

ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA CUYO COLECTOR POSEE INERCIA TÉRMICA.

Juan M. Lucchini, Rodolfo G. Stoll, Javier H. Garnica y Jorge R. Barral
Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería - Departamento de Mecánica
Ruta Nac. 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto
Tel/Fax: (0358) 4676588 - e-mail: mlucchini@ing.unrc.edu.ar

Recibido 12/08/13, Aceptado 24/09/13

RESUMEN: Se presenta aquí un análisis exergético de un sistema termosifónico con un colector que posee inercia térmica. Este estudio se plantea para el conjunto colector-tanque de almacenamiento utilizando balances de exergía en estado transitorio. Las ecuaciones correspondientes fueron incluidas en un modelo computacional validado experimentalmente, para determinar flujos exergéticos instantáneos, como así también eficiencias exergéticas instantáneas y acumuladas. El modelo fue corrido para días completos con datos climáticos reales y de extracción prefijados para cuatro personas, resolviéndose sistemas de ecuaciones diferenciales mediante diferencias finitas. Considerando la variabilidad de la temperatura ambiente, se propone la utilización de la temperatura promedio diaria como referencia para el estado muerto. Se presentan los resultados mediante gráficos de exergía acumulados en el tanque y en el colector, como así también en diagramas exergéticos que permiten visualizar los efectos transitorios a que se ve sometido el sistema a lo largo del día.

Palabras clave: exergía, energía solar, simulación, termosifón, agua caliente, inercia térmica.

INTRODUCCIÓN

El análisis exergético es una herramienta basada en la segunda ley de la Termodinámica, muy adecuada para la evaluación de irreversibilidades, y particularmente útil en el caso de sistemas con varios componentes, ya que los mismos pueden ser tratados independientemente, como si fuera cada uno un sistema abierto (Bejan, 1994). Así, con este método es posible evaluar las pérdidas de energía disponible de cada componente o parte de la instalación del sistema por separado mediante el concepto de destrucción de exergía.

La exergía es la propiedad usada para determinar trabajo útil potencial máximo de una dada cantidad de energía de un sistema respecto a un estado denominado “estado muerto”, hacia el cual iría dicho sistema realizando evoluciones teóricamente reversibles, de modo tal que alcanzadas las propiedades del estado muerto, el sistema queda imposibilitado de entregar exergía. Es importante comprender que la exergía no representa la cantidad de trabajo que puede producir el mecanismo en las actuales condiciones, más bien representa el límite superior de la cantidad de trabajo que un dispositivo podría producir sin violar ninguna de las leyes de la termodinámica (Çengel y Boles, 2006).

El análisis exergético usa los principios de conservación de masa y energía, junto con la segunda ley de la termodinámica para el diseño y análisis de sistemas térmicos. Los procedimientos usados en este método permiten identificar el lugar, tipo y magnitud real de las pérdidas que se producen (Moran y Shapiro, 1995). Es posible también realizar una comparación de la obtención de una cierta cantidad de energía en función de la realmente disponible para las condiciones del entorno en que se encuentra inmerso dicho proceso, lo cual nos conduce al concepto de eficiencia exergética. Surge además la idea de que la exergía “se destruye”, es decir, lo que no se aprovecha de lo disponible, se pierde. Este concepto es mucho más conveniente que la “conservación” de la energía, que a veces puede tenerse pero no darse las condiciones para aprovecharla, y el de la “generación” de entropía que permite decir cuán irreversible es un proceso pero no da pistas acerca de qué variables deben mejorarse para su disminución. Una de las grandes ventajas del método exergético es que es aplicable a cada componente de un sistema por separado y permite así averiguar la eficiencia del mismo independientemente de los otros componentes.

En el año 2003, Petela presentó una discusión sobre la forma de calcular la exergía de la radiación térmica; este autor estableció allí una fórmula para convertir la exergía de radiación en trabajo o calor. Hepbasli (2008), dentro de una revisión de exergía aplicable a energías renovables, comparó esta fórmula con las de otros investigadores y llegó a la conclusión de que todas las fórmulas son correctas. Se adopta en este trabajo como exergía de emisión térmica a la fórmula de Petela.

