

CONCENTRADOR LINEAL FRESNEL PARA LA GENERACIÓN DIRECTA DE VAPOR DE AGUA #

Marcelo Gea, Luis Saravia¹, Carlos Fernández, Ricardo Caso y Ricardo Echazú
Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO, UNSa - CONICET)
Universidad Nacional de Salta – Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta
Tel - Fax 0387-4255489 e-mail: geam@unsa.edu.ar

RESUMEN: Se construyó un prototipo de concentrador lineal Fresnel de 8 m² para la generación directa de vapor de agua. El sistema está formado por 8 espejos de eje horizontal y un absorbedor con concentrador secundario a 4 m de altura. Se realizaron estudios geométricos para la determinación de la configuración del sistema, la curvatura de los espejos y el diseño del absorbedor. Se desarrolló un método de sujeción de espejos que permite generar la curvatura adecuada para cada concentrador. Se realizaron ensayos para la determinación de la energía térmica producida. La realización del trabajo permitió adquirir una importante experiencia y generar las bases para el desarrollo de sistemas en escalas superiores.

Palabras clave: energía solar térmica, concentrador lineal Fresnel, generación de vapor.

INTRODUCCION

Una de las formas de aprovechamiento térmico de la energía solar es la generación directa de vapor de agua a medianas y altas temperaturas mediante distintas tecnologías de concentración de la radiación. Existe actualmente un fuerte impulso para el crecimiento del desarrollo de centrales solares térmicas para producción de electricidad debido a un marcado incremento de los mercados, la aparición de nuevas tecnologías y materiales y la disposición de subsidios en distintos países para ese fin (Mills, 2004). Los sistemas de concentración comúnmente utilizados en las plantas de generación de potencia son los de discos parabólicos, de receptor central y de concentrador cilindro parabólico. Un concepto más nuevo es el concentrador lineal tipo Fresnel (CLF) que se caracteriza por la sencillez constructiva en relación a las otras tecnologías.



Figura 1: Esquema del concentrador lineal tipo Fresnel

En la figura 1 se muestra una foto del CLF construido por los autores. Los concentradores también son cilindro parabólicos pero de muy baja curvatura. Se instalan a nivel del piso y siguen la trayectoria aparente del sol girando alrededor de ejes axiales

Trabajo financiado por CONICET y ANPCyT

¹ Investigador principal del CONICET

horizontales. Los espejos concentran la radiación solar directa en un absorbedor que se encuentra fijo a algunos metros de altura. Este consiste en una torre lineal con la cavidad en su cara inferior.

Los desarrollos de sistemas CLF de grandes dimensiones para generación de potencia se iniciaron en los años 90 en la compañía Solarmundo en Bélgica (Häberle et al, 2001), y en la Universidad de Sydney en Australia (Mills and Morrison, 2000). Se utilizaron tecnologías que difieren básicamente en el diseño de la cavidad del absorbedor y en el grado de aprovechamiento del terreno ocupado por los reflectores.

La característica principal del CLF es que el absorbedor se encuentra separado de los concentradores, se mantiene fijo y no cuenta con partes móviles. Esta configuración genera ventajas importantes que se traducen en menores costos:

- Se utilizan concentradores con curvaturas pequeñas lo que permite el uso de espejos de vidrio deformados elásticamente. Los espejos se montan en marcos de construcción sencilla y económica.
- Los concentradores se instalan en una estructura a nivel del piso disminuyendo la carga del viento y resultando fácilmente accesibles para limpieza y mantenimiento.
- El sistema de seguimiento del sol se realiza mediante el giro alrededor de un solo eje.
- Se logra una densa cobertura del área de la instalación. Incluso se logra una configuración compacta aumentando el número de absorbedores (Mills and Morrison, 2000).
- Los absorbedores están fijos y no necesitan juntas de movimiento a alta presión ni sistemas de aislamiento térmico complejos.
- El vapor se genera directamente y no se utilizan intercambiadores de calor.

