamente. En la Tabla 6 del capítulo 3, se muestra el valor de concentración teórico y en la Tabla 7 del mismo capítulo, se encuentra el valor de concentración para el colector del que se hace referencia en este trabajo.

### **3.10. Prueba analítica de túnel de viento (Modelo teórico).**

La norma técnica complementaria para diseño por carga de viento indica que toda estructura que sea sometida al efecto de las fuerzas del viento debe ser analizada de forma tal que su diseño ofrezca las condiciones de seguridad en función de las características de la misma estructura. Según esta norma, la estructura del concentrador se ubica en el Tipo 2 (Federal, 2004).

En el diseño de la estructura sometida a la acción de viento se tomaron en cuenta los siguientes efectos:

- a) Empujes y succiones estáticos;
- b) Fuerzas dinámicas paralelas y transversales al flujo principal, causadas por turbulencia;
- c) Vibraciones transversales al flujo causadas por vórtices alternantes; y
- d) Inestabilidad aeroelástica.

Cabe señalar que la prueba de túnel de viento se refiere al estudio que se realiza en construcciones de forma geométrica poco usual y con características que las hagan particularmente sensibles a los efectos de viento. Si existen resultados de

pruebas a construcciones similares, pueden tomarse como base para análisis posteriores, según menciona la norma.

Los efectos estáticos del viento sobre una estructura o componente de la misma se determinan con base en la velocidad del viento cuando la estructura está estática. Dicha velocidad de diseño se obtendrá de acuerdo con la ecuación siguiente (Federal, 2004).

$$V_D = F_{TR} F_a V_R$$

Donde

$V_R$  es la velocidad del viento de referencia o medida en el lugar del emplazamiento,

$F_{TR}$  es factor que toma en cuenta las condiciones locales relativas a la topografía y a la rugosidad del terreno en los alrededores del sitio de desplante La presión que ejerce el flujo del viento sobre una construcción determinada,  $p_z$ , en Pa ( $\text{kg/m}^2$ ), se obtiene tomando en cuenta su forma y está dada de manera general por la expresión (Federal, 2004).

$$P_z = 0.47 C_p V_D^2$$

Donde  $C_p$  es el coeficiente local de presión, que depende de la forma de la estructura,  $V_D$  es la velocidad de diseño a la altura  $z$ .

En la tabla 1 se muestran los parámetros para la evaluación del concentrador mediante la prueba de túnel de viento. Estos valores fueron tomados de la Tabla 3.4 de las normas técnicas complementarias para diseño por viento (Federal, 2004).

F $\alpha$ 1	1
VR	36 m/s
FTR	0.9
Cpb	0.8
Cps	-0.4
Cpl	-0.8
Cpp	-0.8

Tabla 2 Parámetros utilizados para la modelación de carga de viento del CCP

Con base en los parámetros definidos en la Tabla 2, podemos calcular la velocidad de diseño para el cálculo de la presión:

Y análogamente, para la presión:

$$Pdb = 0.47 \times 0.8 \times (36)^2 = 487.296 \text{ Pa}, Pdb \text{ es la presión de diseño barlovento}$$

$$Pds = 0.47 \times (-0.4) \times (36)^2 = -243.648 \text{ Pa}, Pds \text{ es la presión de diseño sotavento}$$

$$Pdl = 0.47 \times (-0.8) \times (36)^2 = -487.296 \text{ Pa}, Pdl \text{ es la presión de diseño lateral}$$

$$Pdp = 0.47 \times (-0.8) \times (36)^2 = -487.296 \text{ Pa}, Pdp \text{ es la presión de diseño techo plano}$$

Donde:

Dpb es el coeficiente para pared de barlovento,

Cps es el coeficiente para pared de sotavento,

Cpl es el coeficiente para paredes laterales,

Cpp es el coeficiente para techo plano.

Estas presiones, calculadas con base en los coeficientes definidos por la norma, definen las presiones que actuarán sobre las diferentes superficies del colector.

Esta prueba se realiza con la finalidad de determinar la resistencia estructural del diseño y de esta forma definir las posibles mejoras estructurales.

## **Conclusión.**

En este trabajo se muestran los resultados realizados a prototipos de CCP, obtenidos mediante análisis teórico. El diseño juega un papel muy importante en la fabricación o manufactura de un nuevo modelo. La construcción de este CCP debió estar basada en el diseño conceptual y la simulación previa de varios de estos escenarios. Como se vio durante el trabajo, la eficiencia óptica puede ser incrementada en primer lugar optimizando la geometría del CCP, aunque también hay que tomar en cuenta el proceso de manufactura al que el modelo será sometido y la exactitud que dicho proceso ofrece para fijar las dimensiones más críticas. Debido a que la idea original era fabricar un CCP de manera que pudiera ser fácilmente reproducible, se sabía de antemano que su eficiencia sería muy baja.