Rosen (2001) realizó un análisis exergético y energético de los sistemas de almacenamiento de energía térmica, proponiendo seis modelos de distribución de temperatura para la estratificación de los tanques y demostró cómo la estratificación aumenta la disponibilidad de exergía. Consecuentemente un análisis exergético provee una herramienta para el análisis, comparación y diseño de los sistemas de almacenamiento. Asimismo, realizando un análisis exergético sobre los tanques verticales de almacenamiento, Rosen y Dincer (2003) llegaron a la conclusión de que este análisis es muy importante para un buen entendimiento de la disponibilidad termodinámica de un sistema de almacenamiento y para evaluar, comparar y mejorar su eficiencia racionalmente mediante balances exergético.

Con estos balances, es entonces posible tener en cuenta la pérdida de utilidad de la energía almacenada y por lo tanto reflejar más correctamente el valor termodinámico y económico de la operación de almacenamiento. Algunas ventajas del análisis exergético en los tanques verticales de almacenamiento fueron: la reducción de pérdidas de calor mejorando los niveles de aislación y la disposición geométrica de las cañerías, la disminución de las pérdidas por mezclado que rompen la estratificación, y la reducción de la potencia de las bombas y de la fricción de los fluidos (Rosen et. al., 2004). En cuanto a colectores el método exergético ha sido utilizado para el análisis de estos desde el punto de vista de su diseño para prestaciones óptimas (Torres Reyes et. al, 2001), análisis que han sido hechos en estado estacionario.

Teniendo en cuenta estos dos componentes fundamentales de un sistema termosifónico, Barral et al. (2004) proponen evaluar el rendimiento exergético completo de un sistema. Allí, cada uno de sus componentes es tratado independientemente considerándolos por separado como sistemas abiertos para luego unirlos en un diagrama exergético. Se evalúan así las pérdidas de energía disponible de cada elemento por separado mediante el concepto de destrucción de exergía, identificándose los puntos críticos y cuantificando la magnitud de destrucción de exergía en cada uno de ellos.

Lucchini et al. (2012) han trabajado sobre un sistema termosifónico en el cual el colector posee una inercia térmica importante; este sistema fue estudiado tanto en forma experimental como analítica. Para dicho sistema termosifónico se desarrolló un modelo físico-matemático, el cual fue validado y se utiliza para correr simulaciones. En el presente trabajo el objetivo fue realizar el análisis exergético de este sistema, para poder identificar aquellas partes que más comprometen al sistema termosifónico en cuanto a la destrucción de exergía. Para ello, se plantearon los balances exergéticos, y las ecuaciones correspondientes fueron montadas al algoritmo previamente desarrollado, para poder cuantificar así valores instantáneos y acumulados.

En este trabajo, en una primera sección se describe brevemente la configuración física del sistema y las mediciones realizadas sobre el mismo. Luego se realiza el planteamiento analítico de las ecuaciones para los balances exergéticos y se plantean las eficiencias exergéticas instantánea del colector y acumulada del sistema. Seguidamente, se explica la incorporación de estas ecuaciones en el algoritmo de simulación del equipamiento termosifónico. Finalmente, se muestran los resultados con gráficos de flujos exergéticos, eficiencia exergética del colector y diagramas exergéticos instantáneos a distintas horas del día y condiciones de funcionamiento.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y EQUIPAMIENTO DE MEDICIÓN

El desarrollo del estudio exergético se basó en datos recolectados de un sistema termosifónico con colector con cierta inercia térmica y un programa de simulación de temperaturas de dicho sistema descrito por Lucchini et al. (2012). A continuación se reproducen las principales características de dicho sistema.

El sistema termosifónico en estudio se compone de un tanque aislado, un colector y caños de conexión, que se muestra en la Fig. 1. La particularidad de este sistema es el diseño del colector, que posee cierta inercia térmica, mostrándose los detalles constructivos del mismo en la Fig. 2. La placa colectora (a) está formada por dos láminas metálicas, cada una de ellas con muchos plegados en forma triangular y unidas mediante una soldadura. El fluido caloportador ingresa por un tubo (b) y pasa a un cabezal (c) donde se distribuye por los distintos canales (d) formados al construir el absorbedor. Este absorbedor presenta dos ventajas: (a) los canales formados tienen un volumen considerable comparado con los colectores clásicos, aumentando la inercia térmica del colector, y (b) la forma acanalada de la placa colectora resiste de mejor manera la dilatación por el congelamiento del fluido caloportador.