Las ventajas del concentrador lineal Fresnel hacen que resulte atractivo encarar la investigación de un desarrollo propio con materiales y tecnologías locales que pueden generar una aplicación competitiva en costos y eficiencia para la generación de vapor a partir de energía solar.

ESTUDIO GEOMÉTRICO

Se planteó la construcción de un conjunto de concentradores con un área total de colección solar de aproximadamente 8 m² conformada por 8 espejos de 0,42 m x 2,50 m y un absorbedor a 4 m de altura, en un arreglo como el que se muestra en el esquema de la figura 2. Para la determinación de la curvatura de los espejos y la inclinación de cada uno para el seguimiento del sol se realizó un estudio geométrico.

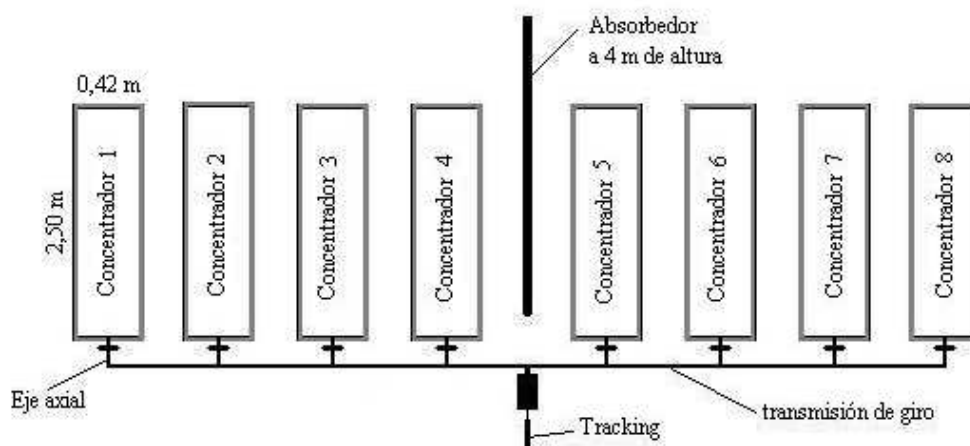


Figura 2: Esquema del sistema. Vista de planta.

Curvatura de los espejos:

Los espejos fueron deformados elásticamente mediante una fuerza concentrada en su eje longitudinal y fijados a una estructura de caños. El grado de concentración de los rayos solares reflejados en la superficie depende de la curvatura así producida. A fin de determinar la expresión matemática de la forma de los espejos se utilizó el análisis de deformaciones utilizado en resistencia de materiales. Se encuentra que la elástica bajo la acción de una carga P concentrada en su punto medio es función de x^3 donde x es la distancia a uno de los bordes del espejo:

$$E I y_1 = P x^3 / 12 - P L^2 x \quad (1)$$

$$E I y_2 = P x^3 / 12 - P (x - L/2) / 6 - P L^2 x / 16 \quad (2)$$

y_1 = deformación vertical del eje del espejo para x menor o igual a $L/2$

y_2 = deformación vertical del eje del espejo para x mayor o igual a $L/2$

E = módulo de elasticidad del vidrio

I = momento de inercia de la sección
P = fuerza vertical aplicada en L/2

Por cuestiones prácticas relativas al cálculo y construcción de los concentradores se eligió trabajar con el valor de la flecha o deformación máxima que ocurre en el punto medio de la longitud L como variable independiente. Planteando condición de máximo valor de la función se obtiene el valor de y_{max} , y luego la expresión de la deformada en función de la flecha:

$$EI y_{max} = - P L^3 / 48 \quad (3)$$

$$y_1 = 4 y_{max} x^3 / L^3 - 3 y_{max} x / L \quad (4)$$

$$y_2 = 4 y_{max} x^3 / L^3 - 8 y_{max} (x - L/2)^3 - 3 y_{max} x / L \quad (5)$$

Para comprobar la correspondencia entre la función cúbica obtenida y la deformación real del espejo se realizaron mediciones sobre un concentrador con una flecha de 0,27 cm. Se utilizó un tornillo micrométrico de 0,01 mm de apreciación y se midió la deformación vertical del vidrio cada 2 cm, obteniéndose los valores presentados en la Tabla 1.

