

DISEÑO Y ESTADO DE AVANCE DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR FRESNEL LINEAL DE 270 m²

M. Gea, L. Saravia, C. Placco, M. Altamirano, M. Hongn, C. Fernández, R. Caso, F. Tilca, H. Bárcena, H. Suligoy
Instituto de Investigación en Energía No Convencional (INENCO - CONICET)
Universidad Nacional de Salta – Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta
Tel - Fax 0387-4255489 e-mail: marcelogea@gmail.com

Recibido: 13/08/12; Aceptado: 05/10/12

RESUMEN: Se describen en este artículo el diseño y el estado de avance de la construcción de un concentrador Fresnel lineal en el marco de un proyecto que tiene como objetivo el desarrollo completo de un módulo que podrá ser directamente transferido al medio para la producción de energía eléctrica o de vapor para aplicaciones industriales. Este proyecto está localizado en el municipio de San Carlos en el Valle de Cafayate, provincia de Salta. Se realizó el diseño geométrico del equipo y se dimensionaron sus componentes. Se completaron las actividades de preparación del terreno, colocación de las bases e instalación de la estructura del absorbedor, construcción de 86,4 m² de concentradores, construcción de los componentes mecánicos y del sistema automático de seguimiento.

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

INTRODUCCION

Los concentradores Fresnel lineal (CFL) están constituidos básicamente por un conjunto de reflectores que concentran la radiación solar en absorbedores elevados. El agua que fluye por los absorbedores se convierte en vapor. Este sistema presenta las siguientes ventajas: se basa en una tecnología sencilla en la que puede utilizarse ingeniería y materiales locales en países poco industrializados; utiliza espejos planos con una pequeña curvatura que se obtiene al pegar el vidrio al bastidor; la rotación de los espejos para el seguimiento al sol utiliza un sólo eje; los conductos del fluido de trabajo no se mueven ya que el absorbedor está fijo; tiene buena eficiencia en latitudes bajas y en horas próximas al mediodía; permite un buen aprovechamiento del área del terreno. La desventaja principal es que su entrada al mercado es reciente y no existe gran experiencia en el campo comercial.

En el INENCO se está estudiando desde hace unos años la tecnología CFL. En 2007 se construyó un prototipo de 8 m² para la generación directa de vapor de agua (figura 1a) que permitió adquirir una importante experiencia y generar las bases para el desarrollo de sistemas de tamaños superiores (Gea et ál., 2007). Durante 2008 se construyó y ensayó un prototipo de 24 m² de espejos (figura 1b), (Saravia et ál., 2008) y en 2009 se construyó un equipo de 43 m² (figura 1c) que se ensayó hasta 2011 (Gea et ál., 2010).

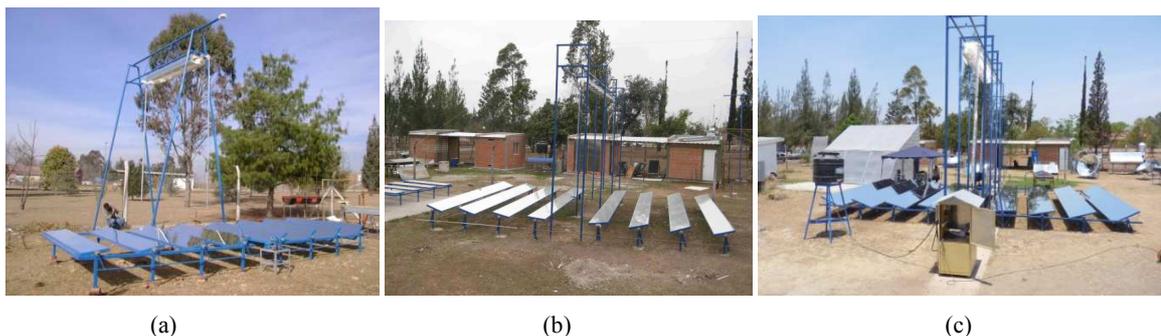


Figura 1: Prototipos de concentradores Fresnel lineal construidos de 8 m² (a), 24 m² (b) y 43 m² (c)

En estas etapas se aprendieron técnicas específicas para la construcción de los distintos componentes que forman el sistema: diseño y construcción del absorbedor, estructura metálica básica, deformación controlada de los espejos para concentrar la radiación, determinación de la inclinación de los concentradores, instalación de motores y reductores del movimiento de los espejos, realización de ensayos de generación de vapor. Se validaron experimentalmente los modelos desarrollados para el movimiento de cada espejo y para los cálculos de estimación de la radiación directa captada por el campo de concentradores. También la construcción de estos equipos permitió la determinación de los costos involucrados en el sistema.