Figura 1: Sistema termosifónico en estudio.

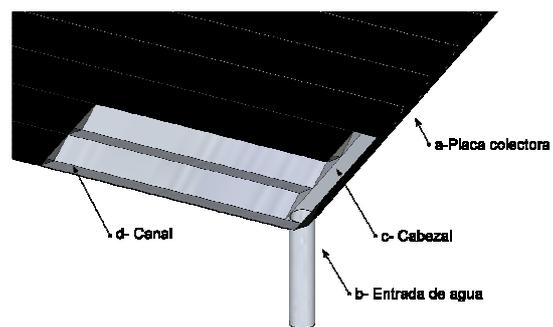


Figura 2: Detalle de colector en estudio.

El tanque de almacenamiento, que se muestra en la Fig. 3, se compone de un tanque de acero inoxidable (a) de 980 mm de alto y 685 mm de diámetro, aislado con poliestireno expandido granulado (b), con 120 mm de espesor en su lateral y 50 mm de espesor en las superficies superior e inferior; además, posee un recubrimiento exterior de chapa galvanizada (c) de calibre 28. Cuenta con tres conexiones de 20 mm de diámetro: una situada en el fondo del tanque (d), que se utiliza tanto para la entrada del agua fría de la red como salida de agua fría hacia el colector, la cual tiene un deflector (e) a fin de evitar el rompimiento de la estratificación del agua almacenada en el tanque por la entrada de agua fría (Hollands y Lightsone, 1986); otra situada en la parte superior del tanque (f), la cual se utiliza para venteo de los gases del sistema, y salida de agua caliente hacia la red; y una tercera, ubicada en el lateral (g), cerca de la parte inferior, que es la entrada de agua caliente que proviene del colector. Conectada a esta última, va una cañería vertical perforada en el interior del tanque (h) que tiene como función evitar que se rompa la estratificación (Duffie y Beckman, 2006; Hollands y Lightsone, 1986). Adicionalmente, se montó otra

cañería de 20 mm, que entra verticalmente por la parte superior (i), dotada con un conjunto de termocuplas, para ser medir las temperaturas que se utilizaron en el desarrollo experimental-analítico de este trabajo.

El colector que se muestra en la Fig. 4. Sus dimensiones exteriores son: 2500 mm de ancho, 1000 mm de alto y 100 mm de espesor. Esta provisto de dos conexiones para la entrada de agua (en forma paralela) de diámetro nominal 12,7 mm (a), ubicadas en las esquinas inferiores del colector y una para la salida de agua de diámetro nominal 20,05 mm (b), ubicada en la mitad de la parte superior. La placa colectora (c) posee 2460 mm de ancho y 960 mm de alto, se coloca en un recinto de chapa galvanizada de calibre 22 (g). Este recinto se encarga de dar rigidez mecánica a todos los componentes y protegerlos de los factores climáticos. La placa absorbidora se encuentra aislada térmicamente en su superficie posterior con fibra de vidrio de 20 mm de espesor (d) y poliestireno expandido de 40 mm de espesor (e). La parte frontal del recinto posee una cubierta transparente de policarbonato alveolar de 4 mm de espesor (f). Esta cubierta transparente permite el paso de la energía radiante del sol, que es mayormente absorbida, y genera el efecto invernadero dentro del recinto.

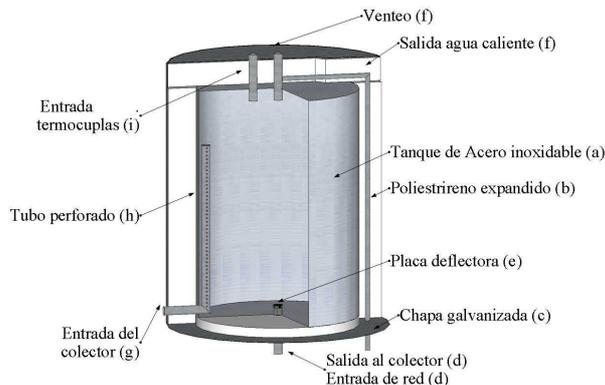


Figura 3: Corte esquemático del tanque de almacenamiento.

