

SIMULACIÓN DE UNA PLANTA TERMOSOLAR DE COLECTORES CILINDRO PARABÓLICOS

Ing. Raúl La Madrid Olivares rlamadri@gmail.com

Universidad de Piura - Perú, Sección Energía

Av. Ramón Mugica 131. Piura

Prof. Ing. Daniel Marcelo Aldana daniel.marcelo@udep.pe

Universidad de Piura - Perú, Sección Energía

Ing. José Bruno Moreno Begazo jbmoreno1@hotmail.com

Universidad de Piura - Perú, Sección Energía

Resumen. *El presente artículo muestra una simulación de una planta de energía eléctrica a partir de energía solar térmica utilizando el software TRNSYS. Se verifica el comportamiento de cada uno de los componentes de una planta termosolar en estado transitorio de acuerdo con la energía solar térmica disponible y recibida. La relevancia de esta investigación reside en el hecho que es importante conocer de manera más detallada otra forma de generación de electricidad como alternativa a las plantas de generación de electricidad convencionales. La energía solar, además de ser una nueva alternativa para la generación de energía eléctrica, es una energía renovable, la cual origina una contaminación ambiental mínima comparada con la que generan las plantas convencionales de generación de energía eléctrica..*

Palabras-clave: Planta termosolar, Colectores cilindro parabólicos, Energía solar.

1. INTRODUCCIÓN

A principio de la década de los 80 se pusieron en funcionamiento las primeras plantas termosolares para generación de energía eléctrica (SEGS I-IX). Todas ellas fueron desarrolladas por la empresa LUZ y están ubicadas en California, USA.

Gracias a estas primeras plantas se ha logrado desarrollar esta tecnología y en la actualidad está disponible para ser utilizada en cualquier localidad que cuente con unas condiciones climáticas adecuadas.

En este artículo se va realizar una simulación energética en estado transitorio de la planta para conocer con mayor profundidad el funcionamiento de una planta termosolar.

2. SIMULACIÓN TERMOENERGÉTICA DE UNA PLANTA TERMOSOLAR

En este apartado, se define la metodología para realizar una simulación energética de la planta termosolar con características similares a la SEGS-VI y datos meteorológicas de la zona norte del Perú. Utilizando el programa especializado TRNSYS y se realizará una comparación de los resultados gráficos obtenidos del programa con los resultados mostrados en *Moreno* (2010).

2.1 Programa de simulación

TRNSYS es un programa especializado en la simulación de sistemas energéticos en estado transitorio (The Transient Energy System Simulation Tool), disponible desde 1975.

Este programa ha sido elaborado por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Wisconsin-Madison (Estados Unidos), conjuntamente con el Laboratorio de Aplicaciones de Energía Solar de la Universidad de Colorado (Estados Unidos).

TRNSYS cuenta, actualmente, con una interfaz gráfica, con una librería con 80 componentes estándar, además de otras librerías que ofrecen alrededor de 300 componentes y cuenta con usuarios y distribuidores alrededor de todo el mundo (Francia, Alemania, España, EEUU, Japón).

2.2 Modelación en TRNSYS

Antes de empezar a explicar cómo se ha modelado el sistema, es importante señalar que ha sido necesario el uso de una librería especial que cuenta con los componentes adecuados para plantas termosolares. El nombre de la librería es "STEC library" ésta no tiene ningún costo, pero debe ser solicitada a la persona correspondiente ya que su distribución está a cargo de una sola persona.

Modelación del campo solar

Para representar el campo solar se utiliza el componente que representa los colectores cilindro parabólicos, un procesador de radiación (TYPE 16g) y un componente que lea los datos de clima en formato TMY2 (TYPE 89b), ver Fig. 1.

El esquema con los lazos correspondientes es el siguiente:

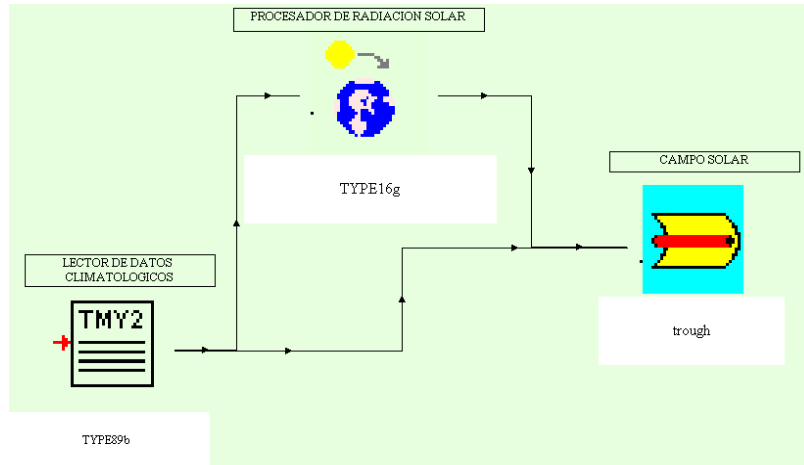


Figura 1. Modelación del campo solar

Las líneas que unen los distintos componentes indican que los datos de salida de un componente son los datos de entrada para el siguiente componente, en el sentido que indica la flecha.

Modelación del precalentador, generador de vapor y sobrecalentador

Para modelar estos elementos se va a utilizar la librería “STEC Library” la cual cuenta con componentes específicos para el precalentador, generador de vapor y sobrecalentador que se utilizan en los ciclos Rankine.

