

## **PUESTA A PUNTO Y SIMULACION DEL CONCENTRADOR FRESNEL LINEAL DE 86 M<sup>2</sup> INSTALADO EN SAN CARLOS, SALTA**

Altamirano M. <sup>(1,3)</sup>, Hongn M. <sup>(2,3)\*</sup>, Fernández C. <sup>(3)</sup>, Bárcena H. <sup>(3)</sup>, Hoyos D. <sup>(2)</sup>, Saravia L. <sup>(2,3)\*\*</sup>, Flores Larsen S. <sup>(2,3)\*\*\*</sup>, Gea M. <sup>(2)</sup>, Placco C. <sup>(2)</sup>, Suligoy H. <sup>(2)</sup>.

<sup>(1)</sup>INTI-centro Salta. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Av. Durañona 822. Salta CP 4400.

<sup>(2)</sup>INENCO. Instituto de investigación en Energías no convencionales. Av. Bolivia 5151. Salta CP 4400.

<sup>(3)</sup>UNSA. Universidad Nacional de Salta. Av. Bolivia 5150. Salta CP 4400.

[maltamirano@inti.gob.ar](mailto:maltamirano@inti.gob.ar)

**RESUMEN:** En este trabajo se muestra la puesta a punto de un Concentrador Lineal tipo Fresnel el cual está siendo instalado en la ciudad de San Carlos (Salta) en el marco del proyecto PFIP 2009 del MINCYT. El prototipo de concentrador fue construido a escala real con un factor de concentración cercano a 40 y un área de colección de 86m<sup>2</sup> correspondientes a dos módulos instalados en serie. El ensayo preliminar permitió corroborar el correcto desempeño de las partes que forman el sistema completo. Mediante el software SIMUSOL se simuló el comportamiento térmico del equipo en condiciones normales de funcionamiento. Este programa es una herramienta útil para simulación de sistemas térmicos y predice correctamente el comportamiento de este equipo.

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

### **INTRODUCCIÓN**

En este trabajo se presentan los primeros resultados correspondientes a la puesta a punto de la primera etapa del proyecto PFIP 2009 (Proyectos Federales de Innovación Productiva). Esta primera etapa corresponde a la instalación de dos módulos de 43m<sup>2</sup> cada uno. Se muestran también las simulaciones térmicas que se realizaron para determinar el comportamiento del fluido de trabajo en el prototipo de concentrador lineal Fresnel que está siendo instalado en la Ciudad de San Carlos, provincia de Salta. El proyecto PFIP fue presentado con el objetivo de construir dos prototipos a escala real uno de 86 m<sup>2</sup> situado sobre los 4000 m.s.n.m. en las instalaciones de la empresa Minera del Altiplano y otro de 270 m<sup>2</sup> situado en el predio de un productor de pimientón. Estos prototipos están formados por módulos individuales de 43 m<sup>2</sup> de área de colección con un factor de concentración cercano a 40. Estos equipos están pensados para ser acoplados en serie o en paralelo según sus requerimientos y pueden usarse para producción de vapor en usos industriales o generación de electricidad. En este trabajo se muestran las simulaciones numéricas del funcionamiento térmico de un equipo de 86 m<sup>2</sup> que corresponde a los dos módulos, de 8 filas de espejos cada uno, que están instalados en la primera etapa del proyecto (figura 1).

El equipo instalado posee un absorbedor lineal de 18 m de longitud, cuando la distancia longitudinal de las filas de espejos es de 12 m. Se procuró la instalación de un absorbedor más largo (6 m extendido en el sentido sur) ya que, para los meses fuera de la temporada de verano, el ángulo cenital solar alcanza valores relativamente mayores a lo largo de su trayectoria por la bóveda celeste. Esto provoca un desplazamiento de los rayos reflejados, algunos metros (esto es variable con la hora y el día) en sentido sur.

El absorbedor cuenta con 5 tubos recubiertos por pintura negra de alta temperatura cuya absorptancia es de 0,93 y se encuentra suspendido a 8 m, aproximadamente, sobre el nivel del suelo. Estos caños reciben la radiación reflejada por el conjunto de 8 filas de espejos. Los reflectores se encuentran a 0,8 m sobre el suelo, son de forma rectangular de 6 m de largo y 0,9 m de ancho y están constituidos por espejos de 3 mm de espesor curvados ligeramente de forma mecánica de tal manera que la radiación que reciben es reflejada y concentrada en un ancho de 0,2 m sobre el absorbedor. Los espejos rotan longitudinalmente durante el día con una frecuencia de giro variable de manera tal que siempre reflejen la radiación directa sobre el absorbedor. Por el interior de sus tubos circula agua que, dependiendo de las condiciones de trabajo, puede cambiar su fase o circular a sobrepresión manteniendo su estado líquido.

En este trabajo además de mostrar el funcionamiento del prototipo del un Concentrador Fresnel Lineal mediante ensayos preliminares, se propone también simular el comportamiento térmico del mismo en estado no estacionario mediante el programa SIMUSOL, considerando condiciones normales de funcionamiento. Por otro lado, estos ensayos permitieron registrar y monitorear las primeras medidas de temperatura y presión a la entrada y salida de los caños, y se corroboró con éxito el correcto funcionamiento de las partes del equipo, como ser el movimiento automatizado del campo de reflectores, el variador de caudal de la bomba, el sistema de cañerías sin pérdidas ni deformaciones, el funcionamiento de la tecnología inalámbrica para el sistema de control, entre otros aspectos.