Tabla 1: Comparación entre valores medidos y calculados de deformación vertical de la mitad de la longitud del espejo

Distancia (cm)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	21
y calculada (mm)	0	0,40	0,76	1,13	1,47	1,78	2,04	2,30	2,49	2,62	2,69	2,70
y medida (mm)	0	0,38	0,74	1,04	1,43	1,75	2,02	2,32	2,50	2,64	2,68	2,70

Como la distancia que existe entre el absorbedor y cada espejo es distinta, la flecha de cada uno también debe ser distinta y va disminuyendo mientras mayor es la distancia. Para determinar la curvatura adecuada de cada espejo se estudió la traza de rayos mediante utilizó el programa Cabri Geometre II Plus (Cabrilog, 2003). Variando la longitud de la flecha se fue encontrando el máximo grado de concentración para cada espejo a la distancia adecuada y con los valores obtenidos, que se transcriben en la Tabla 2, se construyeron los distintos concentradores.

Inclinación de los espejos:

Los espejos giran alrededor de un eje horizontal formando ángulos que permiten la concentración de la radiación en el absorbedor. Como la posición de cada concentrador respecto al absorbedor es distinta, el ángulo formado por cada uno respecto a la horizontal también es distinto. Para configurar inicialmente el sistema, sobre cada concentrador se realiza un enfoque para radiación normal. Los espejos se vinculan mediante un sistema de transmisión que produce que, durante el seguimiento del sol, la variación del ángulo sea la misma para todos los espejos. El movimiento de seguimiento del sol se consigue con un motorreductor controlado con un circuito eléctrico de realimentación. La determinación de los ángulos de enfoque inicial de cada espejo se realizó mediante Cabri y los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla2. Ajuste inicial de los reflectores. Flecha e inclinación inicial de los reflectores

AJUSTE INICIAL DE LOS REFLECTORES								
	Conc. 1	Conc. 2	Conc. 3	Conc. 4	Conc. 5	Conc. 6	Conc. 7	Conc. 8
Flecha	1,9 mm	2,2 mm	2,5 mm	2,8 mm	2,8 mm	2,5 mm	2,2 mm	1,9 mm
Inclinación mediodía solar	19,9°	15,4°	9,8°	3,5°	-3,5°	-9,8°	-15,4°	-19,9°

Se simuló mediante traza de rayos la concentración de radiación para distintos ángulos horarios ω_s de la posición del sol correspondientes a 4 horas antes y cuatro después del mediodía solar (figura 3). Se encontró un muy buen grado de concentración para los distintos ángulos de radiación generando en el absorbedor un área iluminada cuyo espesor nunca supera los 20 cm. También se observó que, debido a la gran distancia focal, existe una importante sensibilidad a pequeñas variaciones del ángulo como los que puede tener el mecanismo real. Por ello el sistema cuenta con un concentrador secundario CPC con una abertura de 40 cm de manera de abarcar un error del ángulo de enfoque de $\pm 0,5^\circ$.