El esquema con los lazos correspondientes es el que se muestra en la Fig. 2:

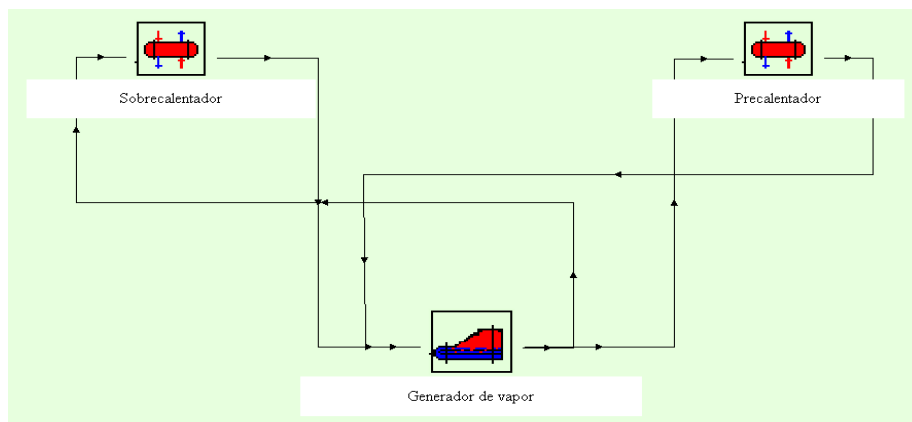


Figura 2. Modelación del precalentador, generador de vapor y sobrecalentador

Modelación de la turbina de vapor

Para modelar la turbina se ha utilizado dos componentes. El primero (Etapa-#) es la propia etapa de la turbina y el segundo (S-split) es un componente que se encarga de dividir el flujo de entrada en dos salidas, lo cual es necesario ya que el ciclo en estudio es de tipo regenerativo. Una salida se dirige a la entrada de la siguiente etapa de la turbina y la otra va hacia los calentadores.

El esquema para ambas turbinas (alta y baja, respectivamente) se muestran en los gráficos 3 y 4:

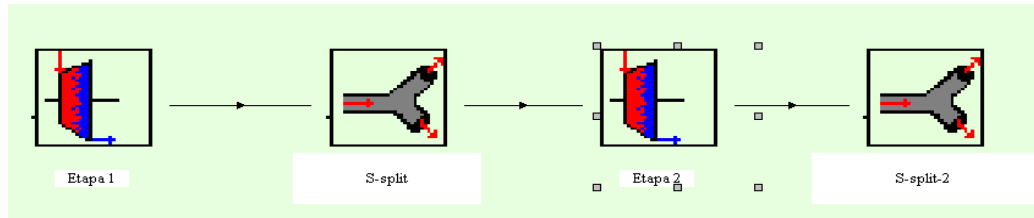


Figura 3. Modelación de la turbina de alta presión

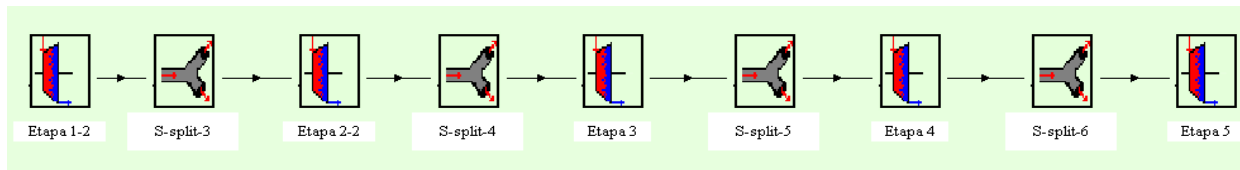


Figura 4. Modelación de la turbina de baja presión

Modelación de los calentadores

Los calentadores son modelados utilizando dos componentes. El primer componente es un precalentador (PREHEATER), el cual asume que la capacidad calorífica del agua es constante en el lado frío y condensa vapor en el lado caliente. El precalentador determina el flujo másico de vapor requerido que mantendrá constante el nivel del agua en el intercambiador y calcula la transferencia de calor.

El segundo componente (TYPE 5b) es un sub-enfriador que no es más que un intercambiador con la habilidad adicional de expresar el calor total transferido como una función del flujo másico del fluido del lado frío. Ver Fig. 5.

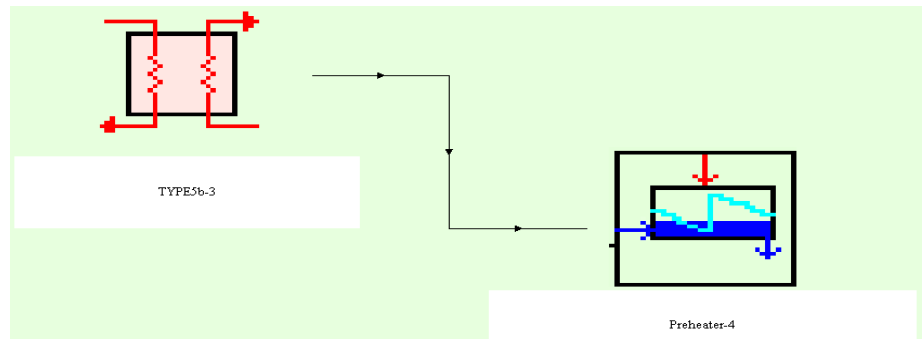


Figura 5. Modelación de los calentadores

2.3 Ensamblaje de los componentes en TRNSYS

Para poder simular la planta termosolar completa se deben unir los subsistemas que se han mencionado en el apartado anterior y además agregar los componentes adecuados para cumplir con el ciclo Rankine regenerativo recalentado.

