

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA GLOBAL DE UN REFLECTOR LINEAL TIPO FRESNEL EN RELACION CON DISTINTOS ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

M. Altamirano¹, L. Saravia, M. Gea, D. Alía

Instituto de Investigación en Energías no Convencionales (INENCO) – Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta –

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Avenida Bolivia 5150 - C.P. 4400 – Salta Tel. 54-387-4255424 –

RESUMEN: El presente trabajo se muestra un modelo térmico de un Reflector lineal tipo Fresnel (RLF) con tanque de acumulación y doble paso por el absorbedor. El equipo se simuló en estado no estacionario mediante el programa SIMUSOL. Las variables de entrada fueron la radiación solar y la temperatura ambiente, mientras que las variables de ajuste fueron los coeficientes convectivos internos de los tubos del absorbedor. Se extrajeron datos de las temperaturas características de funcionamiento así también con de la eficiencia térmica global y del caudal másico de extracción de vapor. El programa SIMUSOL es una herramienta útil para modelar un concentrador lineal tipo Fresnel y así evaluar distintas condiciones de funcionamiento que ayudan a tomar importantes decisiones de diseño.

Palabras claves: Concentrador solar, Fresnel, Simulación térmica, SIMUSOL

INTRODUCCIÓN

Ante el incremento de consumo energético y las dificultades para cubrir esta demanda con fuente de energía convencional, ya sea por problema de abastecimiento de combustible o por la contaminación ambiental que ocasiona su utilización, es que la generación energía por medio de fuentes alternativas viene ganando terreno. Dentro de estas fuentes, las centrales solares térmicas de concentración se muestran como una solución viable para cubrir las necesidades energéticas de base debido a la gran disponibilidad de recurso solar en el noroeste y regiones cordilleranas del país. Si bien los costos para la generación de electricidad por medio de concentración solar es más elevado que la generación eólica, la energía solar tiene la ventaja de ser más fácil de predecir y prevenir bajas en el recurso que pueden ser suplidas por medio de acumuladores térmicos de bajo costo y evitar así los problemas que ocurren cuando una gran cantidad de generadores eólicos dejan de funcionar causando cortes en las redes de alta tensión.

Las tecnologías existentes para la generación de electricidad por concentración solar son cuatro. La más antigua y consolidada es la concentración por cilindro parabólico, la cual cuenta con varias plantas funcionando a nivel comercial en todo el mundo. Lamentablemente para nuestra región el costo de la misma es muy elevado ya que no contamos con fabricación a nivel industrial de los espejos curvos y los caños evacuados de vacío entre otros componentes específicos, lo cual aumenta el costo de gran manera ya que habría que fabricar las piezas de manera casi artesanal. La generación por medio de motores Stirling se muestra como la más eficiente ya que dicha configuración de ajusta de gran manera a las temperaturas de trabajo que se pueden conseguir con un disco parabólico, pero todavía los costos son muy elevados para pensar en una fabricación a nivel comercial. La generación por medio de torre central es probablemente la más atrayente de las tecnologías debido a las grandes temperaturas que se pueden alcanzar pero los costos de instalación y las dificultades de conseguir los materiales y equipos en la región la hacen inalcanzables para los presupuestos que se manejan en el país.

Uno de los sistemas de concentración más novedosos es el Reflector Lineal de Fresnel (RLF) si bien este sistema no cuenta con la eficiencia más alta sus costos de construcción son considerablemente menores lo que lo hace muy atractivo ya que en la región no contamos con problemas de disponibilidad de terreno.

Un RLF es un arreglo de espejos rectangulares ligeramente curvados que concentra la radiación solar sobre un absorbedor lineal trapezoidal estacionario que se encuentra invertido a algunos metros sobre el campo de espejos. Cada espejo tiene una inclinación de manera tal que la radiación solar directa que éste colecta es reflejada hacia el absorbedor. Los espejos se encuentran a nivel del suelo y rotan sobre sus ejes axiales siguiendo la trayectoria aparente del sol. Uno o más tubos en el absorbedor transportan el fluido caloportador que es calentado debido a la concentración de radiación solar, como muestra la Figura 1 (Altamirano et al, 2010).

El hecho de trabajar con espejos planos y no poseer absorbedores móviles que necesiten tubos evacuados de vacío hace de este sistema el más apropiado para desarrollar en el país sin la necesidad de importar ninguno de sus componentes.

En el presente trabajo se muestra una simulación del comportamiento térmico de un RLF con el fin de estudiar distintos parámetros de funcionamiento y evaluar modificaciones de materiales y constructivas con el fin de mejorar su rendimiento. Para llevar a cabo este análisis se construyó un modelo teórico usando el programa SIMUSOL que simula el modelo completo del RLF. Este análisis surge de las inquietudes que aparecen a la hora de definir los materiales más convenientes que mejoren el funcionamiento sin elevar de gran manera el costo del mismo. Se estudió cuanto impactan en la eficiencia global el uso de distintos materiales como pinturas selectivas, vidrios con bajo contenido de hierro (vidrio blanco) o el aumento del área de colección agregándole una fila más de espejos.