En general se observa una buena correlación en el análisis teórico, de esta manera se validan las variables más importantes que afectan al sistema. Como parte del desarrollo de este proyecto, se sugiere poner especial atención al método de construcción del colector parabólico; los errores por manufactura pueden ser más costosos que una inversión adicional para la mejora en este aspecto. La estructura también es parte importante del colector, pues bajo cargas de viento, seguimiento solar o por el propio peso del colector, puede afectarse su vida útil, haciendo este colector menos competitivo ante las alternativas comerciales.

## Citas Bibliográficas.

- Bakos, G. C., I. Ioannidis, N. F. Tsagas y S. I. 2001. "Design, optimization and conversion efficiency determination of a line-focus parabolic-trough solar-collector (PTC)." *Applied Energy* Vol 68: pp. 43-50.
- Bakos, G. C. 2005. "Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. ." *Renewable Energy* Vol 31.: Pag 2411-2421.
- Beckman, W. A. y J. A. Duffie 1991. "Solar engineering of thermal processes." John Wiley & Sons, INC. Vol. 2.
- Beohanasolar 2011. "Historia solar (en línea)" [http://www.beohanasolar.com/solar\\_power/history\\_of\\_solar.html](http://www.beohanasolar.com/solar_power/history_of_solar.html).
- Cohen, G. E. 1994. "Operation and efficiency of large-scale solar thermal power plants" *Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XII* Vol. 2017: p. 332-337.
- Dagan, E., M. Muller y F. Lippke 1992. "Direct Solar Steam Generation in Parabolic Trough Collectors" *Informe tecnico DISS-03/92*.
- Dudley, V., K. G., M. Sloan y D. Kearney 1994. "SEGS LS2 solar collector-test results. Report of sandia national laboratories." Vernon E. Dudley.
- Eckhard Lüpfer, M. G., S. Wolfgang, R. O. Antonio Esteban, E. Zarza y P. Nava 2001. "EuroTrough - Design Issues and Prototype Testing at P." *ASME Solar Energy: The Power to Choose*.
- Edenburn, M. W. 1976. "Performance analysis of a cylindrical parabolic focusing collector and comparison with experimental results." *Solar Energy Systems* Vol 18: Pages 437-444.
- Federal, G. O. d. D. 2004. "Normas técnicas complementarias para diseño por viento."
- Geyer, M., E. Lüpfer, R. Osuna, A. Esteban, W. Schiel, A. Schweitzer, E. Zarza, P. Nava, J. Langenkamp y E. Mandelberg 2002. "11th Int. Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies."
- Heinzel, V. 1995. "Simulation model of a parabolic trough collector." *International Conference on Energy Conversion and Conservation Topic F*.
- Kalogirou, S., S. Lloyd y J. Waerd 1997. "Modelling, optimisation and performance evaluation of a parabolic trough solar collector steam generation system." *Solar Energy* Vol. 60: pp. 49-59.
- Kalogirou, S. 2004. "Solar thermal collectors and applications, Progress in energy and combustion science." *Solar Energy* Vol. 30: pp. 231-295.
- Kamal-Eldin, H. 1973. "Theoretical performance of cylindrical parabolic solar concentrators." *Solar Energy* Vol. 15: pp. 219-244.
- Kearney, D. y G. Cohen 1994. "Improved parabolic trough solar electric system based on the SEGS experience." *Proceeding of the 1994 annual conference*: pp.147-150.
- Maxwell, E. L. y D. S. Renne 1994. "Measures of Renewable Energy, National Renewable Energy Laboratory." *Solar Energy* Vol. 3: Pag. 245-252.
- Odeh, S. D., G. L. Morrison y M. Behnia 1998. "Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors." *Solar Energy* Vol. 62: pp. 395-406.

- Pierce, N. T. 1976. "Efficient, low cost, concentrating solar collectors." Solar energy vol. 19: pp. 395-400.
- Powermaster, C. 2009. "20-60 HP Powermaster (en línea)."<http://www.powermaster.com.mx/>.
- Riveros, H. G. 1986. "Graphical analysis of sun concentrating collectors, Solar Energy." Vol. 36: pp. 313-322.
- Tyner, C. E., G. J. Kolb, M. Geyer y M. Romero 2001. "Concentrating Solar Power." Solar Paces Members Vol.39.