Los componentes adicionales empleados son:

- Condensador
- Deaerador
- Bombas
- Recalentador

El esquema utilizado es el que se muestra en la Fig. 6:

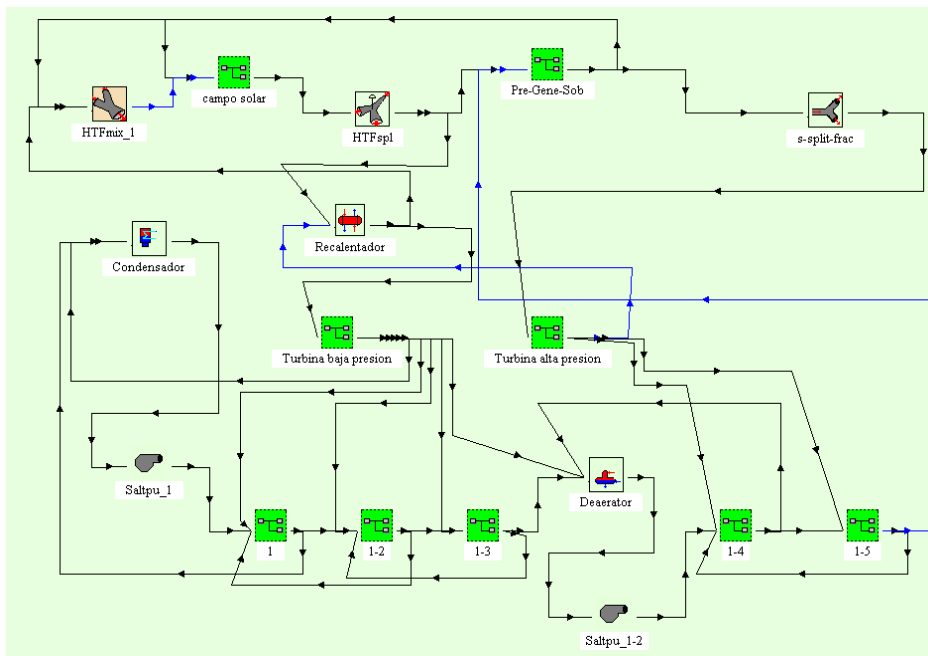


Figura 6. Modelo completo de la planta termosolar

Se puede ver que el campo solar está representado por la macro que está en la parte superior izquierda (“campo solar”) mientras que la macro de la derecha (“pre-gene-sob”) representa al precalentador, generador de vapor y sobrecalentador. Las macros del medio representan las turbinas de baja (izquierda) y alta (derecha) presión. Los calentadores están representados por las macros de la parte inferior (1-#).

2.4 Resultados

Los primeros resultados que se van a mostrar son los del campo de colectores, ya que es aquí donde se inicia el proceso de la planta termosolar para la generación de energía eléctrica.

Campo solar

Los datos de clima utilizados para esta simulación son de la ciudad de Los Ángeles, ubicada en California, Estados Unidos. La radiación directa que cae sobre esta ciudad ($\text{kJ}/\text{h}\cdot\text{m}^2$) es la misma que reciben los colectores, la cual se muestra en la Fig. 7.

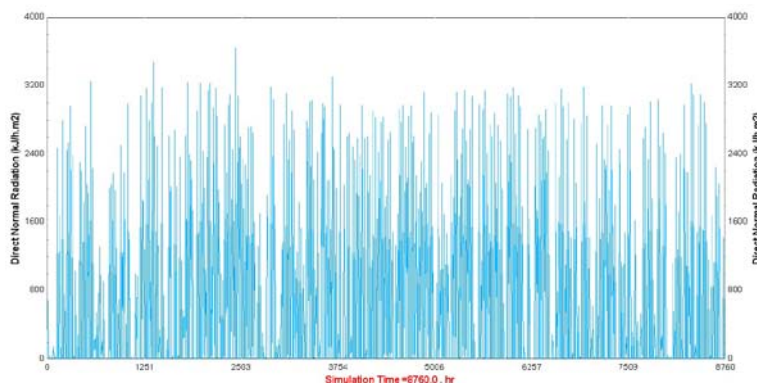


Figura 7. Radiación directa durante todo el año en la ciudad de Los Ángeles

En las figuras 8 y 9 se representa la radiación directa durante un día de verano (a la derecha) y uno de invierno, (a la izquierda). Se puede notar a simple vista la diferencia entre la radiación que existe en verano y la de invierno. Existe una diferencia aproximada de $800 \text{ kJ}/\text{h}\cdot\text{m}^2$.

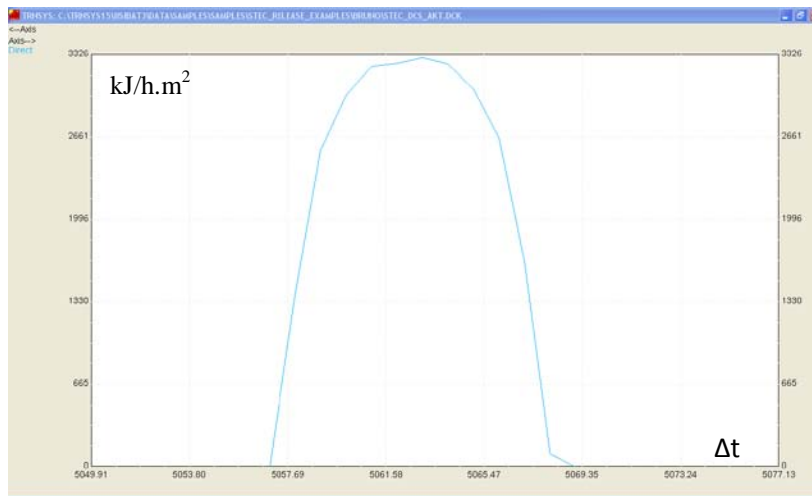


Figura 8. Radiación directa durante un día de verano

El eje horizontal para las figuras 8 y 9 representa un diferencial de “t” (tiempo) de todo el año.