¹ Becario CONICET-Gobierno de Salta



(a)



(b)

Figura 1: (a) Foto del RLF de 43.2m² construido en el INENCO. (b) Foto del tanque de recirculación antes de ser aislado.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO SIMULADO

El equipo simulado es el RLF que se encuentra instalado en el campo experimental del INENCO en la Universidad Nacional de Salta. El mismo cuenta con un área de 43,2 m² repartida en 9 espejos de 0.80m de ancho por 6m de longitud. El circuito de colección de calor está formado por un sistema de recirculación de agua con un tanque a sobre presión. Este último evita la generación de vapor en la zona del absorbedor previniendo así la formación de posibles puntos calientes que ocasionen daños en el equipo. Asimismo funciona como acumulador de calor para absorber las caídas en la producción de vapor ocasionadas por la disminución de la radiación directa por períodos breves de tiempo debido al paso de nubes.

Otro aspecto importante de diseño es la doble circulación de agua en el absorbedor para evitar pérdidas térmicas en los tubos caloportadores al regresar al tanque, lo que a su vez permite aumentar el trayecto que recorre el fluido caloportador en el absorbedor. Esto hace que la etapa de calentamiento sea más gradual contribuyendo a evitar la formación de puntos calientes debido a la evaporación por flash en el absorbedor. Por otro lado al no haber grandes diferencias de temperaturas en los distintos tubos del absorbedor facilita el asiento de los mismos en la cavidad trapezoidal ya que estos son móviles para asimilar las deformaciones por expansión y contracción térmica. (Ver figura 2).

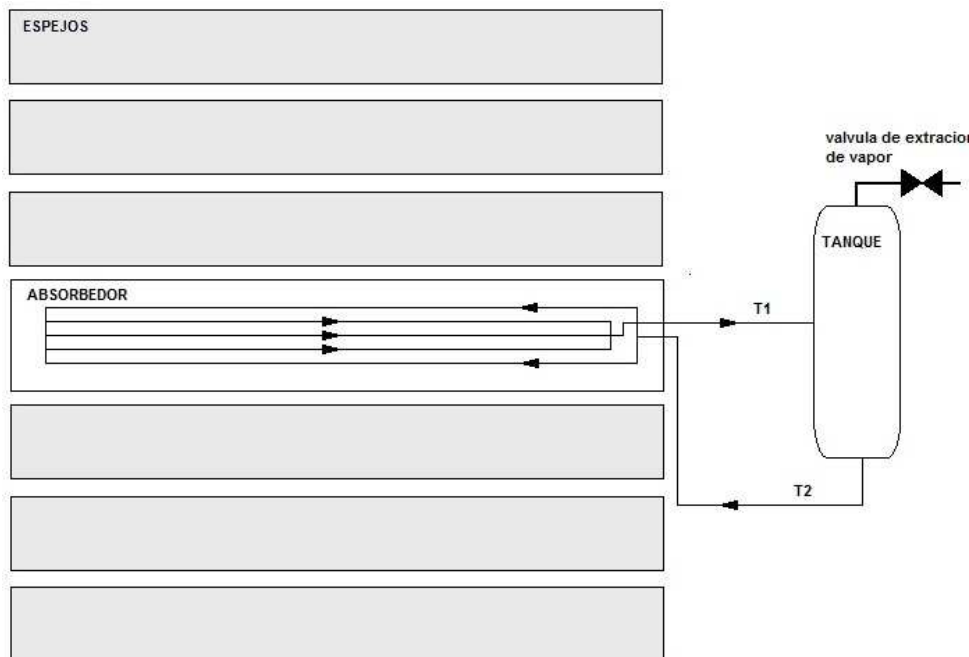


Figura 2: Esquema del circuito de circulación de agua en un RLF con tanque de recirculación.

MODELO TERMICO CON SIMUSOL

La modelización del equipo con SIMUSOL (Alía y Saravia, 2003) se realizó dividiendo el absorbedor en 3 partes cada una representa una sección de dos metros de largo, las que a su vez fueron divididas en dos partes. Una representa la parte central del absorbedor con tres tubos caloportadores y la otra las partes laterales con los dos tubos restantes. 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.