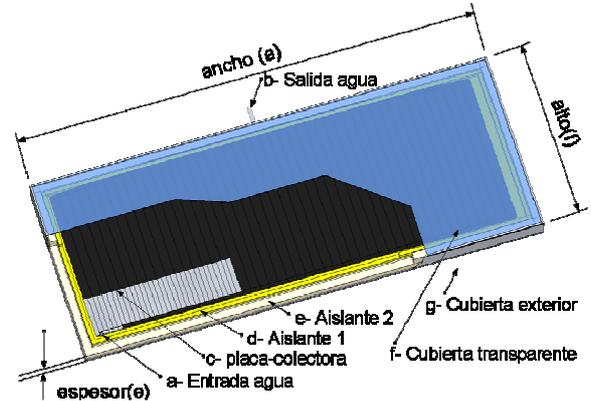


Figura 4: Corte esquemático del colector.

En la Fig. 5 se muestra el esquema de la ubicación de las termocuplas en el interior del tanque, y en la Fig. 6 se muestra la disposición de cada termocupla en el colector, sobre la placa absorbidora. Para las mediciones de temperaturas se emplearon termocuplas tipo T. Además de las temperaturas en el sistema, se registró la radiación solar global y la radiación sobre el plano del colector, utilizando dos piranómetros fotovoltaicos marca LI-COR. Todos los datos fueron tomados y almacenados por un sistema de adquisición de datos Agilent modelo 34970A. Una estación meteorológica marca PEGASUS modelo EP2000 se usó para registrar la velocidad del viento, humedad relativa y temperatura ambiente.



Figura 5: Esquema de los nodos y ubicación de las termocuplas en el tanque.

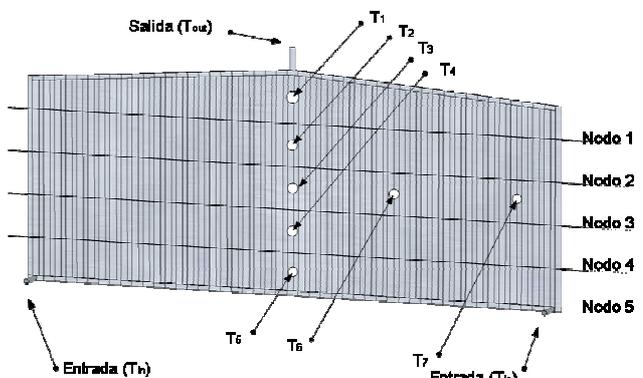


Figura 6: Esquema de los nodos y ubicación de las termocuplas en el colector.

ESTUDIO ANALÍTICO DEL SISTEMA

El modelo físico-matemático sobre el que se trabajó el sistema es el propuesto por Lucchini et al. (2012), donde el modelo de colector consiste de cinco nodos con temperatura uniforme. De igual forma, se consideró dividido el tanque de almacenamiento. En cada uno de ellos se realizó un balance de energía y las ecuaciones resultantes quedaron concatenadas entre sí. Dicho modelo fue validado experimentalmente comparando valores simulados con resultados reales medidos en un prototipo. Sobre este modelo del sistema se incorporaron adecuadamente las ecuaciones que se muestran seguidamente, de la (1) a la (13), a fin de poder realizar los correspondientes balances de exergía y cálculos de eficiencias. Los datos climáticos, geometría del sistema, propiedades termofísicas y variables de operación, fueron los mismos que se utilizaron en el mencionado trabajo anterior.

La ecuación propuesta por Petela para la exergía del sol es:

$$\dot{\chi}_{sol} = A_c \cdot G \cdot (\tau\alpha) \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{T_a}{T_{sol}} + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T_a}{T_{sol}} \right)^4 \right] \quad (1)$$

donde A_c es el área del colector, G es la irradiación en el plano del colector, $(\tau\alpha)$ es el producto transmitancia-absortancia efectiva del colector, T_a es la temperatura ambiente y T_{sol} es la temperatura de la superficie del sol. Para esta última se adoptó el valor de 5777 K, de acuerdo a lo recomendado por Iqbal (1983).

La exergía de flujo por unidad de masa para un volumen de control (Çengel y Boles, 2006) es:

$$\psi = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \quad (2)$$

donde h es la entalpía del agua, h_0 es la entalpía del agua en el estado muerto, T_0 es la temperatura del agua en el estado muerto, s es la entalpía del agua, s_0 es la entalpía del agua en el estado muerto, v es la velocidad del agua en la cañería, g es la aceleración de la gravedad y z la altura del punto donde se está aplicando esta ecuación, medida desde el nivel horizontal más bajo de la cañería del equipo termosifónico.