Actualmente se está construyendo un CFL de 270 m² dentro de un proyecto destinado a desarrollar por completo un módulo que pueda ser directamente transferido para la generación de energía eléctrica o producción de vapor. La longitud de las filas

de espejos será de 30 metros. Los sistemas mecánicos y electrónicos que realizarán el movimiento de estos colectores, así como el sistema de cañerías y válvulas que se utilizarán corresponden a una escala industrial.

La zona elegida para el emplazamiento del proyecto es la localidad de San Carlos, en el Valle de Cafayate (Figura 2). En este valle, San Carlos es el lugar de mejor radiación y menor precipitación pluvial (110 mm anuales). Su altura está cercana a los 1700 m s.n.m., y sus coordenadas geográficas son: latitud = -25,75°; longitud = -66,08°. Al lugar se puede acceder fácilmente mediante una carretera asfaltada, encontrándose a 180 km de la ciudad de Salta. Por la localización pasa la ruta 40 y paralela a ésta corre la línea de media tensión de 33 kV del sistema interconectado nacional.

El terreno utilizado pertenece a un productor local quien está interesado en el posible uso del CFL para el secado de pimentón y la extracción de esencias, trabajando en cogeneración con la producción de electricidad.

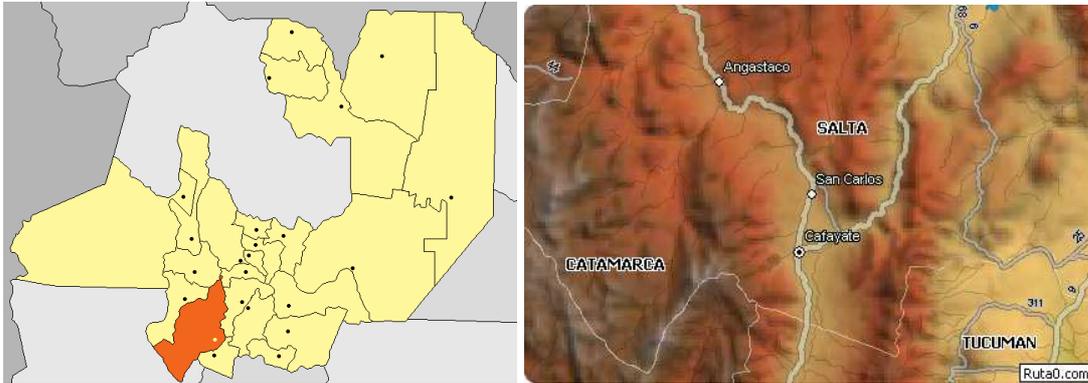


Figura 2: Ubicación de San Carlos en la provincia de Salta

DISEÑO GEOMETRICO DE UN CFL DE 270 m²

Área de espejos

Para el diseño geométrico de un sistema Fresnel lineal es necesario definir cuál es la potencia térmica que se desea generar y cuál será la temperatura de trabajo del vapor. La potencia térmica es proporcional al área total de los espejos y la temperatura máxima de trabajo vendrá dada por la razón de concentración del sistema.

En el caso del nuevo equipo, el área de espejos es de 270 m² y está constituida por 10 líneas de espejos de 30 m de largo y 0,9 m de ancho cada una (figura 3). Considerando la radiación del lugar y la eficiencia del sistema, esta área permite una producción de hasta 160 kW térmicos que se pueden utilizar para una generación eléctrica de hasta 50 kW teniendo en cuenta que la eficiencia de la transformación es 0,30 aproximadamente.