Para realizar el ajuste del modelo se tomaron los valores de los coeficientes convectivos internos de los tubos, presentados en el trabajo “Simulación Térmica de un Concentrador Lineal Tipo Fresnel, dos opciones de Funcionamiento” (Altamirano et al., 2011). Las variables de entrada fueron las temperaturas ambientes e iniciales del sistema como así también la radiación directa proveniente de los espejos para la cual se usó el método de día claro propuesto por Hottel. Para este cálculo se tuvo 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 tubos del absorbedor como un flujo de energía (Gea et al., 2011). Las variables calculadas fueron las temperaturas del agua de ingreso y salida del absorbedor y la temperatura en el tanque de recirculación.

La eficiencia (η) térmica instantánea del equipo se calculó mediante (Rabl, 1985)

$$\eta = Q_{ex}/A \cdot I \quad (1)$$

Donde Q_{ex} es el calor que se extrae del sistema en forma de vapor sobresaturado, A es el área de la superficie de captación e I es la Radiación directa incidente sobre metro cuadrado.

Las hipótesis de trabajo que se usaron para esta simulación son:

- Las propiedades térmicas de los materiales involucrados son constantes a excepción de la capacidad calorífica del agua a presión constante (C_p) que fue ingresada por tabla.
- La temperatura ambiente se mantuvo constante.
- No hay gradiente de temperatura a lo largo de las secciones de dos metros de absorbedor.
- Los coeficientes convectivos no varían con la temperatura.
- No se tienen en cuenta las pérdidas térmicas a lo largo de las cañerías de recirculación.
- Las presiones en los circuitos se mantienen constantes.

El significado de los elementos utilizados por el programa puede observarse en la figura 3.

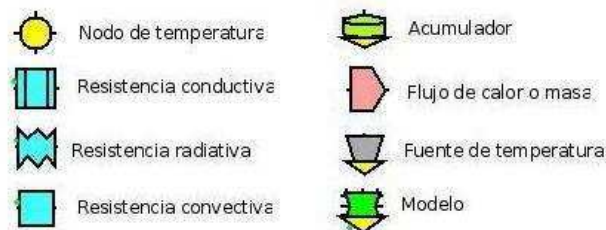


Figura 3: Símbolos análogos Térmicos-Eléctricos usados por SIMUSOL.

En la figura 4 se muestra la analogía térmica-eléctrica que se utilizó para la simulación del sistema en estado no estacionario. Los modelos 1, 2 y 3 representan los intercambios de calor en las tres secciones del absorbedor. Los mismos se relacionan con el programa mediante 5 nodos de temperatura. Dos representan los tubos caloportadores (uno los 2 tubos exteriores y el otro los 3 tubos interiores), otros dos representan la superficie de los tubos donde incide la radiación y un último representa la temperatura ambiente. La recirculación de agua se hace por medio de fuentes másicas y el tanque de sobre presión mediante un nodo Tag. El otro tanque se usa como radiador para enfriar el vapor antes de ser reingresado al sistema. El vapor extraído representado por una fuente de flujo másico, se conecta con un nodo de temperatura asociado a un acumulador de gran masa que actúa como condensador y absorbe el calor entregado para devolver agua a temperatura ambiente a la bomba que se simula con una fuente másica.

La válvula que regula la extracción de vapor del tanque se simuló ingresando una función que la acciona recién cuando la temperatura alcanza los 134 grados (temperatura de trabajo propuesta), el caudal de vapor (\dot{m}) se maximiza ya que el mismo se fija con otra función que extrae el calor máximo del sistema teniendo en cuenta las temperaturas de entrada y salida del absorbedor, ecuación (2).

$$\dot{m} = \dot{m}_{\text{absorbedor}} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) / h \quad (2)$$

Donde $\dot{m}_{\text{absorbedor}}$ es el caudal másico de recirculación en el absorbedor, C_p es el calor específico del agua, T_1 y T_2 son las temperaturas de salida y entrada del absorbedor respectivamente y h es la entalpia del cambio de fase del agua.

En la figura 4 se muestra el esquema térmico-eléctrico ingresado para la simulación.