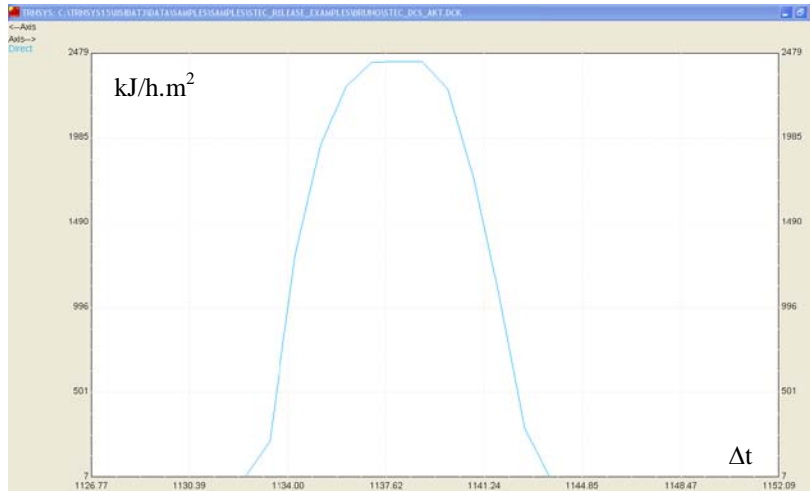


Figura 9. Radiación directa durante un día de invierno

En la Fig. 10 se muestra la temperatura del fluido caloportador a la salida del campo de colectores durante un día de verano mientras que en la Fig. 11 se tiene la temperatura del fluido caloportador a la salida del campo de colectores un día de invierno.

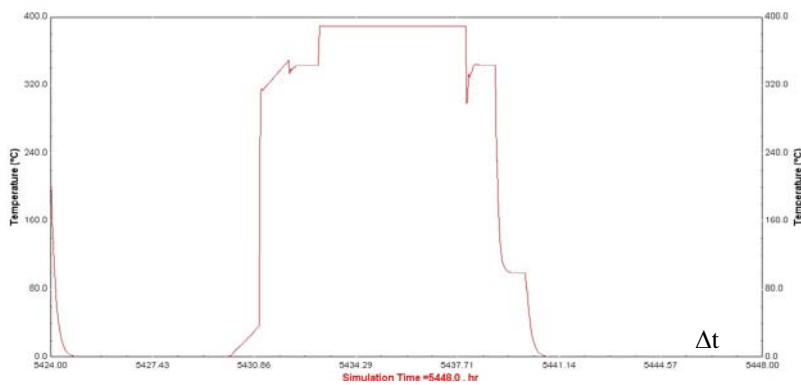


Figura 10. Temperatura del fluido caloportador a la salida del campo de colectores durante un día de verano

El eje horizontal para los gráficos 10 y 11 representa un diferencial de “t” (tiempo) de todo el año.

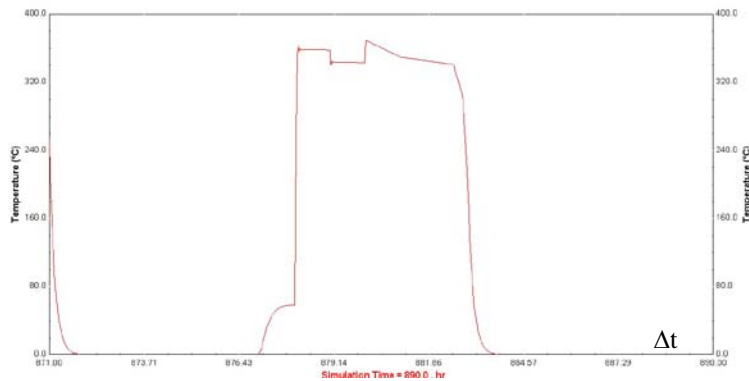


Figura 11. Temperatura del fluido caloportador a la salida del campo de colectores durante un día de invierno

Se puede observar cómo la temperatura del fluido caloportador va aumentando a medida que la radiación solar aumenta hasta llegar a su punto máximo en las últimas horas de la mañana y las primeras horas de la tarde. Luego de alcanzar su punto máximo la temperatura del fluido caloportador disminuye debido a que la radiación solar también disminuye.

Eficiencia del campo de colectores

En la Fig. 12 se puede ver la variación del rendimiento a lo largo de todo el año. Se observa una variación considerable en el rendimiento en la parte central del gráfico. Esto se debe a que en los meses de verano existe una mayor radiación solar, pero los captadores no varían la cantidad de radiación que captan, es decir, al haber una mayor radiación solar, el desperdicio de ésta también será mayor.

El caso contrario ocurre en los meses de invierno, al haber menor radiación solar, el desperdicio de la misma es menor por lo que el rendimiento aumenta.

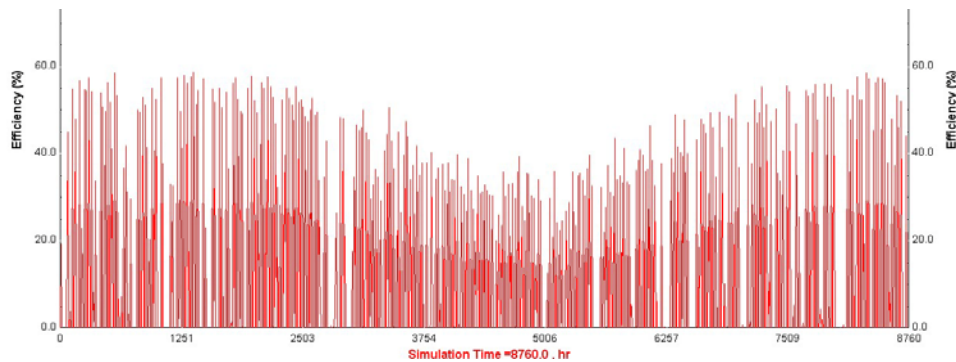


Figura 12. Eficiencia anual del campo de colectores

Temperaturas de funcionamiento del precalentador, generador de vapor y sobrecalentador

En las siguientes figuras se muestra la temperatura del vapor a la salida de cada uno de los componentes del sistema por los que circula.