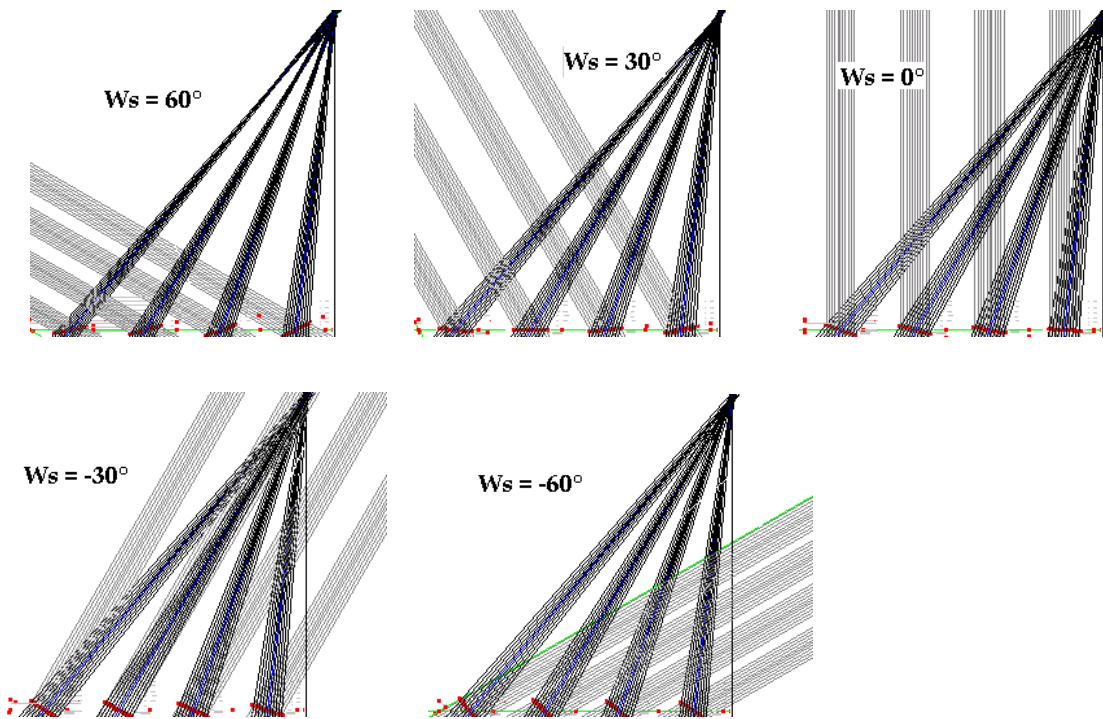


Figura 3: Traza de rayos para distintos ángulos horarios ω_s

Concentrador secundario:

Para captar mayor radiación en el absorbedor, se diseñó un concentrador secundario. Para ello se trazó la curva envolvente sobre papel, con el lápiz deslizando sobre un hilo tenso de un modo similar al método del jardinero para la elipse (Welford & Winston, 1989), como se indica en la figura 4 a la izquierda.

Un extremo del hilo (indicado con trazo azul), se fija en el punto A sobre el perfil del absorbedor, el hilo envuelve el conjunto de caños absorbedores en sentido horario y vuelve al punto inicial indicado con A en la figura. El otro extremo se fija a una distancia definida por el ángulo de apertura beta, en este caso el punto P, para una apertura de 42°.

El hilo se tensa y luego se desliza el lápiz como se muestra en la figura, desde el punto A, rotando en sentido antihorario de modo que el lápiz describa la trayectoria de la envolvente. En la figura se indicó con una línea verde una de las posiciones intermedias y con círculos rojos las posiciones del lápiz.

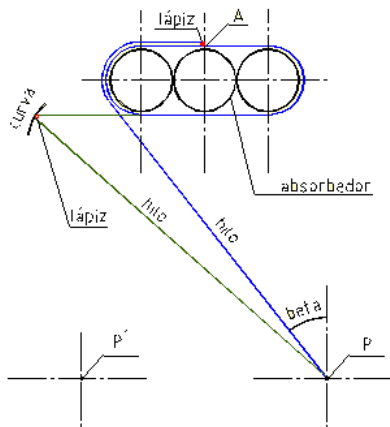


Figura 4: Esquema del método para el diseño del CPC y foto del concentrador secundario

De este modo se traza un lado de la curva. El otro lado, puede trazarse de la misma forma, envolviendo el hilo en sentido contrario y fijando el extremo en P' o bien copiando invertido el primer lado. En el lado de derecho de la figura 4, la fotografía muestra el extremo del absorbedor con el concentrador secundario.

CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

Concentradores:

Los concentradores se construyeron, como se dijo, generando una curvatura en espejos planos a partir de una fuerza en el centro del espejo, distribuida en el sentido longitudinal. Para ello se fabricaron marcos de caños estructurales de 50 mm x 30 mm donde apoyan los bordes de espejos planos de vidrio de 2 mm de espesor. Para la construcción de cada concentrador en la parte inferior del espejo, sobre su eje longitudinal, se pegó una barra de 10 mm x 30 mm con tuercas soldadas. En el marco, cada 50 cm se soldaron travesaños donde apoyan los tornillos que permiten traccionar la barra longitudinal hacia abajo, generando la deformación del espejo (figura 5).

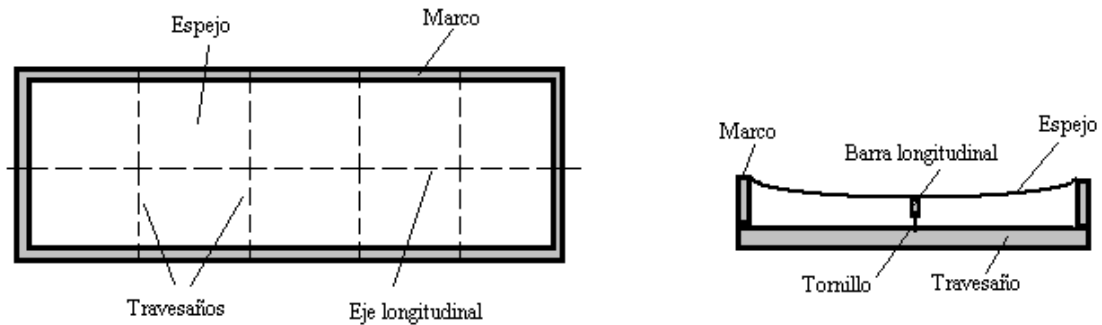


Figura 5: Esquema de la estructura del concentrador y de la deformación del espejo

Los marcos de los espejos apoyan en el eje longitudinal mediante rulemanes que permiten el giro con mínima fricción. Estos ejes van montados sobre dos bastidores nivelados horizontalmente que agrupan cuatro espejos cada uno. Para el movimiento de todo el conjunto los concentradores se vinculan entre sí y al sistema de tracking mediante una barra con bielas articuladas para cada uno de los espejos (figura 6).



Figura 6: Fotos de los concentradores vinculados con bielas articuladas a una barra común.

Absorbedor:

El absorbedor está constituido por tres caños de acero inoxidable colocados dentro de una cavidad aislada térmicamente. La cavidad consiste en una caja revestida con chapa galvanizada abierta en la parte inferior. Dentro de ella, transversalmente a los caños, se fijaron costillas de madera cada 50 cm con la forma del CPC. Sobre estas apoya el concentrador secundario construido con chapa de aluminio reflectivo (figura 7). El espacio entre el CPC y la caja se rellena con aislación térmica de alta temperatura. En los extremos del absorbedor se instaló un sistema para que el fluido se distribuya equilibradamente por los tres conductos. Como cubierta transparente, en la parte inferior de la cavidad, se colocó un film plástico resistente a altas temperaturas.



Figura 7: Fotos del absorbedor sin cubierta transparente (izq.) e instalado en la torre (der.)

ENSAYOS

Se realizaron los primeros ensayos para determinar la producción de vapor. Para ello, durante el transcurso de una hora, entre las 11 hs y 12 hs de un día claro se puso a andar el sistema. Se determinó la energía solar recibida midiendo la radiación sobre cada espejo durante ese período. Para ello se utilizó un piranómetro Kipp & Zonen tipo CM3. Se midió radiación total y difusa y se calculó por diferencia la radiación directa. Los valores encontrados para el inicio (Medida 1) y el final del ensayo (Medida 2) se presentan en la Tabla 3. La energía media proveniente de radiación directa para el periodo fue de 23,8 MJ.