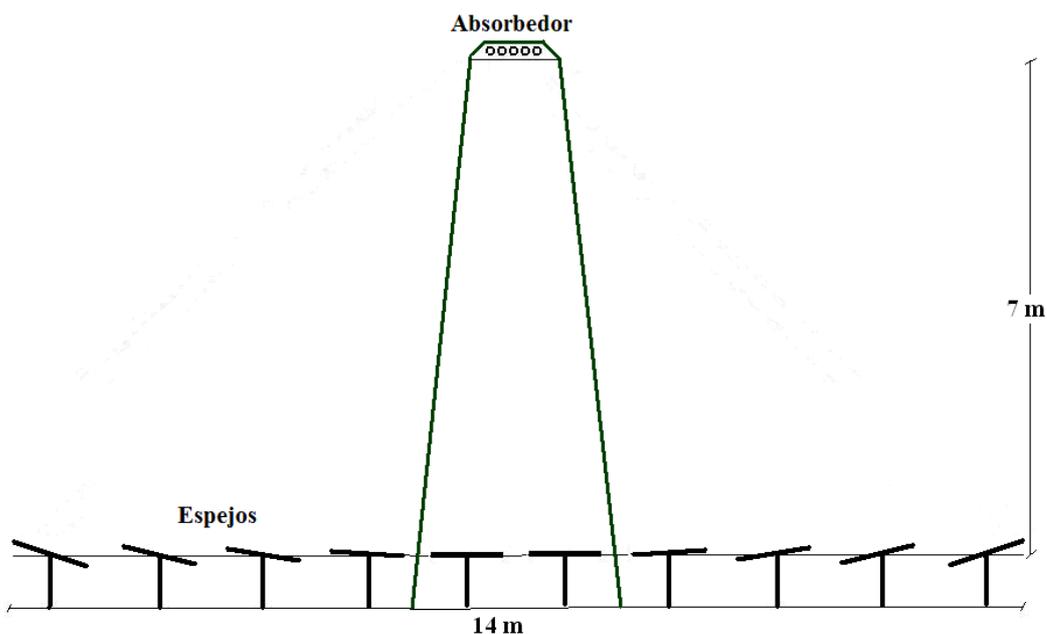


Figura 3: Esquema general del equipo.

Para definir la configuración del sistema es necesario considerar la separación entre espejos de forma tal que no se generen sombras entre ellos. La situación más desfavorable ocurre cuando las inclinaciones son grandes, en correspondencia con las posiciones del sol más alejadas del mediodía solar. A partir del modelo geométrico elaborado que permite calcular la inclinación de los espejos para cualquier instante se determinaron las separaciones mínimas entre las filas que garantizan 8 horas diarias de aprovechamiento completo del área de colección. Con este diseño, sólo entre el 20 de marzo y el 20 de setiembre los espejos extremos se obstaculizarán parcialmente entre sí durante las primeras y últimas horas del día. Con estas consideraciones el ancho del campo de espejos resultó de 14 m.

Razón de concentración

Para el diseño del equipo se consideró una temperatura de trabajo de aproximadamente 270 °C. Teniendo en cuenta que la eficiencias de colectores concentradores oscila entre 40 % y 60 %, para alcanzar esta temperatura es necesaria una razón de concentración mínima $C = 30$ (Duffie y Beckman, 2006).

Los espejos con los que se construirán los concentradores son de 3 mm de espesor y éstos se venden en unidades de 1,8 m x 2,5 m. Para aprovechar el corte y para obtener dimensiones manejables con sencillez, se definió que las líneas de espejos tuvieran un ancho de 0,90 m. El sistema de espejos constituido por 10 filas (figura 3) genera un área por unidad de longitud de $0,9 \text{ m}^2 \times 10 = 9 \text{ m}^2$. El absorbedor del equipo tendrá un área de $0,24 \text{ m}^2$ por metro de largo. Por lo tanto la razón de concentración del sistema será de $9 \text{ m}^2 / 0,24 \text{ m}^2 = 35$.