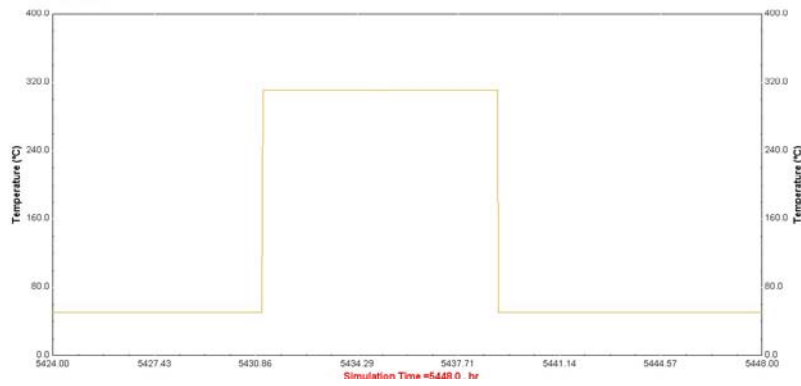


Figura 13. Temperatura del vapor a la salida del precalentador

Comparando el valor hallado en Moreno (2010) para la temperatura de salida del vapor en el precalentador (313,48 °C) y el gráfico (aproximadamente 315 °C) que se ha obtenido en la simulación se puede ver que el valor hallado analíticamente es correcto. Además, la forma de la gráfica muestra que la temperatura que se ha mencionado anteriormente se presenta únicamente durante las horas en que existe radiación solar.

En la Fig. 14 se muestra la temperatura de salida del vapor en los primeros meses del año.

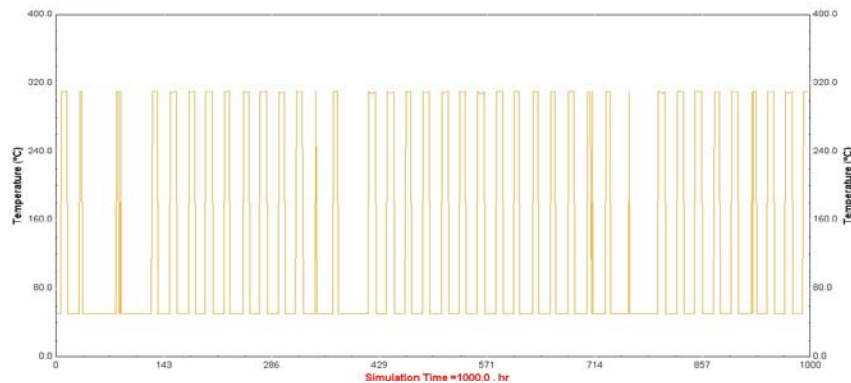


Figura 14. Temperatura del vapor a la salida del precalentador

En la Fig. 15 se puede ver la temperatura de salida del vapor en el generador de vapor (313,48 °C). Como se sabe en éste la temperatura no aumenta considerablemente tal como se menciona en *Moreno* (2010). El único proceso que se produce es un aumento de la calidad de vapor, el cual no incluye un aumento de temperatura. Es por esta razón que las figuras 13 y 15 son bastante similares.

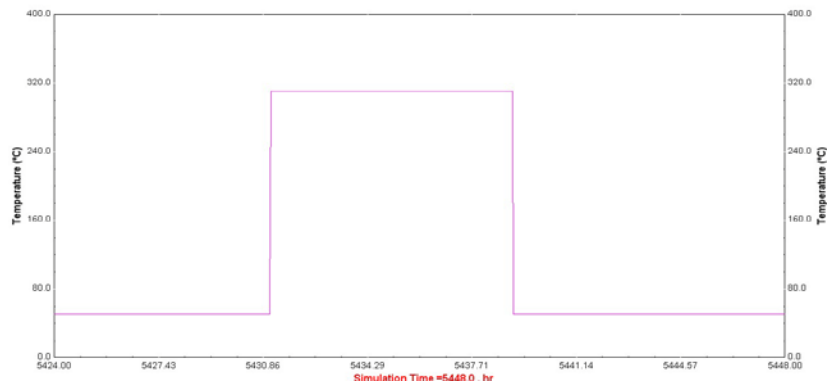


Figura 15. Temperatura del vapor a la salida del generador de vapor

En la Fig. 16 se tiene la temperatura de salida del vapor en el generador de vapor durante los primeros meses del año.

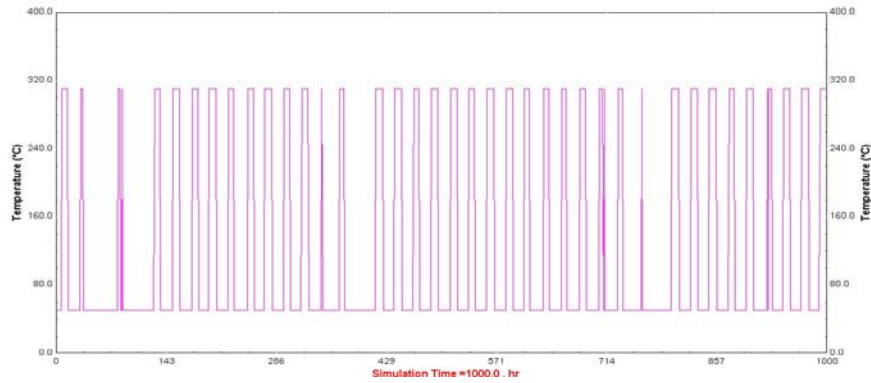


Figura 16. Temperatura del vapor a la salida del generador de vapor

Si se realiza una comparación entre el valor de la temperatura de salida del vapor en el sobrecalentador (371°C) mencionado en *Moreno* (2010) y el de la Fig. 17, el cual se ha obtenido en la simulación, se puede ver que ambos valores son aproximadamente los mismos. Dicha temperatura se alcanza únicamente en las horas en las que existe radiación solar, tal como se puede apreciar en la Fig. 17.