Los dos últimos términos de la ecuación (2), energía cinética específica y energía potencial específica respectivamente, pueden despreciarse por comparación con los altos valores que toman la entropía y la entalpía en estos casos. Luego, por tratarse de un fluido incompresible, los dos primeros términos de la ecuación (2) se calculan como:

$$h - h_0 = c_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} \quad (3)$$

$$s - s_0 = c_p \cdot (T - T_0) \quad (4)$$

donde c_p es el calor específico del agua y T la temperatura del agua.

Por lo que resultan las siguientes fórmulas para calcular el flujo de entrada y de salida.

$$\dot{\chi}_{ent} = \dot{m}_{ent} \cdot c_p \cdot \left[T_{ent} - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T_{ent}}{T_0} \right] \quad (5)$$

$$\dot{\chi}_{sal} = \dot{m}_{sal} \cdot c_p \cdot \left[T_{sal} - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T_{sal}}{T_0} \right] \quad (6)$$

donde \dot{m}_{ent} y \dot{m}_{sal} son los flujos másicos de entrada y de salida respectivamente, T_{ent} y T_{sal} las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del volumen de control que se esté considerando.

Ahora bien, para un sistema cerrado como se pueden considerar los nodos del colector y del tanque, la exergía por unidad de masa se calcula mediante:

$$\phi = (u - u_0) + P \cdot (V - V_0) - T_0 \cdot (s - s_0) + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \quad (7)$$

donde u es la energía interna del agua del sistema cerrado, u_0 es la energía interna referida a condiciones de punto muerto, P es la presión, V es el volumen del sistema, y V_0 es el volumen en condiciones de punto muerto.

Al igual que antes, se puede considerar que los dos últimos términos de la ecuación (7) son despreciables frente a la energía interna. El producto $T\Delta s$, puede ser tratado mediante la aproximación de un fluido incompresible. La diferencia de volúmenes es también despreciable. A la temperatura y presión que se trabaja, la energía interna se puede aproximar a la entalpía. Por lo tanto, el cálculo para cada nodo se puede hacer mediante la siguiente ecuación:

$$\chi_{nodo} = m_{nodo} \cdot c_p \cdot \left[(T_{nodo} - T_0) - T_0 \cdot \ln \frac{T_{nodo}}{T_0} \right] \quad (8)$$

Para un balance de exergía para cada nodo del colector, considerándolo como un volumen de control para un sistema de flujo en un instante dado se puede plantear:

$$\dot{\chi}_{sol} + \dot{\chi}_{ent_c} - \dot{\chi}_{sal_c} - \dot{\chi}_{dest_c} = \frac{\chi_{nodo_c}^{t+1} - \chi_{nodo_c}^t}{\Delta t} \quad (9)$$

Por lo que la exergía destruida en el colector resulta:

$$\dot{\chi}_{dest_c} = \dot{\chi}_{sol} + \dot{\chi}_{ent_c} - \dot{\chi}_{sal_c} - \frac{\chi_{nodo_c}^{t+1} - \chi_{nodo_c}^t}{\Delta t} \quad (10)$$

Similarmente para el tanque de almacenamiento se puede escribir:

$$\dot{\chi}_{dest_t} = \dot{\chi}_{ent_t} - \dot{\chi}_{sal_t} - \frac{\chi_{nodo_t}^{t+1} - \chi_{nodo_t}^t}{\Delta t} \quad (11)$$

Habitualmente se toman como propiedades intensivas del estado muerto a la temperatura y presión del medio ambiente; identificándolas como T_0 y P_0 . En este desarrollo, dado que los cálculos se podrían realizar para distintos días del año, cabe preguntarse cuál sería la temperatura a tomar como referencia para el estado muerto, habida cuenta las grandes variaciones de temperaturas medias que se dan de acuerdo a las distintas estaciones del año. Asimismo, para un mismo día, se verifica que se arribaría a resultados ilógicos con la adopción de la temperatura ambiente en los valores que ésta va tomando a lo largo del día, que podría ir a altos y bajos. Por esta razón, luego de una serie de evaluaciones preliminares, se descarta la utilización de la temperatura media anual como referencia para el punto muerto, y se observa como conveniente trabajar en este estudio con cada día por separado, adoptando como T_0 a la temperatura media de cada día considerado.