Altura del absorbedor

La altura del absorbedor influye en la eficiencia óptica (relación entre la radiación que llega al absorbedor y la incidente sobre los espejos) y en el costo del equipo. Mientras mayor es la altura a la que se instala el absorbedor, menores son los ángulos de incidencia de la radiación sobre los espejos (i) y sobre el plano del absorbedor (i') durante el movimiento aparente del sol y, por lo tanto, mayor es la eficiencia óptica (figura 4). A la vez, mientras mayor es la altura, mayores son los costos constructivos.

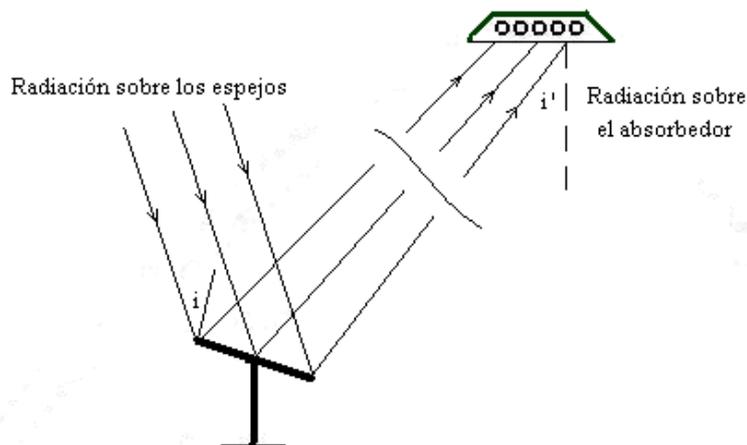


Figura 4: Esquema de los ángulos de incidencia sobre un espejo y sobre el absorbedor

Para estudiar como varía la eficiencia óptica se calculó la radiación reflejada en cada espejo y la radiación incidente en el absorbedor durante el día, para todo el año, para distintas alturas del sistema. Para ello se utilizó un programa de simulación del CFL que permite determinar la inclinación instantánea de los espejos y la energía recibida por el sistema utilizando ecuaciones de geometría solar y el modelo de atenuación atmosférica de la radiación de Hottel (Gea et al., 2010). Los datos de entrada son la configuración geométrica del sistema, las coordenadas del lugar la altura sobre el nivel del mar y el día del año. Se tuvo en cuenta que la reflectividad de los espejos depende del ángulo de incidencia de los rayos solares y se utilizaron las correlaciones obtenidas experimentalmente en estudios previos para distintos tipos de espejos (Hongn et ál., 2011).

Se presentan en la figura 5 los resultados de los cálculos para el caso de espejos comunes de 3 mm, que son los que se están instalando en el equipo de 270 m^2 . Se calculó la energía anual por m^2 que recibe el absorbedor, reflejada por cada espejo, en sus distintas alturas posibles. Los espejos alejados del eje del sistema, hacia la dirección Este de la configuración (espejos 1 y 2), durante las primeras horas de la mañana, reciben la radiación solar con altos ángulos de incidencia. Lo mismo ocurre hacia la dirección oeste (espejos 9 y 10), durante las últimas horas de la tarde. En estos casos, la proyección del área de colección en la dirección normal a la radiación es la menor, en coincidencia con los menores valores de reflectancia. Se analizó que en estas horas, durante los meses de mayo, junio y julio, los valores del ángulo de incidencia superan los 60° en los espejos mencionados.