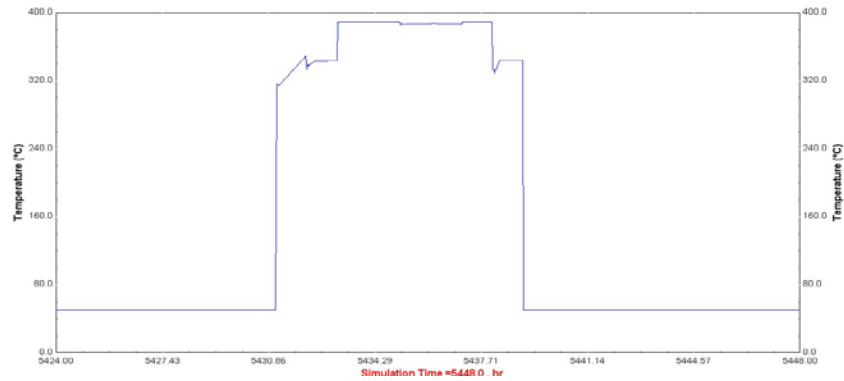


Figura 17. Temperatura del vapor a la salida del sobrecalentador

En la Fig. 18 se puede ver la temperatura de salida del vapor en el sobrecalentador durante todo el año.

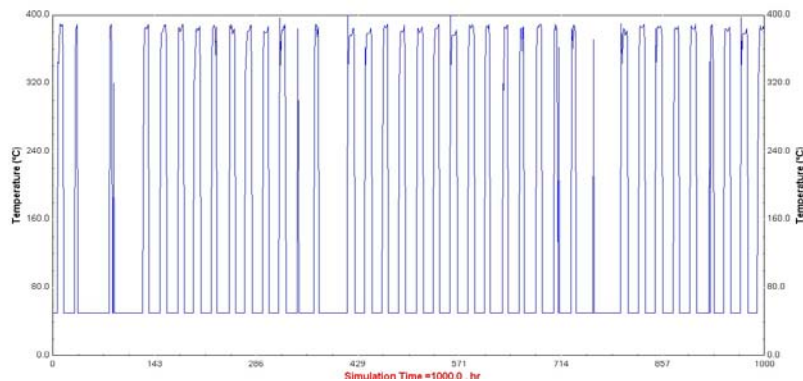


Figura 18. Temperatura del vapor a la salida del sobrecalentador

En la Fig. 19 se observan todas las temperaturas de vapor antes mencionadas y se puede comprobar lo afirmado sobre las temperaturas del precalentador y generador de vapor. La temperatura de salida del vapor es casi la misma en el precalentador y en el generador de vapor, mientras que la temperatura de salida del vapor en el sobrecalentador es superior a la del generador de vapor, como es de esperarse.

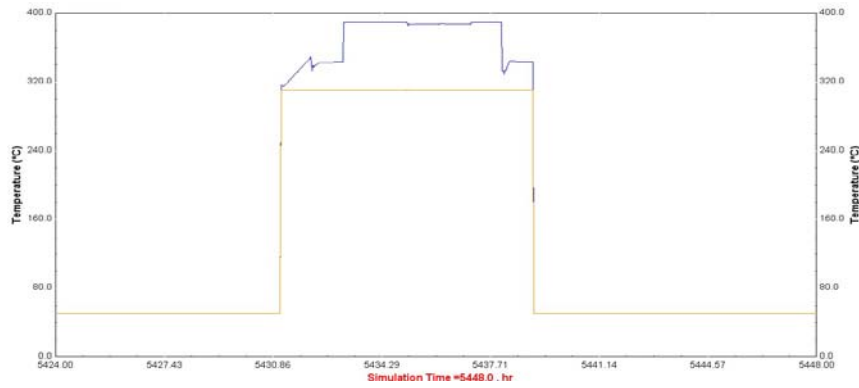


Figura 19. Comparación de las temperaturas de salida del vapor

En la Fig. 20 se aprecia las temperaturas de salida del vapor durante los primeros meses del año.

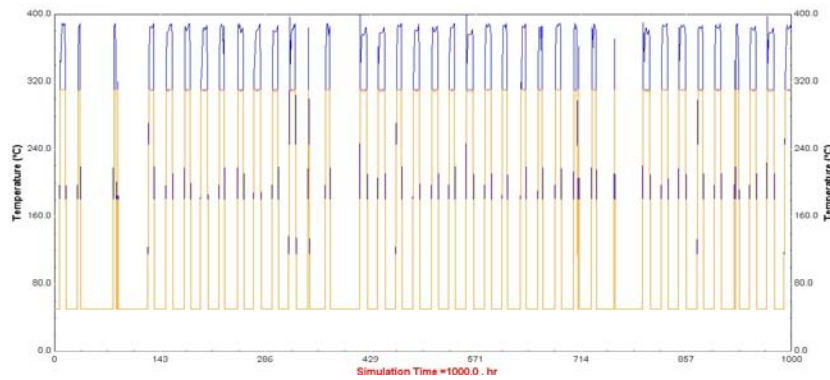


Figura 20. Comparación de las temperaturas de salida del vapor

Calor transferido

En las siguientes gráficas se muestra el calor transferido desde el fluido caliente (fluido caloportador) al fluido frío (vapor) en el precalentador y en el sobrecalentador.

En la Fig. 21 se puede observar el calor transferido en el precalentador. Se puede ver que el calor que se tiene en la gráfica es aproximado al de 15909.54 kJ/s (Moreno,2010).