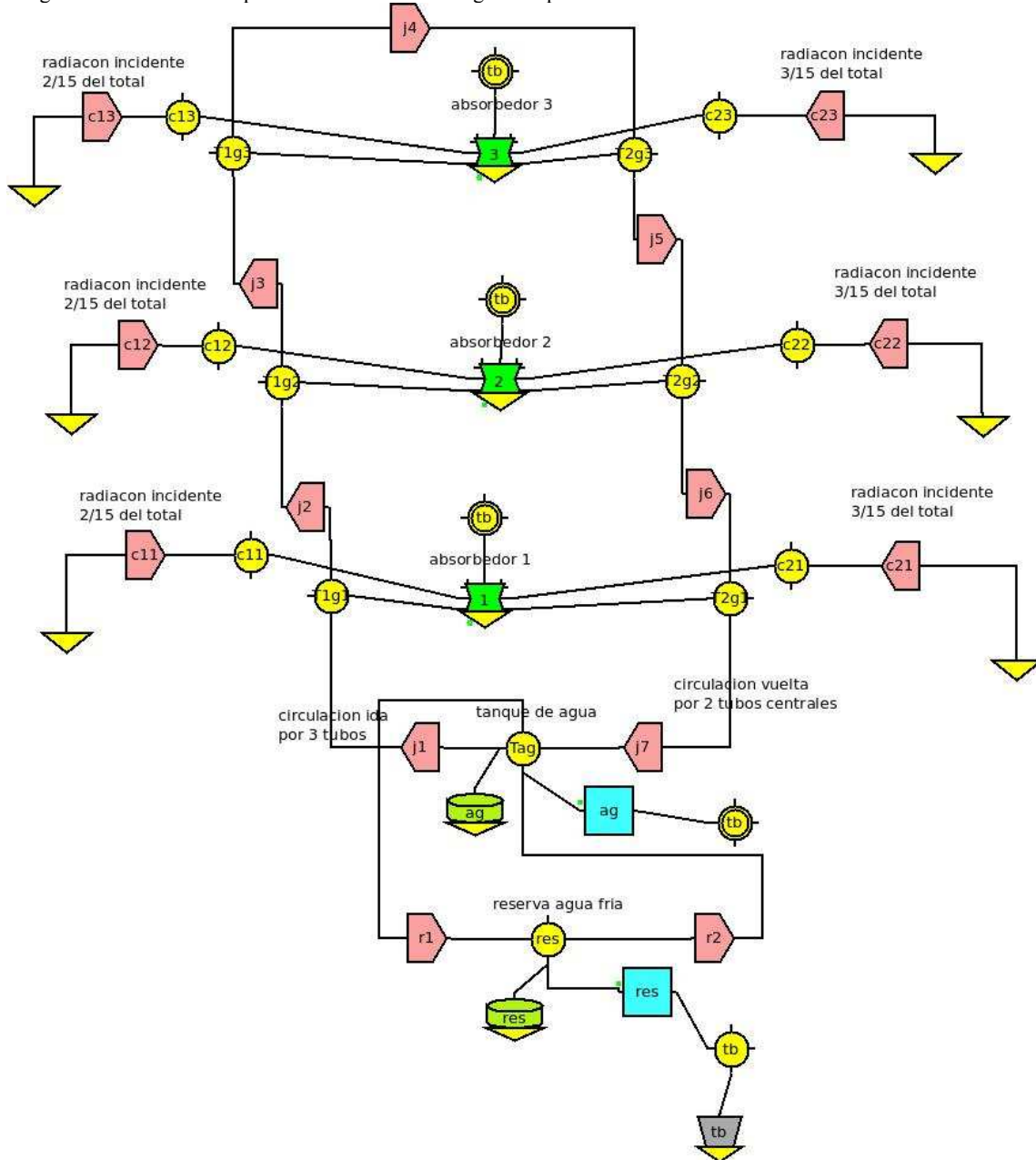


Figura 4: Esquema del circuito térmico simulado mediante.

RESULTADOS

En primer lugar se muestran los valores simulados de las temperaturas de entrada, salida, temperatura media de tanque de acumulación, eficiencia global del equipo y caudal para el RLF de 43.2m² para un día típico de primavera (figura 5). El equipo simulado cuenta con espejos convencionales con alto contenido de hierro (reflectancia global 0,78) y sin pintura selectiva (emitancia global de los tubos absorbedores 0,9).