Figura 1: Imagen fotográfica de la primera etapa instalada del proyecto PFIP 2009.

## INSTALACION

Los bastidores para los espejos, absorbedor, y soportes fueron construidos por la empresa INTI-AR en la ciudad de Salta y transportados al lugar de instalación. La construcción del sistema, acorde a la primera etapa, se llevo a cabo en cinco sub-etapas. La misma empresa brindó apoyo técnico durante la instalación.

Emplazamientos: Las bases se construyeron con zapatas de hormigón, para su correcta alineación se construyó una plantilla que encuadra 8 bases a la vez, lo que asegura que los soportes queden correctamente emplazados. (Gea et al., 2012).

Montaje del absorbedor: una vez listas las bases, se montaron los arcos y se colgó el absorbedor sin los caños mediante un sistema de polea. A posterior se montaron los caños sobre caballetes para ser soldados en el lugar. Cuando los caños se encontraban soldados y pintados con pintura de alta temperatura se procedió a bajar el absorbedor sobre los mismos para ser abulonados y, finalmente, se eleva el absorbedor completo hasta su posición final a 7,8 m del piso.

Montaje de los espejos: Los bastidores de los espejos se montaron sobre rulemánes a 0.8 m sobre el suelo, donde los reflectores son adheridos mediante silicona a la estructura y asegurados con ángulos metálicos en toda la longitud del mismo. Luego de fijar los mismos son levemente curvados de manera mecánica. Finalmente se logra una correcta alineación controlando la imagen que proyecta cada uno sobre el absorbedor.

Sistema de agua: Para el sistema de circulación se uso caños Schedule 40 de una pulgada, los mismos que se usan en el absorbedor. El sistema de agua emplea una bomba de pistones con un variador de velocidad programable. El caudalímetro se montó antes de la bomba y se instalaron sensores de temperatura, tanto en la entrada como en la salida. En la salida se monto, además, una válvula que permite regular la presión del sistema.

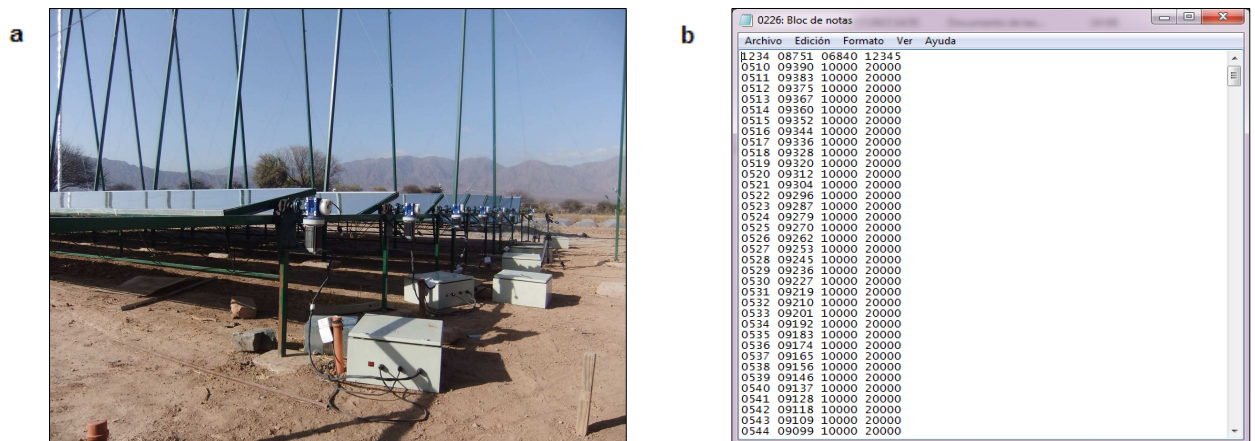


Figura 2: a) Vista de los reflectores con su correspondiente motor y sistema de control, ambos individuales. En b) se muestra el formato de la tabla de movimiento que interpreta el microcontrolador.

Sistema de movimiento: Para el sistema de movimiento de los espejos se utilizan motores paso a paso con una reducción de 1/100, donde cada fila de espejos tiene acoplado un motor y un sistema de control comandados por un microcontrolador. El mismo proporciona al motor una frecuencia de giro variable cada intervalos de un minuto. Esto se logra con la implementación de tablas que contienen básicamente: la frecuencia de giro variable para las 10 hs de funcionamiento del sistema, y las posiciones a las que debe llegar el espejo al amanecer del día para comenzar el seguimiento y al finalizar el

mismo para alcanzar la posición de reposo (“mirando al suelo”). Cada espejo tiene asignada una tabla de datos por día, de manera tal que el movimiento es automático durante el paso de los mismos. La figura 2a corresponde a una imagen fotográfica tomada en dirección suroeste hacia noreste, donde pueden observarse las filas de espejos con su correspondiente motor y un sistema de control independiente entre ellos contenido en gabinetes IP-64 (para evitar entrada de polvo e infiltraciones de agua). La figura 2b muestra el formato tipo de las tablas que contienen la información de la frecuencia de giro variable (2da columna) y la cantidad de pasos que debe realizar el motor para llegar a su posición de comienzo y su posición de reposo (fila 1, columna 2 y 3 respectivamente).

## ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO

Para esta primera etapa, el concentrador solar funciona bajo un sistema abierto sin recirculación de agua. En este sistema, el agua que ingresa al absorbedor es impulsada por una bomba de pistones con variador de velocidad. Este dispositivo tiene como característica fundamental que mantiene el caudal constante independientemente de la presión que haya en el sistema y puede trabajar con presiones superiores a los 4000 kPa. La presión de trabajo es regulada mediante una válvula que se encuentra a la salida del equipo, como se observa en la figura 3. Una vez que el agua ingresa en el absorbedor, ésta aumentará su temperatura y se producirá la evaporación. La temperatura del cambio de fase dependerá de la presión prefijada al sistema.

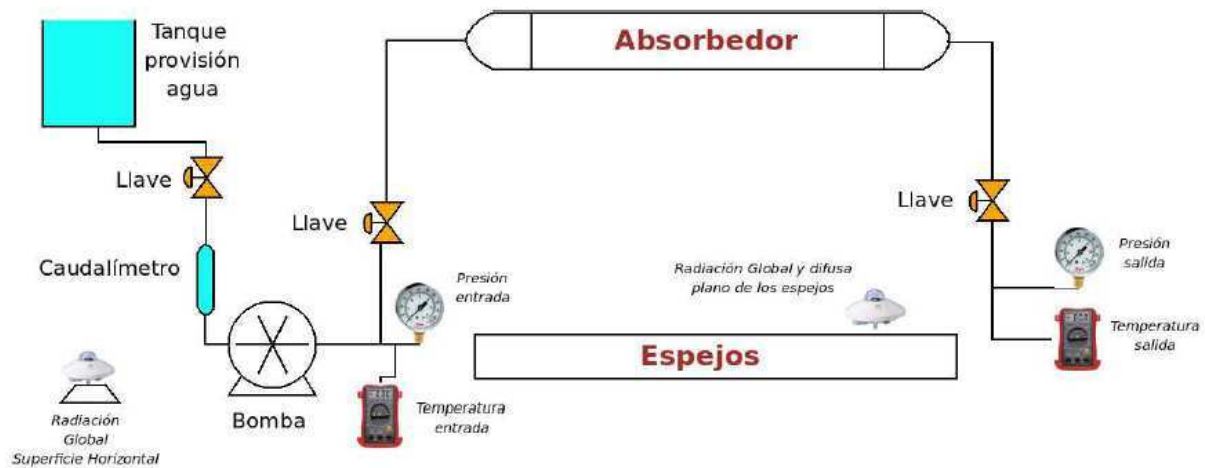


Figura 3: Esquema sencillo de funcionamiento del equipo con producción de vapor en el absorbedor.

La convección con cambio de fase en el absorbedor tiene la ventaja de reducir costos ya que se ahorra el uso de una bomba de recirculación así también como un tanque de presión y varias válvulas. Además la eficiencia térmica del equipo aumenta, ya que frente a la presencia de una mezcla agua-vapor en el absorbedor el coeficiente de transferencia de calor mejora.

Aunque al no tener un tanque de acumulación de agua caliente a presión no tiene inercia térmica que pueda contrarrestar el efecto de la disminución de radiación por el paso de nubes ocasionales, esto constituye una desventaja. Además al presentar cambio de fase en el absorbedor existe la posibilidad que al aumentar la escala del equipo y trabajar con longitudes más grandes pueden aparecer puntos calientes en los tubos debido al vaciamiento de los caños por evaporaciones súbitas.

## PRIMER ENSAYO

El primer ensayo del sistema completo se realizó el día 13 de agosto de 2013. La válvula de salida no fue regulada de manera tal de trabajar a presión atmosférica para asegurar que el sistema no alcance valores elevados de presión durante el tiempo en que no se encontraban los operarios. Los espejos fueron calibrados durante las horas donde el concentrador no realiza el seguimiento, por lo que entre horas 8:00 y 8:15 las 8 filas de espejos realizan un posicionamiento automático hasta la posición de inicio de funcionamiento (inclinación que debe tener cada reflector a las 8:30 hs), a partir de ese momento los motores giran los espejos a una frecuencia variable cada minuto hasta la hora de puesta del sol donde cambian su régimen de movimiento (aumenta su frecuencia de giro) hasta llegar a la posición de reposo, esto puede durar un lapso de 15 minutos aproximadamente. El caudal de circulación de agua fue fijado en 0.02 kg/s y, para este primer ensayo, se trabajó a circuito abierto. Se monitorearon las temperaturas de interés (temperatura a la salida del absorbedor, a la entrada y ambiente). La radiación global medida para este día fue desde 750 W/m<sup>2</sup> cerca del mediodía hasta 500 W/m<sup>2</sup> para las últimas horas de ensayo, cerca de las 17 horas. La temperatura de salida, registrada continuamente, indica que el sistema no alcanza el régimen de trabajo, esto debido a problemas con el variador de caudal de la bomba que luego fueron solucionados, aún así esta temperatura fue de 120°C aproximadamente, por lo que a la salida se obtuvo vapor sobrecalentado a presión atmosférica. Es necesario tomar como medida de seguridad que mientras el absorbedor se encuentra iluminado el fluido debe encontrarse en movimiento dentro de los caños para evitar presiones muy elevadas, y de manera rigurosa evitar la concentración de radiación sobre el absorbedor cuando el sistema se encuentra sin fluido. Cuando el equipo está fuera de funcionamiento es recomendable vaciar el sistema de cañerías para evitar algún problema de congelamiento, sobre todo en invierno.