Como es de esperar en las primeras horas del día la transferencia de calor es nula, pero a medida que varía la radiación solar, el calor transferido también varía, tal como lo indica la forma de la grafica.

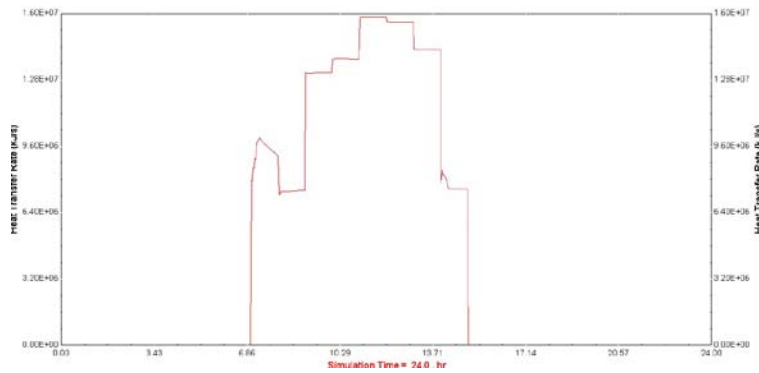


Figura 21. Calor transferido en el precalentador

En la Fig. 22 se tiene el calor transferido en el sobrecalentador, el cual se puede observar que es bastante aproximado a 10808.12 kJ/s (Moreno, 2010).

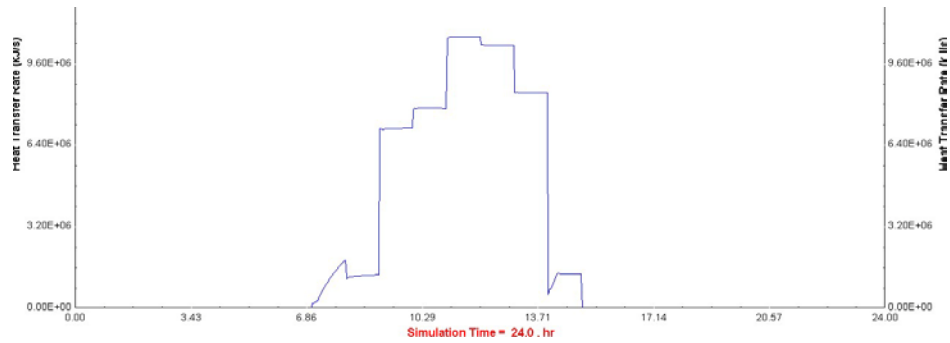


Figura 22. Calor transferido en el sobrecalentador

Energía eléctrica de salida

La planta termosolar que se está analizando produce una potencia bruta de 33 MW_e. Utilizando el programa TRNSYS se va a comprobar este valor y la variación de la energía eléctrica producida, ya que como es de esperar la producción de energía eléctrica no va a ser constante durante todo el día por las siguientes razones:

- La radiación solar no es constante durante todo el día; solamente se dispone de ella unas cuantas horas.
- No se utiliza combustible fósil.
- No se utiliza un sistema de almacenamiento térmico o químico.

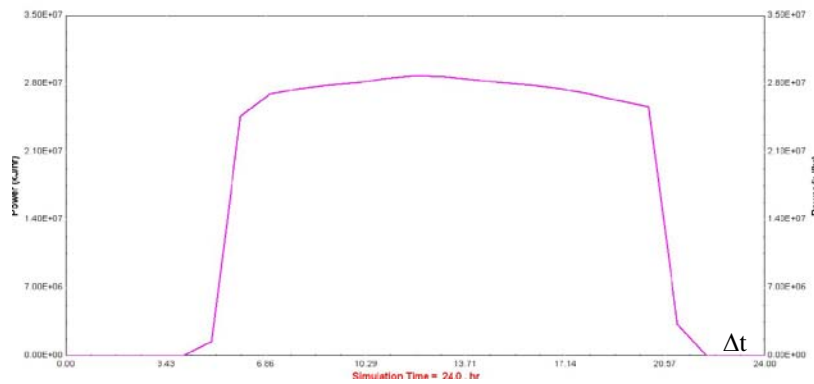


Figura 23. Energía eléctrica producida por la turbina de alta presión

Se debe tener en cuenta que las unidades de la gráfica anterior y la siguiente son kJ/h. En la Fig. 23 se puede ver que se alcanza un valor de 2.8×10^7 kJ/h que sería igual a 7.77 MW_e.

En la Fig. 24 se obtiene un valor de 8.78×10^7 kJ/h que será igual a 24.38 MW_e. La energía eléctrica total producida será igual a la suma de la producción de la turbina de alta y baja presión. La energía eléctrica total obtenida mediante la simulación es de 32.15 MW_e.

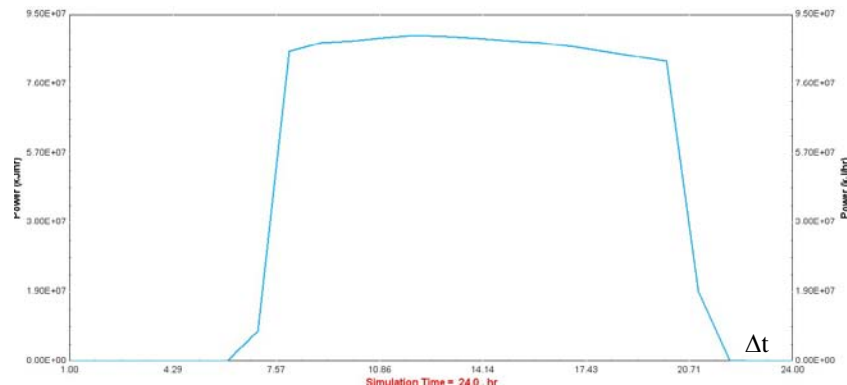


Figura 24. Energía eléctrica producida por la turbina de baja presión

En las figuras anteriores se puede apreciar cómo la producción de energía eléctrica varía a lo largo del día. En las primeras horas la producción es nula, pero conforme van apareciendo los primeros rayos solares y el efecto térmico se hace presente, la producción de energía eléctrica va aumentando hasta alcanzar su punto de funcionamiento. Horas más tarde cuando la radiación solar empieza a disminuir la producción de energía eléctrica disminuye hasta ser nula.