Tabla 3. Medidas de radiación solar obtenidas

Medida 1	Espejo 1	Espejo 2	Espejo 3	Espejo 4	Espejo 5	Espejo 6	Espejo 7	Espejo 8
Total (W/m ²)	704	748	805	830	861	889	901	891
Difusa (W/m ²)	52	66	66	64	70	79	74	77
Directa (W/m ²)	652	683	739	766	791	810	827	814
Medida 2								
Total (W/m ²)	755	796	838	870	865	892	892	890
Difusa (W/m ²)	50	56	62	58	59	65	66	68
Directa (W/m ²)	705	740	775	812	806	827	827	822

Para la determinación del vapor generado se instaló a la salida del absorbedor un recipiente que actúa como separador de agua, una válvula para controlar la presión del sistema y un condensador (figura 8). Para el ensayo descrito se trabajó a presión atmosférica. La temperatura ambiente media en el período fue de 19 C. El condensado llegó a 3 litros en 64 minutos. Considerando el calor sensible absorbido por el agua el rendimiento térmico obtenido es del 35 %.



Figura 8: Fotos del separador de agua, la válvula de presión y el condensador a la salida del absorbedor

CONCLUSIONES

Este es el primer prototipo de concentrador lineal Fresnel construido por el grupo. A través de este trabajo se adquirió una importante experiencia sobre diseño y técnicas constructivos en general. El diseño geométrico, tanto de la distribución espacial de los espejos como de sus curvaturas, resultó adecuado. La técnica desarrollada para la deformación y anclaje de los espejos permitió un buen control de la concentración de radiación a distintas distancias del absorbedor. También se generó conocimiento y experiencia en diseño, construcción y funcionamiento del absorbedor, la distribución de agua y la respuesta del sistema produciendo vapor a distintas presiones.

En cuanto a la eficiencia del prototipo, se observa que tiene una importante influencia el hecho de que parte de la radiación reflejada en los espejos cae fuera del absorbedor, en el sentido longitudinal. Esto se debe a que la configuración de los espejos de eje horizontal genera que la zona iluminada por la reflexión varíe durante el día produciéndose un desplazamiento en la dirección del eje del absorbedor. La influencia de este fenómeno en la eficiencia es menor en sistemas de mayor envergadura en los cuales es mayor la longitud de los concentradores. Otras características del equipo también definen su eficiencia pero son difíciles de modificar sensiblemente, como el comportamiento de los materiales frente a la radiación solar. Tal es el caso de la reflectancia de los espejos, la transmitancia de la cubierta del absorbedor, la reflectancia del concentrador secundario y la absorptancia de los tubos.

La construcción del prototipo no presentó mayores dificultades. Los materiales usados se adquirieron en el medio con buena disponibilidad. La mano de obra utilizada no requirió una especialización importante. La experiencia adquirida, en un marco de crisis energética y de perspectivas de desarrollo de la generación de potencia mediante energía solar térmica, hacen que se esté en condiciones de trabajar con equipos en escalas superiores.

REFERENCIAS

- Cabri II Plus PC, version 1.2.5. Copyright Cabrilog, 2002, 2003.
- Häberle A., Zahler C., de Lalaing J., Ven J., Sureda J., Graf W., Lerchenmüller H., Wittwer V. (2001) The Solarmundo Project. Advanced Technology for Solar Thermal Power Generation. Solar World Congress, International Solar Energy Society Conference, Adelaide, Australia.
- Mills D., Morrison G., (2000). Compact Linear Fresnel Reflector Solar Thermal Power Plants. Solar Energy Vol. 68, No.3, pp. 263 - 283.
- Mills D. (2004). Advances in Solar Thermal Electricity Technology. Solar Energy Vol. 76, pp. 19-31.
- Welford W. T. & Winston R. High Collection Nonimaging Optics. Academic Press Inc., USA, 1989.

ABSTRACT

A linear Fresnel reflector prototype of 8 m² for direct steam generation was built. The system has 8 mirrors of horizontal axis and a 4 m of height absorber with secondary concentrator. Geometric studies for the configuration of the system, the mirrors curvature and the absorber design were made. A method of mirrors subjection that allows to generate the curvature adapted for each reflector was developed. Tests for the determination of the produced thermal energy were made. The work allowed to acquire an important experience and generate the bases for the development of systems in superior scales.

Keywords: thermal solar energy, linear Fresnel reflector, steam generation