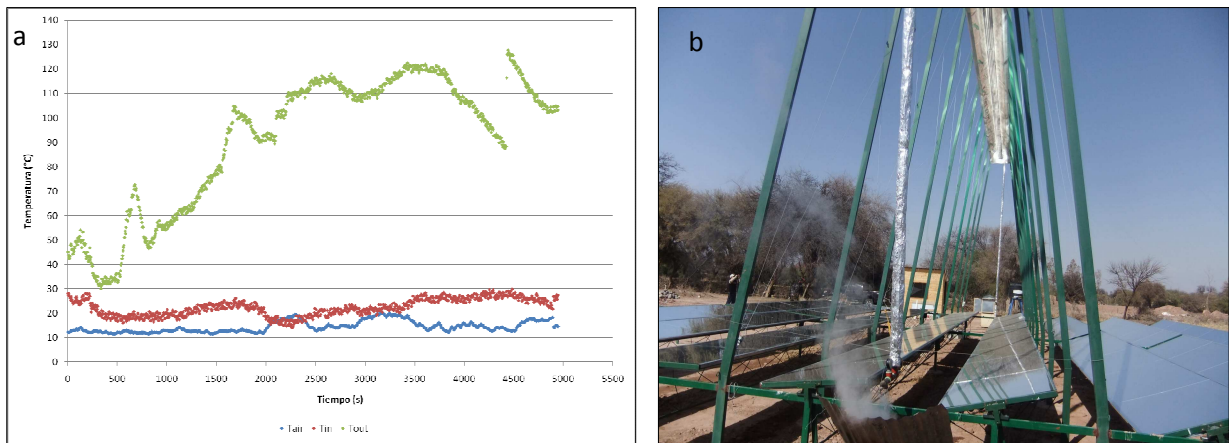


Figura 4: a) Temperaturas registradas durante el ensayo desde horas 14 hasta 15:30 aproximadamente. En b) se observa el equipo en condiciones de funcionamiento, donde a la salida se obtiene vapor sobrecalentado.

De la figura 4a puede observarse la evolución temporal de las temperaturas del agua a la salida (verde), entrada (roja) y ambiente (azul), donde el instante cero representa las horas 14. El ascenso pronunciado de  $T_{out}$  en  $t = 500s$  se debe a la circulación de agua con un caudal aproximado de  $0.02 \text{ kg/s}$ , luego por problemas técnicos el fluido dejó de circular por el sistema y la temperatura medida a la salida disminuye, la pendiente positiva siguiente se debe al reencendido de la bomba aunque con un caudal algo mayor que en el caso anterior (por eso una pendiente positiva pero menor que la anterior), cerca de  $t = 1500s$  se retoma el caudal de  $0.02 \text{ kg/s}$  y desde este instante hay un periodo de intermitencia en el funcionamiento de la bomba. Finalmente a  $t \sim 4500s$  se libera por completo la válvula de salida permitiendo el escape del vapor contenido en el sistema, de aquí el aumento cuasi súbito de temperatura que registra la termocupla. Los inconvenientes de funcionamiento de la bomba fueron solucionados sobre las horas de la tarde, el problema surgía por la incorrecta configuración del variador digital de velocidades propio de la bomba, que se confundía de cierta forma con la regulación de caudal que se realiza mediante una PC a partir del software LabView.

Dentro del ensayo también se han registrado algunas imágenes del tipo termograma mediante una cámara termográfica Fluke Ti55. La cámara puede configurarse para medir en tres rangos de temperatura: entre  $-20$  y  $100^\circ\text{C}$ ,  $-20$  a  $350^\circ\text{C}$  y  $250$  a  $600^\circ\text{C}$ , con una precisión de 2%. Las imágenes termográficas son analizadas mediante el software SmartView provisto por el fabricante. Debido a que la termografía infrarroja es un método no destructivo que permite determinar la distribución superficial de la temperatura del área a analizar resulta de gran interés la implementación de la misma para registrar perfiles de temperatura sobre los caños del absorbedor sobre todo. Un análisis cualitativo de estas imágenes puede mostrar puntos calientes, comportamiento del flujo y distribución del mismo al ser ramificado en los cinco caños, permite determinar la región de cambio de fase, etc. Un estudio cuantitativo puede brindar información de la cantidad de calor que absorbe el agua en su recorrido conociendo la temperatura superficial de los caños, determinar los perfiles de temperatura a lo largo y lo ancho del absorbedor. En la figura 5 se muestran las primeras imágenes tomadas con la cámara termográfica. La ausencia temporal del vidrio, en la parte inferior del absorbedor, permite el registro de los termogramas sobre los caños. En caso de estar presente el vidrio el análisis del comportamiento térmico del absorbedor mediante termografía no sería posible ya que el mismo es opaco a la radiación infrarroja.

Para entender la figura 5 se considera que el absorbedor está dividido en 9 segmentos de 2 metros de largo. Donde el 1er segmento corresponde al tramo donde el fluido se distribuye en los tubos paralelos que componen el absorbedor, es decir que el fluido circula del segmento 1ro al 9no, donde baja hasta el nivel de los espejos donde tiene la boca de salida. Las temperaturas marcadas en cada figura corresponden a los puntos de mayor temperatura de la imagen.