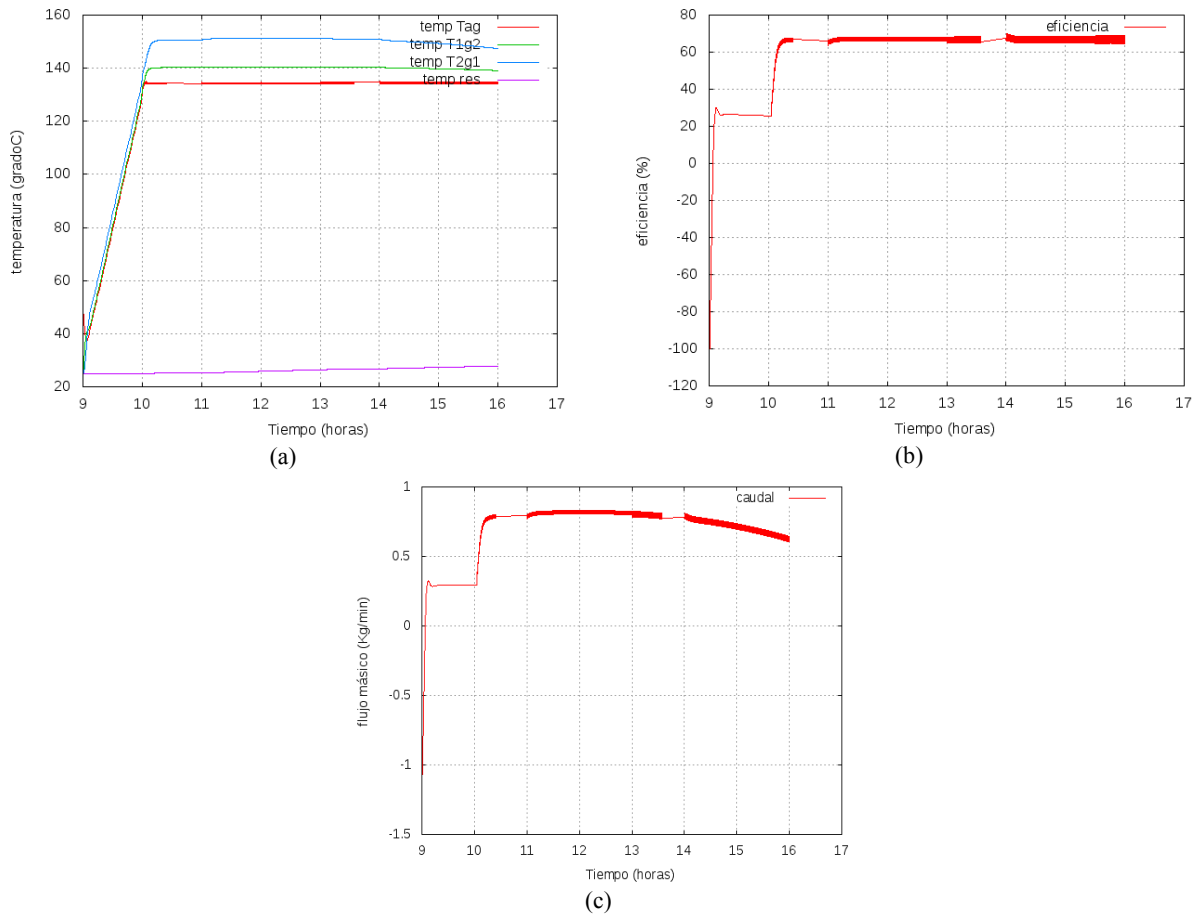
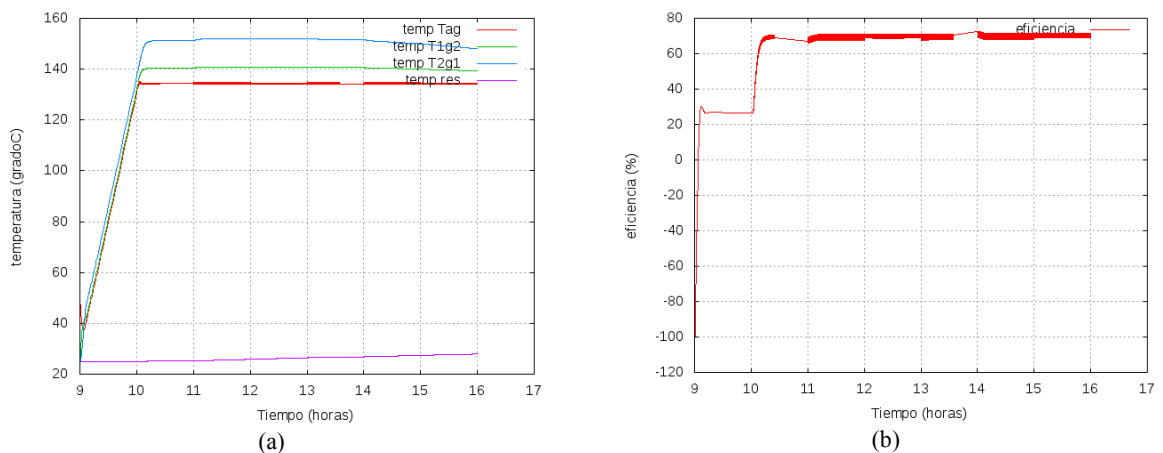


Figura 5: Equipo sin modificaciones. (a) Distribución de temperaturas vs. Tiempo. (b) Eficiencia térmica vs. Tiempo. (c) Flujo másico vs Tiempo.

En la figura 5(a) se puede apreciar que las temperaturas de entrada y salida del absorbedor suben de manera conjunta con la temperatura del tanque hasta que esta alcanza los 134 grados, momento en el cual se abre la válvula y comienza la extracción de vapor. La temperatura del tanque se mantiene constante ya que la válvula se regula para extraer el máximo vapor del equipo. En la figura 5(b) se puede ver que una vez que el equipo alcanza la temperatura de trabajo la eficiencia térmica promedio es de 66%. En la figura 5(c) se observa que una vez alcanzada dicha temperatura el caudal se mantiene constante en 49, 83 Kg/hs hasta aproximadamente las 15:00hs. Luego la radiación disminuye dando como promedio del caudal 46.33 Kg/hs considerando las horas de funcionamiento del equipo (de 9 a 16hs).