Eficiencia de la planta termosolar

Es de esperar que la eficiencia calculada mediante ecuaciones termodinámicas como las que se muestran en *Moreno* (2010) sea una eficiencia promedio ya que puede aumentar ligeramente en los meses de verano debido al aumento de la radiación solar, así como, también puede disminuir ligeramente en los meses de invierno por la disminución de la radiación solar.

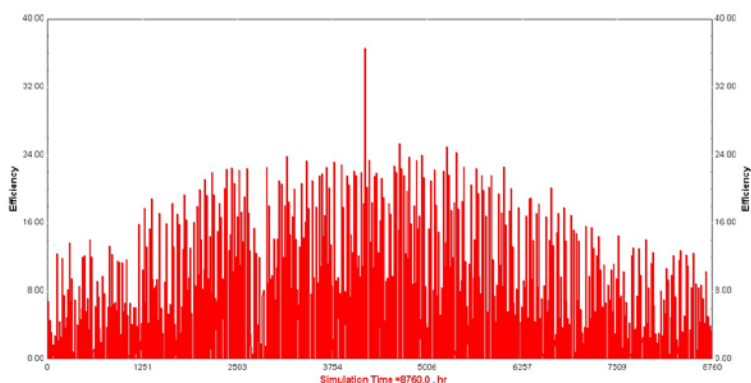


Figura 25. Eficiencia total de la planta termosolar

En la Fig. 25 se puede comprobar lo mencionado anteriormente, la eficiencia es mayor en los meses de verano y disminuye en los meses de invierno. Se puede afirmar que el valor promedio calculado para la eficiencia total de la planta termosolar es correcto ya que como se aprecia en el gráfico, la eficiencia es ligeramente mayor a 20.5% en verano y en invierno es menor a dicho valor.

3. CONCLUSIONES

- La energía solar constituye una de las fuentes de energías renovables con mayor potencial de crecimiento en los próximos años. La tecnología está ya probada y resulta viable lo que unido a los avances técnicos que se están produciendo permite augurarle un futuro prometedor.
- La tecnología solar que se ha presentado está lista para ser utilizada, no existen restricciones técnicas para su implementación, el único inconveniente se presenta en la parte económica ya que el costo de la construcción es considerablemente superior, alrededor de 8 veces, comparado con el de una planta de generación de energía eléctrica convencional.
- El alto costo de la instalación y la falta de primas gubernamentales hacen que esta tecnología sea poco atractiva para los inversionistas. Es necesario contar con un marco regulatorio apropiado y que sobre todo no perjudique al usuario final.
- Los sistemas de almacenamiento se presentan como dispositivos realmente favorables para compensar la variación de radiación solar directa durante las distintas épocas del año, para proporcionar energía eléctrica en horas pico y prolongar la producción de energía eléctrica de la planta termosolar durante la noche.
- El software TRNSYS es una herramienta muy útil cuando se trabaja con sistemas energéticos que involucran energía solar. Permite conocer el comportamiento del sistema en estado transitorio y las posibles variaciones al variar alguno de sus parámetros de funcionamiento.
- No es aventurado afirmar que se está ante la solución energética del futuro, una energía limpia, almacenable y, a mediano plazo, más barata que los combustibles fósiles.

REFERENCIAS

- Moreno Begazo, Bruno. (2010). *Análisis termodinámico y simulación de una planta termosolar de colectores cilindro parabólicos*. Tesis para grado de Ingeniero Mecánico Eléctrico. Universidad de Piura.
- Fernandez Salgado, José M^a. (2008). *Guía de la Energía Solar Térmica y Termoeléctrica*. Madrid, A. Madrid Vicente Ediciones.
- Garcia Casals, Xavier. (2001). *La Energía Solar Térmica de Alta Temperatura como Alternativa a las Centrales Térmicas Convencionales y Nucleares*.
- Garcia Casals, Xavier. *Optimización del Acoplamiento entre Subsistema Solar y Ciclo Termodinámico en Plantas Termosolares*. Tesis para grado de Ingeniero Aeronáutico. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.
- German Federal Minister for Education, Science, Research and Technology, *Status Report on Solar Trough Power Plants*. January 1996.
- Goswami, D.Y. (1999). *Energy Conversion*. Ed. Frank Kreith.
- Kearney, D. and Miller, C. (1988). *SEGS VI: Technical Evaluation of Project Feasibility*. Luz Solar Partners VI.
- Visual Models. *Levelized Cost of Energy Model* (2009). EEUU. En línea Internet. 2 de abril de 2009. Accesible en <http://visinomics.com/?p=763>

SIMULATION OF A SOLAR THERMAL PLANT OF CYLINDRICAL-PARABOLIC COLLECTORS

ABSTRACT. *This paper shows a simulation of a power plant from solar energy. Using the simulation program TRNSYS is verified the behavior of each of the components of a solar power plant in transient state according to the solar energy available and received. The relevance of this research lies in the fact that it is important to know in detail another form of power generation plants as an alternative to conventional electricity generation. Solar power, in addition to being a new alternative for the generation of electrical energy, is a renewable energy, which creates a minimal environmental pollution compared to conventional plants that generate electricity generation.*

Keywords: Solar power plant, Cylindrical-parabolic collectors, Solar energy.