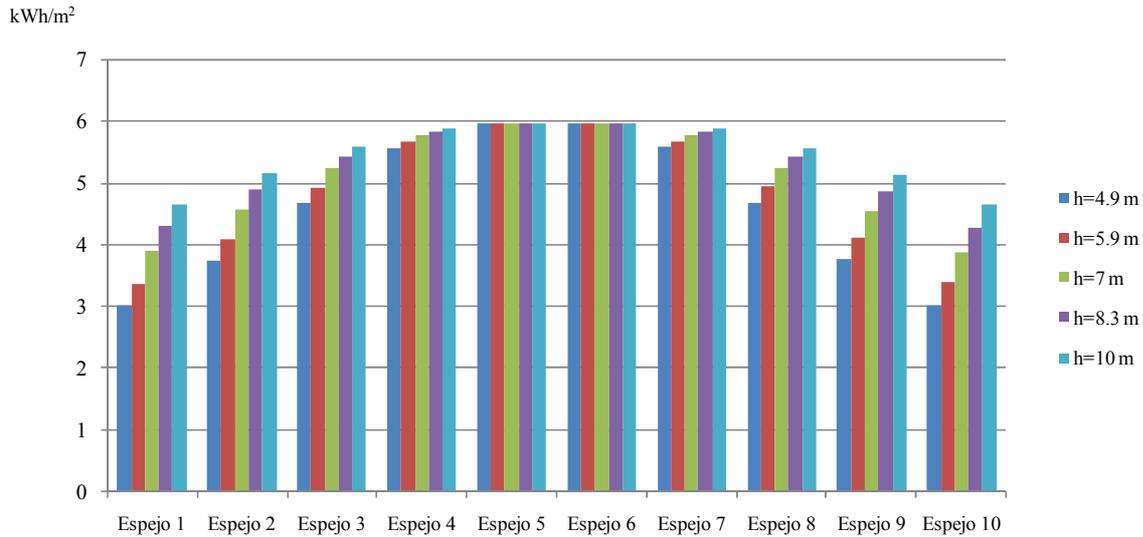


Figura 5: Radiación media anual sobre el absorbedor por m² de colector para distintas alturas (h) del equipo

También se determinó la energía media diaria anual por m² de espejos que llega al absorbedor. Se promedió la energía correspondiente a los días representativos de cada mes y se analizó este valor. En la figura 6(a) se observa que la energía se va incrementando a medida que se aumenta la altura del absorbedor.

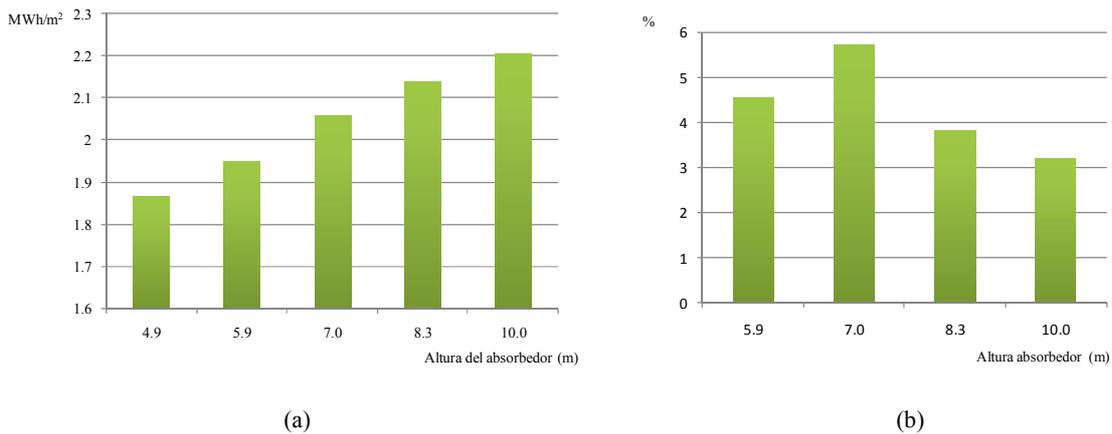


Figura 6: Variación de la energía promedio y su incremento porcentual con la altura del absorbedor

Se calculó el valor del incremento relativo porcentual de la energía que llega al absorbedor a medida que se aumenta su altura (figura 6(b)). Se observa que este incremento crece hasta la altura de 7 m y luego comienza a disminuir. Esto indica que para este valor de altura existe un punto de inflexión en el crecimiento de la energía captada en función de la altura del absorbedor. En este caso, los ángulos de incidencia de la radiación solar sobre el absorbedor son siempre menores de 45°. Si bien la energía captada sigue aumentando para otras alturas, se eligió el valor de 7 m para el absorbedor del nuevo CFL teniendo en cuenta las dificultades constructivas y la inestabilidad estructural que se pueden generar cuando las alturas son muy grandes.