A continuación en la figura 6 se muestran los gráficos para el mismo equipo funcionando con pintura selectiva en los tubos caloportadores.



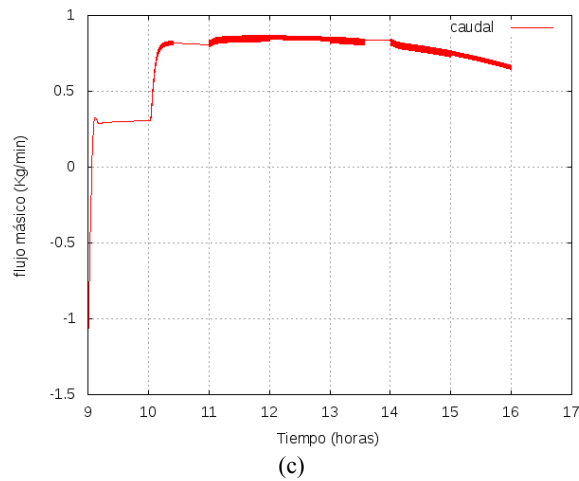


Figura 6: Equipo con pintura selectiva. (a) Distribución de temperaturas vs. Tiempo. (b) Eficiencia térmica vs. Tiempo. (c) Flujo másico vs Tiempo.

Como se puede apreciar en la figura anterior la curva de temperatura no varía en forma significativa con respecto al equipo funcionando sin pintura selectiva. En este caso la eficiencia térmica promedio fue de 69%, solo un 3% mejor. Y el caudal promedio aumenta a 48.28 Kg/hs.

A continuación se muestran las curvas de funcionamiento del equipo con espejos de bajo contenido en hierro.