El rendimiento exergético instantáneo del colector según Hepbasli se puede definir como la relación del incremento de la exergía en el agua respecto a la exergía entrante, que en el caso del sistema completo, se trata de la provista por el sol únicamente. En la ecuación (12) se puede apreciar que no sólo se cuantifica el flujo exergético de la entrada y salida del colector, sino también el acumulado en los nodos del colector. Esta definición tiene la dificultad de que el rendimiento puede ser negativo en las últimas horas de radiación solar, ya que la exergía extraída es proveniente mayormente de los nodos. Por lo tanto, dichos valores negativos no deben ser considerados. Como se puede apreciar, este rendimiento instantáneo del colector se puede calcular solo en las horas de irradiación solar.

$$\eta_{inst} = \left(\dot{\chi}_{sal_c} - \dot{\chi}_{ent_c} + \sum_1^5 \frac{\chi_{nodo_c}^{t+1} - \chi_{nodo_c}^t}{\Delta t} \right) / \dot{\chi}_{sol} \quad (12)$$

Como el rendimiento del sistema completo no se lo puede realizar en forma instantánea, se lo hace a lo largo de un periodo de 24 hs, en donde el incremento de exergía se cuantifica como la suma de las distintas exergías acumuladas en cada periodo de tiempo más la diferencia entre la exergía que se usó en el consumo de la red y lo que esta aportó al sistema. En esta ecuación no se tiene en cuenta lo acumulado por el colector ya que en el periodo completo de un día la temperatura inicial y final del colector es la misma, como se observa en la ecuación (13).

$$\eta_{diario} = \sum_0^{24hs} \left[(\dot{\chi}_{sal_sc} - \dot{\chi}_{ent_sc}) \Delta t + \sum_1^5 \chi_{nodo_t}^{t+1} - \chi_{nodo_t}^t \right] / (\dot{\chi}_{sol} \Delta t) \quad (13)$$

En esta ecuación, el subíndice sal_sc indica el agua caliente que extrae el usuario del sistema en un proceso de descarga, mientras que el subíndice ent_sc es el agua fría de reposición que proviene de la red.

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

Al modelo físico-matemático previamente desarrollado se le incorporaron las fórmulas descriptas y deducidas en la sección anterior y se procedió a realizar los cálculos correspondientes en el programa de simulación. Los procedimientos de resolución se basan en el método de diferencias finitas. En la Fig. 7 se observa un diagrama de bloques simplificado, donde se muestran los principales pasos del programa de simulación.

En la corrida de este modelo, mediante distintas subrutinas, se tratan primeramente los datos para que todos tengan la misma base de tiempo (ya que son leídos por distintos equipos de medición) y se toma el valor promedio de cada variable en el salto de tiempo (Δt) considerado. Esto se realiza para evitar variaciones bruscas que se podrían dar sobre todo en los procesos de medición de variables climáticas (sombros por nubes, ráfagas de viento, etc.).

Se van calculando los valores instantáneos anteriormente descriptos en términos de flujos exergéticos y para los cálculos de exergía se integran estos flujos tomando 600 segundos como intervalo de tiempo.