PRIMERA ETAPA DEL PROYECTO

La construcción de este equipo es parte de un proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación, a través del Consejo Federal de Ciencia y Tecnología (COFECyT). Actualmente se está cumpliendo con la primera etapa en correspondencia con el primer desembolso, en la se construirá un CFL con un área de colección de 86,4 m² formada por 8 filas de espejos de 12 m de largo. El esquema se presenta en la figura 7. En este equipo se podrán realizar ensayos de funcionamiento y puesta a punto mientras se reciben los fondos de las etapas posteriores.

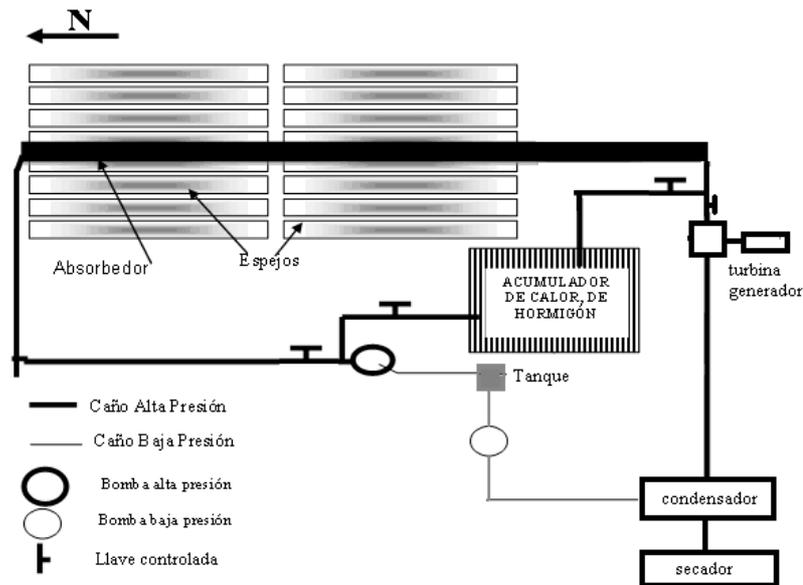


Figura 7: Esquema del equipo de 86,4 m² que se construye en la primera etapa

El absorbedor se diseñó con caños de alta presión (40 kg/cm²) para soportar la presión del vapor de agua a temperaturas en el orden de los 270 °C. Se colocó el aislamiento requerido para minimizar las pérdidas de calor, utilizando cerámica específica para altas temperaturas. Por abajo se colocará un plástico con protección UV, formando una cavidad triangular que permite lograr una estabilidad del aire contenido (figura 3). Esto disminuye las pérdidas de convección usando el hecho de que los caños, que son los más calientes, están en la parte superior. A medida que pasa el año, los rayos solares se van inclinando de manera que la zona iluminada por los espejos se corre hacia el sur unos 7 m entre el verano y el invierno. Por esa razón el absorbedor sobresale hacia lado sur, sin espejos por debajo.

El circuito de agua consta de un tanque con el agua tratada, una bomba de alta presión que toma el fluido del tanque y lo introduce en los caños del absorbedor para su calentamiento y producción del vapor. Éste sale por el otro extremo del absorbedor, pasa por un separador de gotas y llega a la turbina para producir energía eléctrica. El vapor a baja presión que sale de la turbina tiene una temperatura apta para ser utilizado en el tratamiento de productos agrícolas, como ser el secado de pimiento. Allí se condensa al entregar calor en un intercambiador y luego regresa al tanque de agua. Si la presión se encuentra por debajo de la atmosférica se utiliza una bomba adicional de baja presión.

Si se necesita acumular calor para la noche, parte del vapor pasa al acumulador. Éste está construido por caños por los cuales circula el vapor, insertos en una masa de hormigón (Gea et al., 2009). A medida que el fluido entrega su calor, condensa por lo que vuelve al tanque como agua líquida. El hormigón puede ser calentado sin problemas a alta temperatura.

El vapor puede usarse directamente en diferentes procesos industriales. Se ha planeado realizar ensayos en la finca con la extracción de aceites esenciales de pimentón, para lo cual es necesario calentar el pimentón a temperaturas un poco mayor que los 100°C.