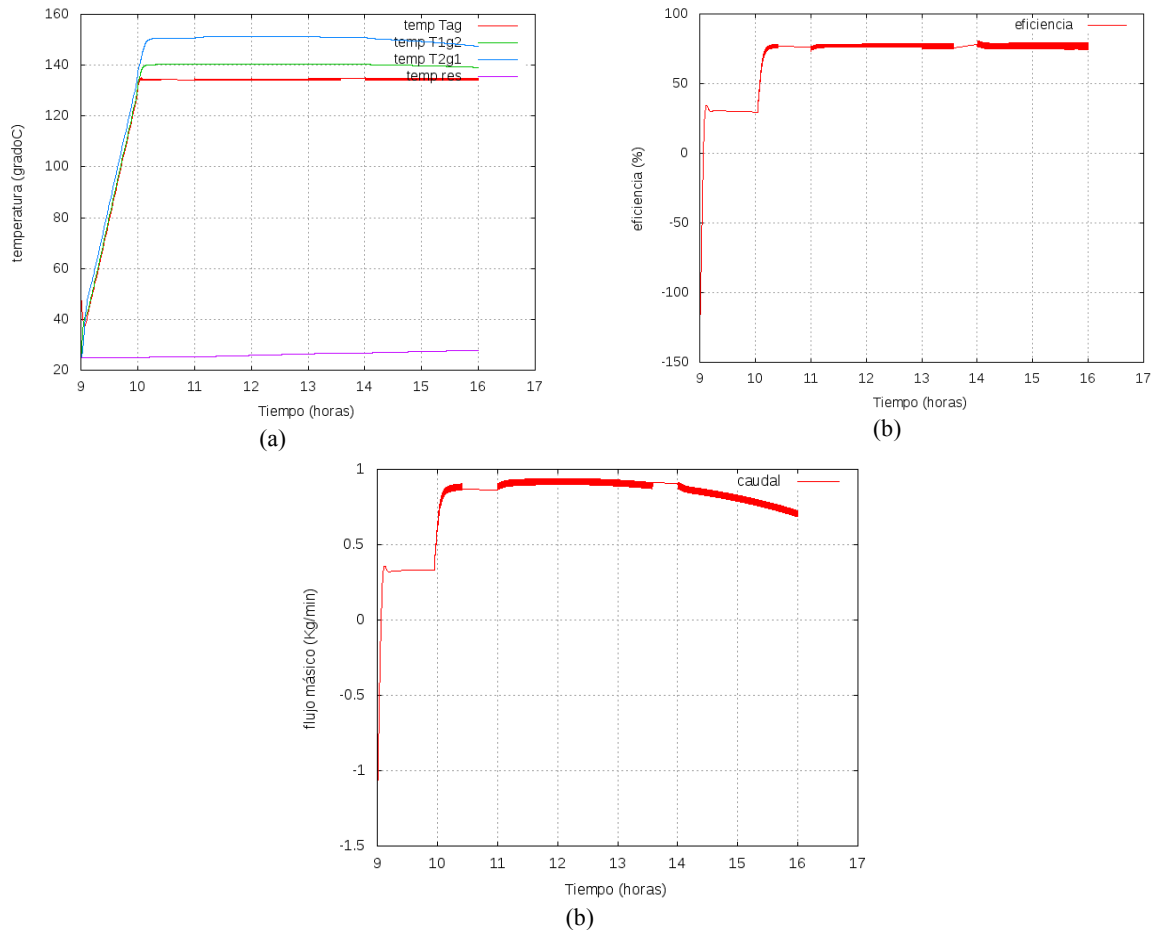


Figura 7: Equipo con vidrio blanco. (a) Distribución de temperaturas vs. Tiempo. (b) Eficiencia térmica vs. Tiempo. (c) Flujo másico vs Tiempo.

La eficiencia térmica promedio para este caso es mucho mayor, 77%. El caudal promedio aumenta de manera considerable a 53.49 Kg/hs.

El último caso que se analizó fue el equipo funcionando con una fila de espejos agregada, pasando de 9 filas de espejos a 10,

aumentando el área de colección de 43.2 m² a 48m², y con ello la relación de concentración. El propósito de este estudio es analizar si es conveniente invertir en mejoras de materiales o en ampliar el área de colección usando los mismos materiales.

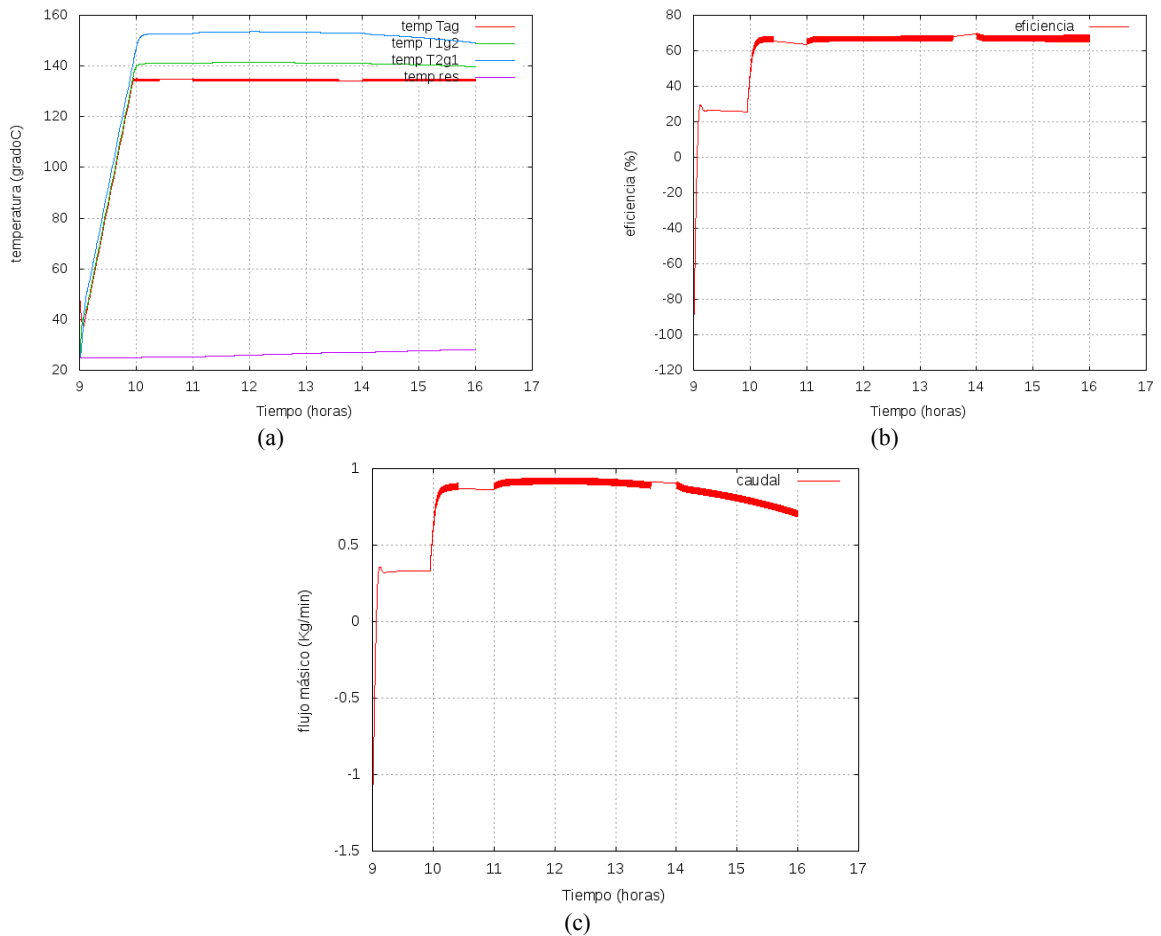


Figura 8: Equipo con área extendida. (a) Distribución de temperaturas vs. Tiempo. (b) Eficiencia térmica vs. Tiempo. (c) Flujo másico vs Tiempo.