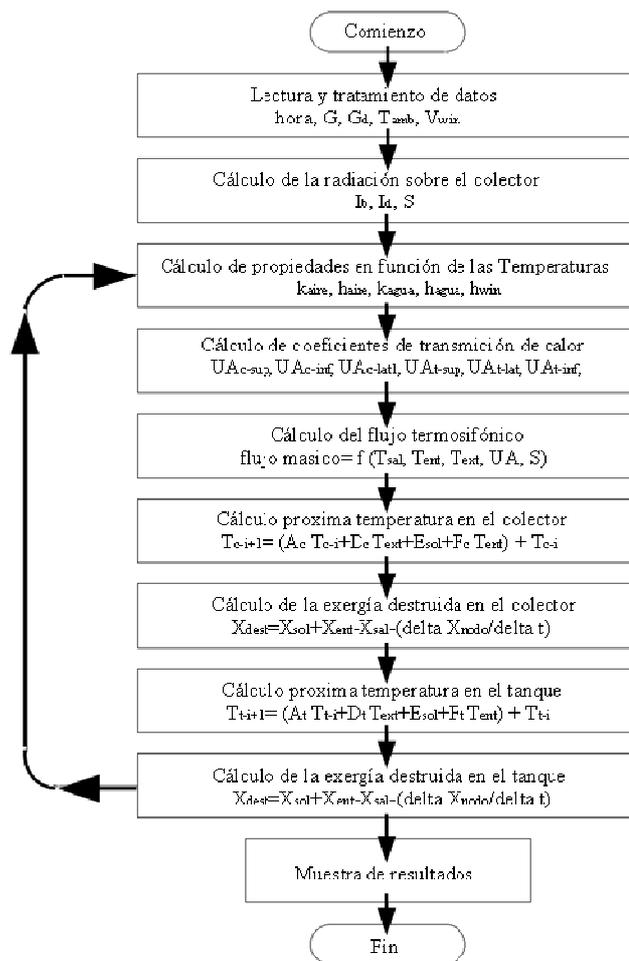


Figura 7: Diagrama de bloque del programa de simulación.

RESULTADOS

Los resultados se grafican a través de un diagrama exergético donde los rectángulos representan al colector (a) y al tanque almacenador (b) y las flechas de distintos colores, representan entradas y salidas del flujo exergético como se muestra en la Fig. 8. El ancho de estas flechas está a escala respecto al valor del correspondiente flujo. Cabe acotar, que a diferencia de los diagramas que se encuentran en la bibliografía, estos que se presentan aquí indican además del flujo exergético la acumulación o vaciado de exergía en un determinado tiempo (600 segundos). Esto último se indica a través de líneas verde claro (acumulación) o verde oscuro (vaciado). Para facilitar la comprensión al lado de cada flecha se pone una leyenda en donde el primer número hace referencia al tipo de flujo exergético a que se refiere (proveniente del sol, de destrucción, etc.) y separado con una barra la cantidad de flujo exergético con su correspondiente unidad.

En la Fig. 8 se muestra el sistema a las 7:30 hs solar en donde el flujo de exergía que llega del sol (1) en el colector (a) es relativamente poco (144 W), no existe un flujo de intercambio de exergía entre el colector (a) y el tanque de almacenamiento (b) ya que todavía no se produjo la circulación termosifónica. Aquí, tanto el flujo de exergía debido a las pérdidas de calor (5) del colector (4 W) como del tanque (8 W) son mínimas. En cuanto al flujo que aporta a la acumulación de exergía en el intervalo de tiempo (4) tanto en el colector (+6 W) como en el tanque (-8 W) son mínimas y sólo se observa un flujo de destrucción de exergía (6) en el colector (135 W).

En cambio, en la Fig. 9, se observa claramente un flujo exergético (1500 W) proveniente del sol (1); también existe un flujo termosifónico entre el colector (a) y el tanque (b), lo que causa un flujo de exergía (2) del colector hacia el tanque (190 W) que es mayor que el flujo en sentido inverso (3), del tanque hacia el colector (90 W). Existe además una acumulación de exergía (4) que es mayor en el tanque (+57 W) que en el colector (+12 W). Es notable la diferencia de flujo de destrucción de exergía (6) entre el colector (1297 W) y el tanque (35 W). Al mismo tiempo, aumentó de manera significativa el flujo de pérdidas de exergía (5) en el colector (137 W) mientras que las pérdidas del tanque se mantuvieron iguales (8 W).

Muy similar es el análisis de la Fig. 10 a las 16 hs que al de la Fig. 8, con la salvedad que el flujo de pérdidas exergéticas (6) en el colector es mayor (374 W) dado que en este caso la parte de la cubierta transparente está todavía a temperatura elevada y es por allí donde hay un alto porcentaje de flujo de pérdidas de exergía. Mientras que en el tanque no se observa flujo de destrucción de exergía y el flujo de pérdidas de exergía (5) sigue siendo mínimo (8 W).

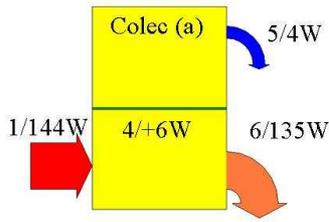


Figura 8: Diagrama exergético, 7 hs solar sin descarga.