ESTADO DE AVANCE DE LA CONSTRUCCIÓN

Las actividades que se han llevado a cabo hasta el presente son las siguientes:

- 1.- Puesta a punto el diseño del equipo a instalar basado en trabajos ya realizados durante la ejecución de proyectos anteriores.
- 2.- Preparación de la infraestructura necesaria para la instalación de los equipos, que comprende: preparación del terreno disponible; implantación de las bases para la colocación de los absorbedores; provisión de agua y luz eléctrica para el sistema; instalación una casa auxiliar con capacidad para 6 personas como apoyo para la construcción.
- 3.- Construcción en talleres de Salta de los componentes: colectores, sistemas de transmisión de movimiento, estructuras de soporte, absorbedor, etc.
- 4.- Preparación de la electrónica de control del seguimiento de los rayos solares y del manejo de las distintas válvulas que controlan el funcionamiento de la planta desde una consola computacional central.
- 5.- Transporte a San Carlos y construcción de la estructura del absorbedor en el lugar previsto.

Construcción de los concentradores

La estructura metálica de los concentradores, que se muestra en la figura 8, debe ser capaz de soportar las solicitaciones que reciben los espejos manteniendo plano el bastidor que los soporta. Para eso se calculó una estructura reticular de sección triangular con el momento de inercia verificado para deformaciones mínimas por flexión y torsión. Cada unidad mide 6 m de largo.



Figura 8: Vistas de la estructura de los concentradores

Los espejos se curvan ligeramente para producir la concentración de los rayos en el absorbedor. Mediante un soft de geometría se estimaron las deflexiones necesarias para tal efecto. Por detrás del colector se colocó una chapa ondulada de cierre de la estructura con la fortaleza necesaria para soportar granizo. En de que exista esta posibilidad, el sistema gira de manera que las chapas miren hacia arriba. Esta chapa también ayuda a dar rigidez a toda la estructura

El movimiento de los espejos

Los espejos deben moverse girando alrededor de un eje horizontal para seguir el movimiento del sol. A estos efectos se coloca un sistema de propulsión por cada fila de espejos por lo que se necesitan 8 motores con sus correspondientes circuitos electrónicos de control.

Se usan motores “paso a paso” y cajas reductoras de velocidad de un factor igual a 100. Con ello se logra obtener un movimiento lento de precisión ya que la rotación solar es baja: 15° por hora de valor medio.

En la figura 9 se muestra la pieza que vincula y sirve de apoyo a los concentradores de 6 m (a) y el conjunto motor-reductor instalado en un banco de prueba (b).



(a)

(b)

Figura 9: Vista del rodamiento que se coloca entre concentradores (a) y del par motor – reductor (b)

Se ha preparado un circuito electrónico intermedio para cada motor conectado a un control central donde una computadora ordena el movimiento de cada uno de los espejos por separado. El circuito está instalado en una caja hermética que contiene una computadora de pequeño tamaño, una fuente de 5 voltios y los componentes necesarios para conectarse al motor y recibir órdenes de la computadora central. El soft usado en el banco de pruebas utiliza las ecuaciones matemáticas que describen el movimiento solar, determinando de esta forma la posición del sol en cada momento. Además, controla el manejo de válvulas con accionamiento eléctrico a distancia.

Construcción de la estructura del absorbedor

En la finca donde se construye el equipo existe una instalación de colectores solares planos calentadores de aire de un secador industrial. El CFL se ubicó cercano a este equipo ante la posibilidad de utilizar el vapor saliente para suplementar el calentamiento de los secadores solares. Se realizó una preparación del terreno mediante limpieza y nivelación como se ilustra en la foto de la figura 10.

Luego de la localización del equipo en el lugar y la preparación del terreno, se construyeron las fundaciones para la estructura del absorbedor (figura 11a). Esta estructura está constituida por 10 pórticos de 8 m de altura colocados cada 2 m. La ubicación precisa de las bases se logró mediante el uso de rectángulos metálicos construidos para este fin (figura 11b).



Figura 10: Vista del terreno donde se construye el CFL



(a)



(b)

Figura 11: Construcción de las bases de la estructura del absorbedor

Los pórticos, constituidos por caños estructurales, se llevaron desarmados y fueron soldados in situ. Una vez allí se abulonaron a las bases y se levantan con cuerdas. Para la colocación del primer pórtico se utilizó una estructura auxiliar. La figura 12 muestra los 10 pórticos instalados que permitirán colgar un absorbedor de 18 m de largo. Esta estructura será reforzada mediante tensores para aumentar la rigidez frente a la acción del viento.