Los termogramas de la figura 5 permiten develar la llegada de mayor radiación sobre uno de los caños del absorbedor en la 2da sección del mismo. No parece corresponder a un flujo estancado o un flujo menor que en el resto de los caños, ya que en el último tramo (figura 5c) el perfil de temperaturas en la dirección transversal de los caños es aproximadamente constante. Los análisis de las imágenes termográficas del absorbedor se dejan para trabajos futuros.

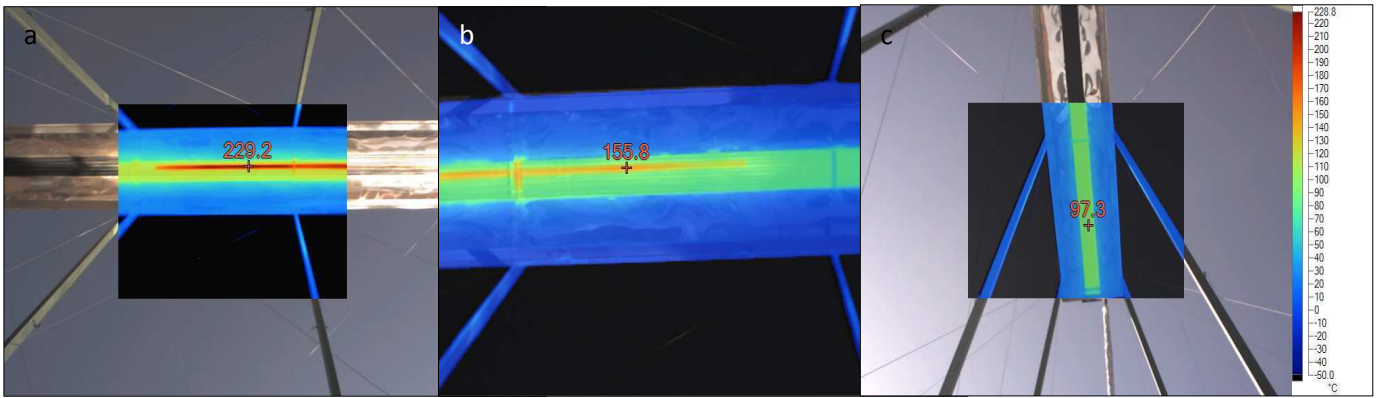


Figura 5: En a) se observa la imagen termográfica de la 2da sección del absorbedor, b) corresponde a la 7ma sección y c) a la 9na, donde el agua finaliza su recorrido por el absorbedor.

## EQUIPO SIMULADO

Para evaluar el funcionamiento del concentrador solar en condiciones normales de trabajo se utilizó el software SIMUSOL. SIMUSOL es un soft para Linux de libre distribución que utiliza la analogía eléctrico-térmica y ha sido ya descrito en trabajos de investigación previos (Alía de Saravia et al., 2003).

El absorbedor está formado por cinco tubos de 18 m de longitud ubicados en paralelo entre sí, pero por simplicidad se considera que el fluido circula por un solo caño de área equivalente. El absorbedor fue dividido en 6 segmentos (cada uno representado por un nodo de temperatura).

Las pérdidas térmicas en el absorbedor se simularon teniendo en cuentas los intercambios conductivos, convectivos y radiativos entre los tubos caloportadores, la cavidad trapezoidal aislante y el ambiente, (Altamirano et al., 2009).

Se fijó una presión de trabajo de 12 kg/cm<sup>2</sup> lo que implica una temperatura de cambio de fase para el fluido de trabajo (agua) de 190 °C. Se fijó el caudal mediante una tabla de temperatura vs caudal de manera tal que maximiza el caudal de vapor extraíble del equipo garantizando una producción de vapor sobre-calentado 40 °C por encima de la temperatura de cambio de fase durante la mayor cantidad de horas posibles.

Para las fuentes másicas que simulan el caudal de recirculación en el absorbedor se tuvo en cuenta la variación del  $c_p$  con la temperatura y la fase del fluido que corresponda (líquido o vapor), para el caso que la temperatura fuese la de cambio de fase se tuvo en cuenta un  $c_p$  ponderado de la mezcla agua-vapor considerando la fracción de vapor.

### Hipótesis de trabajo

Las hipótesis consideradas para el desarrollo del circuito térmico de SIMUSOL son:

- Las propiedades térmicas de los materiales involucrados (conductividad térmica, densidad y viscosidad) son constantes a excepción de la capacidad calorífica del agua a presión constante ( $c_p$ ) que fue ingresada por tabla.
- La temperatura ambiente se mantiene constante a lo largo del día. Se calcula como promedio mensual entre temperaturas máxima y mínima de los meses simulados.
- No hay gradiente de temperatura a lo largo de las secciones de dos metros de absorbedor.
- Los cinco caños que posee el absorbedor se modelizaron con un nodo de temperatura y área equivalente.
- Cada nodo de absorbedor representa una sección de tres metros de largo donde se considera que aproximadamente seis metros de absorbedor (dos nodos) se encuentran sin iluminar debido a que los haces llegan con cierta inclinación hacia el absorbedor, por los que los haces se desplazan en dirección sur.
- Los coeficientes convectivos no varían con la temperatura, a excepción del coeficiente convectivo entre el fluido caloportador y los tubos del absorbedor que fue calculada en función de la fase en la que se encuentra el fluido.
- No se tienen en cuenta las pérdidas térmicas a lo largo de las cañerías de entrada y salida.
- La presión en el circuito se mantiene constante.