Como se puede ver en la figura 8 la eficiencia global no cambia ya que si bien el área de colección es mayor los caudales extraídos son mayores, 52.20 Kg/hs, manteniéndose la eficiencia térmica en 66%.

En la Tabla 1 se muestran datos comparativos entre eficiencia y caudal másico para los diferentes equipos estudiados.

Equipo	Eficiencia (%)	Caudal (Kg/hs)
sin modificaciones	66,8	46,33
con pintura selectiva	69,6	48,28
con espejo blanco	77,1	53,49
con área extendida	66,9	52,20

Tabla 1: Comparación entre eficiencia y caudales de los equipos estudiados.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se muestra una simulación del comportamiento térmico de un RLF con el fin de estudiar distintos parámetros de funcionamiento y evaluar modificaciones de materiales y constructivas con el fin de mejorar su rendimiento.

Analizando los gráficos de funcionamiento del equipo se observa que usando la ecuación (2) se puede regular el caudal de extracción de manera de garantizar el máximo rendimiento del equipo. Esto a su vez permite controlar la temperatura en el tanque de acumulación, ya que al maximizar la extracción uno se asegura que no se eleven las presiones del tanque al extraerse todo el calor excedente.

Por otro lado la regulación del caudal planteada puede ser fácilmente llevada a la práctica ya que al sistema del control general del equipo solo hay que ingresar con 4 datos, tres temperaturas (tanque, entrada y salida del absorbedor) y el caudal másico de vapor medido en la salida.

Comparando los datos de la figura 5 y 6 se puede ver que el uso de la pintura selectiva no afecta de gran manera a la eficiencia global del equipo, solo un 3%, esto se debe a que las pérdidas térmicas en el absorbedor solo representan un 10% en la eficiencia global del equipo (Flores Larsen, et al, 2011)(Singh et al, 2010). Estos resultados no justifican el uso de pinturas selectivas ya que su implementación es muy costosa y sus beneficios no son grandes.

En la tabla 1 se puede apreciar que por un lado que el uso de vidrio blanco aumenta de gran manera la eficiencia y esto se ve reflejado en el caudal másico de vapor que se puede extraer del equipo. Por otro lado al aumentar el área de colección si bien la eficiencia no aumenta el caudal lo hace de gran manera. Estos resultados muestran la importancia de un análisis económico teniendo en cuenta el caudal de producción de vapor no tanto la eficiencia a la hora de diseñar un equipo, ya que en la región es muy difícil conseguir espejos blancos para la construcción de RLF de gran área.

REFERENCIAS

- M. Altamirano, M. Gea, C. Placco, Saravia, D. Alía. (2010) Simulación térmica de un concentrador lineal tipo Fresnel, dos opciones de funcionamiento. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente.*; 14,03.139-03.146.
- A. Rabl (1985) Center for Energy and Environmental Studies. Princeton University.
- Singh P.L., Sarvia R.M., Bhagoria J.L. (2010), Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers. *Applied Energy*; 87: 541–550.
- S. Flores Larsen, M. Altamirano, A. Hernandez. (2011) Heat loss of a trapezoidal cavity absorber for a linear Fresnel Reflecting solar concentrator. *RENE-D-11-00216R2*.
- M. Gea, L. Saravia, M. Altamirano, C. Placco, H. Bárcena, M. Hongn (2010) Aspectos óptico geométricos de un concentrador solar Fresnel lineal para aplicaciones térmicas. *14, 03.215-03.222*
- Dolores Alía de Saravia y Luis R. Saravia. (2003). Simulación de distintos sistemas físicos con SIMUSOL. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 7, Nº 2, 08.85-08.90.*

ABSTRACT: This paper shows a thermal model of a Linear Fresnel Reflector (LFR) with holding tank and double passage through the absorber. The steam was simulated in unsteady state by SIMUSOL program. The inputs are solar radiation and temperature, while the adjustment variables were the internal convective coefficient of the absorber tubes. We extracted data features operating temperatures well with overall thermal efficiency and mass flow of steam extraction. The SIMUSOL program is a useful tool to model a linear Fresnel concentrator and thus evaluate various operating conditions that help make important design decisions.

KEYWORDS: Solar concentrator, Fresnel, Thermal simulation, SIMUSOL