Figura 12: Colocación de los pórticos de la estructura del absorbedor

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se está construyendo un CFL dentro de un proyecto destinado a desarrollar por completo un módulo que podrá ser directamente transferido al medio para la producción de energía eléctrica o de vapor para aplicaciones industriales. El equipo está localizado en un lugar de condiciones óptimas, tanto por el recurso solar como por la infraestructura existente. Su transferencia puede generar un importante impacto tanto en la actividad agrícola de la región de los Valles Calchaquíes como en la actividad minera de la región de la Puna.

Se realizó el diseño geométrico del equipo mediante el cual se definió una configuración formada por 10 filas de espejos de 30 m de longitud y 0,90 m de ancho, lo que constituye un campo de colección de 270 m². Se realizó un análisis de eficiencia óptica para la determinación una la altura del absorbedor. Se comprobó que la razón de concentración resultante permite alcanzar la temperatura de vapor de 270 C adecuada para la producción de potencia eléctrica.

Se está llevando adelante la primera parte del proyecto consistente en la construcción de un equipo con un área de colección de 86,4 m² formada por 8 filas de espejos de 12 m de largo, con el que se podrán realizar los primeros ensayos de generación de vapor. Se completaron las actividades de preparación del terreno, colocación de las bases e instalación de la estructura del absorbedor de 8 m de altura y 18 m de largo, construcción de 24 concentradores de 6 m de largo, construcción de los sistemas mecánicos de movimiento y sistema automático de seguimiento solar.

Los trabajos planteados para el futuro inmediato para completar la primera etapa son la instalación del absorbedor, del circuito de agua – vapor y del campo de espejos. Posteriormente se realizará la instalación de los motores y del sistema electrónico de control. Luego se realizará la campaña de ensayos de generación de vapor.

En las etapas posteriores está planteado completar el campo de espejos hasta un área de 270 m², y la construcción del acumulador y los intercambiadores de calor. Entonces estarán generadas las condiciones para la producción de vapor en una escala mayor, que permitirá la provisión de calor para el secadero y la realización de los ensayos de producción de potencia eléctrica.

REFERENCIAS

- Duffie J. A. y Beckman W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3ª edición. Wiley Interscience, New York.
- Gea M., Saravia L., Fernández C., Caso R. y Echazú R. (2007). Concentrador lineal Fresnel para la generación directa de vapor de agua. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol 11. (pág. 03.83 – 03.89)
- Gea M., Tilca F., Placco C., Caso R., Machaca A. y Saravia L. (2009). Acumulación Térmica en Hormigón de la Energía Solar Captada por un Concentrador tipo Fresnel Lineal para Generación de Vapor. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 13 (pág. 03.113 – 03.119).
- Gea M., Saravia L., Altamirano M., Placco C., Bárcena H. y Hongn M. (2010). Aspectos Ópticos y Geométricos de un Concentrador Fresnel Lineal para Aplicaciones Térmicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 14 (pág. 03.215 – 03.222)
- Hongn M., Flores Larsen S., Altamirano M., Gea M., Saravia L. (2011) Estudio de reflectancia de espejos para un concentrados solar Fresnel Lineal. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 15 (pág. 08.191 – 08.197)
- Saravia L., Gea M., Fernández C., Caso R., Hoyos D. y Salvo N. (2008) Diseño y construcción de un concentrador lineal Fresnel de 24 m² de área. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 12. (pág. 03.119 – 03.124)

ABSTRACT: This article describes the design and progress of the construction of a linear Fresnel concentrator in order to develop a module which can be directly transferred to the medium for electricity production or steam for industrial applications. The project takes place in San Carlos, Valle de Cafayate, Salta province. The geometric design of the equipment were performed. Some activities like land preparation, foundation and absorber structure installation, construction of 86.4 m² of concentrators, mechanical components and automatic tracking constructions, were completed.

Key words: linear Fresnel concentrator, steam generation, solar energy