### Modelo térmico con SIMUSOL

Para realizar el ajuste de los coeficientes de transferencia de calor que incluye el modelo, se contrastaron los resultados de la simulación con los valores medidos en un día soleado del mes de junio para el concentrador lineal Fresnel emplazado en las instalaciones del INENCO <sup>(2)</sup>. Las variables de entrada del modelo fueron los datos medidos de la temperatura de ingreso del agua ( $T_{ag1}$ ) y la temperatura ambiente exterior ( $T_{amb}$ ). Las variables calculadas fueron la temperatura de los caños ( $T_c$ ), la temperatura del agua ( $T_{ag2-5}$ ) que circula por el absorbedor, la temperatura de salida del agua del absorbedor ( $T_{ag6}$ ) y la temperatura del agua en el tanque de acumulación ( $T_{ac}$ ). Las variables de ajuste fueron los coeficientes convectivos internos en los caños del absorbedor.

Para simular el equipo con SIMUSOL, el absorbedor fue dividido en seis secciones de tres metros cada una. De esta forma se tuvo en cuenta la distribución de temperatura a lo largo del mismo. Cada una de las partes fue simulada mediante un modelo, los cuales reciben la energía reflejada por los espejos y simulan las pérdidas térmicas desde el absorbedor al ambiente. Cada modelo se conecta con el programa principal mediante tres nodos de temperatura:

- $T_{ag}$ : es la temperatura del agua acumulada en la sección de absorbedor de 3 metros de largo.
- $T_{amb}$ : es la temperatura ambiente
- $T_{ci}$ : es la superficie de los caños del absorbedor donde incide la radiación.

Para simular la radiación directa proveniente de los espejos se usó el método de día claro propuesto por Hottel (Duffie and Beckman, 2005), teniendo en cuenta las atenuaciones producidas por los distintos ángulos de incidencia sobre los espejos. Este modelo fue programado en Fortran y alimenta al programa cuando se simula la radiación incidente sobre la superficie de los caños del absorbedor como un flujo de energía (Gea et al., 2010). Para incluir el porcentaje de radiación reflejada por los espejos se consideraron valores medios de reflectancia para espejos de 3mm de espesor con soporte de vidrio común, (Hongn et al., 2011).

La simulación se realizó durante 10 horas comenzando a las 8 horas de la mañana y terminando a las 18 horas. La hora corresponde a la hora solar y no a la de uso horario. Se simularon los 4 días que representan los cambios de estación, para los días 21 de Diciembre, Marzo, Junio y Septiembre.

Para poder estimar los valores de los coeficientes convectivos se partió de valores calculados analíticamente, suponiendo un flujo no turbulento en la entrada ya que el número de Reynolds no superaba los 2300, (Incropera, 1999):

$$h_a = 4,36K / D \quad (1)$$

Donde  $h_a$  es el coeficiente de transferencia de calor para la fase líquida,  $K$  es la conductividad térmica y  $D$  es el diámetro interno del tubo.

Para la zona intermedia se supuso un coeficiente de mezcla  $h_{av}$  agua-vapor, se estimó dicho coeficiente con el método de Chen (Collier y Thome, 1994). Para ello al número de Nusselt de flujo turbulento ( $Nu_{Dav}$ ) se lo multiplica por un factor de peso  $F$  que relaciona los números de Reynolds de la parte líquida con la parte de vapor.

Se calcula  $Nu_{Dav}$  para flujo turbulento:

$$Nu_{Dav} = 0,023Re_D^{4/5} Pr^{0,3} F \quad (2)$$

para así hallar el coeficiente de transferencia de calor para la fase vapor,

$$h_c = Nu_{Dav} K / D \quad (3)$$

Al término calculado en la ec. (3) se le deben sumar los efectos correspondientes a las evaporaciones nucleadas,  $h_{ncB}$ :

$$h_{av} = h_c F + h_{ncB} \quad (4)$$

Para la salida se supuso que todo el líquido se vaporizó y se calculó el coeficiente convectivo para el vapor de la misma manera que para la fase líquida ec. (1) pero bajo la suposición de flujo turbulento.

### RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Se muestran los resultados de la simulación de las temperaturas de agua (°C) en función de la hora y también la eficiencia del sistema para el 21 de Diciembre y 21 de Junio.

#### 21 de Diciembre

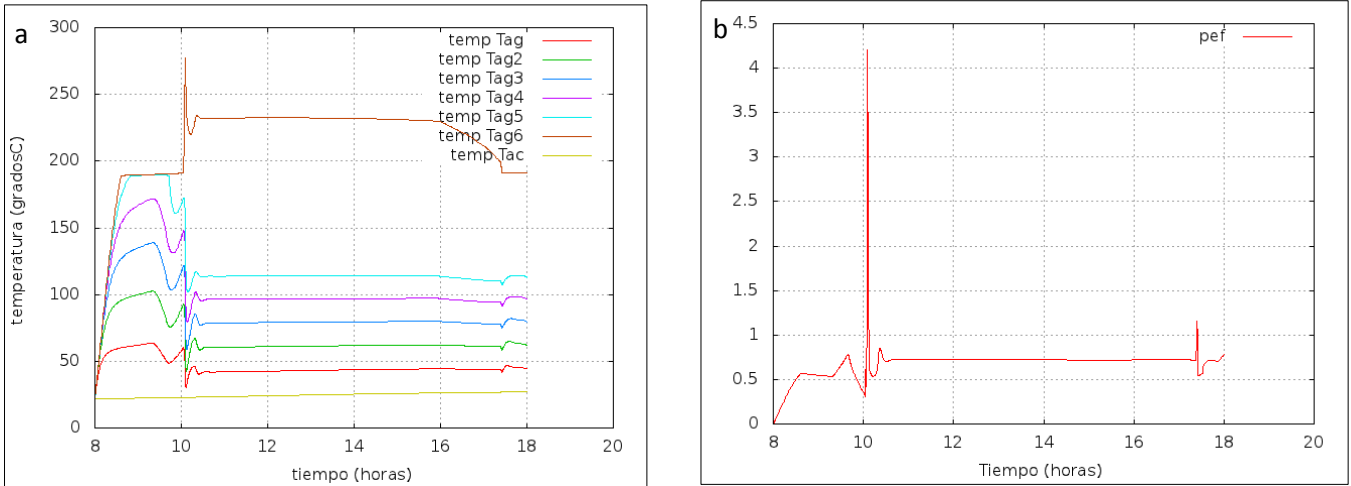


Figura 6: a) Gráfico de temperaturas de agua en el absorbedor (C°) vs hora solar. En b) se observa la eficiencia del sistema vs hora solar. Día simulado, el 21 de Diciembre.

Como se puede observar de la figura 6a el cambio de fase se produce a 190 °C antes de las 10 hs de la mañana, posteriormente se observa un pico de temperatura debido al efecto de la inercia térmica con a la fuerte disminución de  $c_p$  del vapor respecto a la entalpía de cambio de fase. Una vez que la fracción de vapor es 1 el caudal de circulación de fluido es aumentado a 0.07 l/s y la temperatura de salida se estabiliza a 230°C.

En la figura 6b se observa la eficiencia del sistema cuando entra en régimen de funcionamiento (a partir de las 10 horas) se estabiliza en 0,7. Los picos en los cuales la eficiencia supera la unidad se debe al efecto de la inercia térmica que está relacionado con los picos de temperatura explicados anteriormente.

#### 21 de Junio

Para este caso el cambio de fase ocurre recién entre las 9 y las 11.5 hs. Cuando el equipo alcanza la temperatura de funcionamiento el caudal toma un valor de 0.04 l/s. La diferencia más notoria entre las figuras 6a y 7a es el desplazamiento horario en el que ocurre la evaporación total del fluido caloportador.

Para este caso el cálculo se realizó hasta las horas 17 debido a que el día solar es menos extenso con respecto a los demás días y la eficiencia en régimen de funcionamiento tiene un comportamiento similar a la simulada para diciembre, figura 7b.

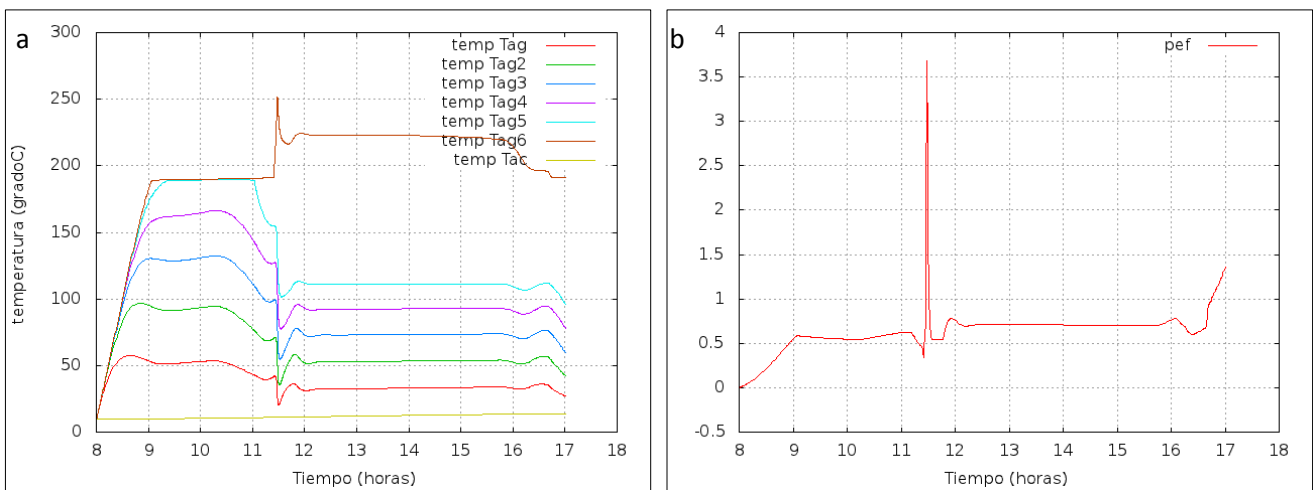


Figura 7: a) Gráfico de temperaturas de agua en el absorbedor (C°) vs hora solar y b) muestra la variación de la eficiencia con la hora solar. Ambos gráficos para el 21 de Junio.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se usó el programa SIMUSOL para simular un sistema complejo como es un Concentrador Lineal tipo Fresnel. Se puede observar que SIMUSOL es una herramienta útil para representar de manera sencilla el comportamiento del equipo para ciertas condiciones de funcionamiento. Prototipos de Concentrador Fresnel Lineal, de menor escala anteriores a este, ya han sido simulados mediante este software y los datos medidos y simulados han ajustado correctamente. Es por ello que una de las grandes ventajas de la simulación es la posibilidad de extrapolar el funcionamiento a otras condiciones de trabajo, otra escala de tamaño, y para condiciones geográficas diferentes.

La simulación térmica del sistema completo otorga una representación del funcionamiento esperado, actualmente el equipo se encuentra en condiciones de ser ensayado bajo condiciones normales de trabajo. Muy recientemente, se ha terminado la instalación de la 1ra etapa y se ha comprobado un correcto funcionamiento de las partes del sistema. En breve se realizarán los monitoreos correspondientes a fin de realizar una evaluación cuantitativa del funcionamiento del Concentrador Fresnel Lineal para la etapa de generación de vapor.

Dentro de los resultados más destacados que se obtienen con el soft, se puede mencionar que si bien los valores de irradiancia invernales son menores que las de verano, la temperatura del fluido requerida para el funcionamiento se alcanza para cualquier día del año. Aunque si se observa una disminución en las horas de funcionamiento del equipo.

Para los días 21 de Marzo y 21 de Septiembre los resultados de la simulación son análogos a los presentados en el apartado de arriba, donde también se observa un desplazamiento temporal en la hora donde se alcanza la temperatura necesaria de funcionamiento.

Queda pendiente seguir mejorando el modelo propuesto, con la finalidad de obtener una simulación cada vez más cercana a la realidad. Las mejoras para el futuro serán, por ejemplo, considerar la temperatura ambiente variable y realizar la simulación para varios días, fragmentar el absorbedor en más segmentos para tener una mejor visión de la etapa de cambio de fase, los coeficientes convectivos  $h$  entrarlos por tablas previamente habiéndolos calculado para distintos valores de temperatura y según la fase del fluido.

En cuanto a los ensayos in situ, queda pendiente realizar un monitoreo completo del sistema mediante el registro de temperaturas y presiones a más de dos puntos del absorbedor, para contar con la evolución real de estos parámetros. Como primer ensayo de la etapa de generación de vapor del concentrador Fresnel Lineal de 86 m<sup>2</sup> completo se resalta el correcto desempeño de las distintas partes del sistema. Lo que habilita, para los viajes posteriores al predio donde se encuentra el equipo, realizar las medidas necesarias y de manera sostenida durante varios días para obtener un registro de la evolución de los parámetros del fluido y de la eficiencia global del sistema. Resulta de interés realizar análisis cualitativos y cuantitativos mediante el uso de la termografía que permite obtener registros de temperaturas en distintas fracciones del absorbedor de manera no destructiva.

Las distintas partes del sistema se siguen estudiando y desarrollando a fin de optimizar el funcionamiento del equipo en líneas generales.

## REFERENCIAS

- Alfá de Saravia D. y Saravia L. R., (2003). Simulación de distintos sistemas físicos con SIMUSOL. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 7. ISSN 0329-5184.
- Altamirano M., Flores Larsen S., Hernández A. Saravia L., (2009). Simulación térmica de un absorbedor lineal mediante SIMUSOL. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 13, ISSN 0329-5184.
- Gea M., Saravia L., Altamirano M., Placco C., Bárcena H., Hongn M., (2010). Aspectos óptico geométricos de un Concentrador Solar Fresnel Lineal para aplicaciones térmicas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 14. ISSN 0329-5184.
- Gea M., Saravia L., Placco C., Hongn M., Altamirano M., Fernandez C., Caso R., Tilca F., Barcena H., (2012) Diseño y estado de avance de la construcción de un Concentrador Fresnel Lineal de 270 m<sup>2</sup>. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 16. ISSN 0329-5184.
- Hongn M., Flores Larsen S., Altamirano M., Gea M., Saravia L., (2011). Estudio de reflectancia de espejos para un Concentrador Solar Fresnel Lineal. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 15. ISSN 0329-5184.
- Collier J.G. and Thome J. R., (1994). Convective boiling and condensation. Third Edition. Clarendon press, Oxford. ISBN 0-19-856282-9.
- Duffie J., Beckman W. (2005). Solar Engineering of Thermal Processes, Third Edition, John Wiley and Sons.
- Incropera F., DeWitt D., (1999). Fundamentos de transferencia de calor, 4º Ed., Prentice Hall.



## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue financiado por MINCYT mediante el proyecto PFIP 2009 y por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta mediante el proyecto 2019/1.

## **ABSTRACT**

This paper presents a preliminary study of a Linear Fresnel Reflector currently being installed in San Carlos (Salta). The activity is supported by a PFIP 2009 research project. This prototype was built at real scale; it has a concentration factor of 40 and a collection area of 86m<sup>2</sup> corresponding to two modules connected in series. The different sub-systems of the equipment were checked and tuned through preliminary tests. The evolution of the operating parameters at normal working conditions was determined using a thermal model designed and calculated with SIMUSOL. This software was proved to be a useful tool to simulate this solar system and to predict suitably its thermal behavior.

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