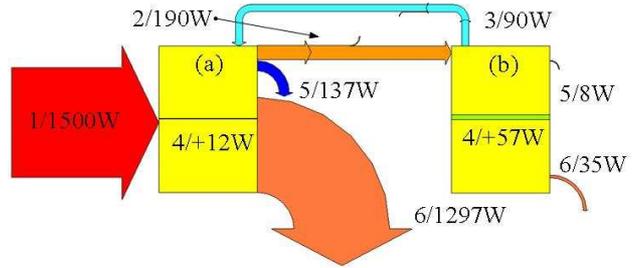


Figura 9: Diagrama exergético, 12 hs solar sin descarga.

En la Fig. 11, en donde el flujo de pérdidas (5) y destrucción (6) de exergía en el colector son mínimas (20 W y 30 W), se observa un flujo de descarga de exergía (4) proveniente del colector (-50 W), la cual compensa las anteriores. Es importante destacar el flujo de exergía (8) que se extrae en el consumo de agua caliente por el usuario (1190 W), el cual proviene de la acumulación de exergía en el intervalo de tiempo (4) del tanque (-1515 W). Además, existe un flujo de pérdida de exergía (5) en el tanque (5 W) como también una destrucción de exergía (6) (310 W). Por último, se observa un flujo de exergía (7) proveniente de la alimentación de red (10 W), que es casi nula por estar su temperatura casi igual a la del ambiente.

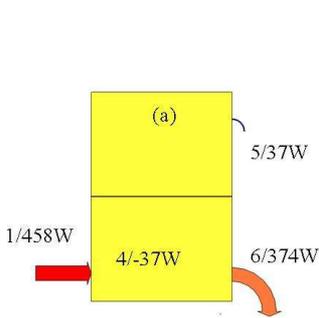


Figura 10: Diagrama exergético, 16 hs solar sin descarga.

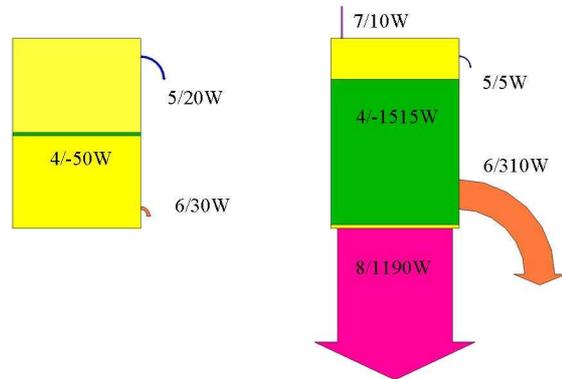


Figura 11: Diagrama exergético, 18 hs solar con descarga.

En la Fig. 12 se presentan caudales de flujo termosifónico (en rojo) y de extracción (en azul). En la Fig. 13 se observan valores de exergía acumulada tanto del colector (en rojo) como del tanque (en azul). En ella podemos notar que la exergía del colector aumenta y disminuye correspondiendo a las horas de radiación solar sin acumular exergía al final del día, y presentando un desfase con respecto al flujo termosifónico del sistema presentado en la Fig. 12. Por otra parte, se observa en la Fig. 13 que en el tanque de almacenamiento la exergía al comienzo disminuye y luego comienza a crecer después de 30 minutos aproximadamente en que se estableció el flujo termosifónico. Cuando comienza a tener un valor constante se nota una gran disminución del flujo exergético, lo cual coincide con la extracción de agua caliente del tanque, cuyo caudal se ve en la Fig. 12; esto demuestra el correcto horario de utilización del agua caliente ya que tiene la máxima exergía recolectada en el día.

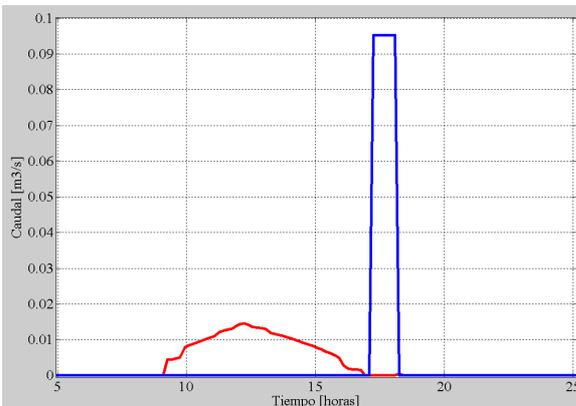


Figura 12: Caudales.
Termosifónico (rojo), de extracción (azul).

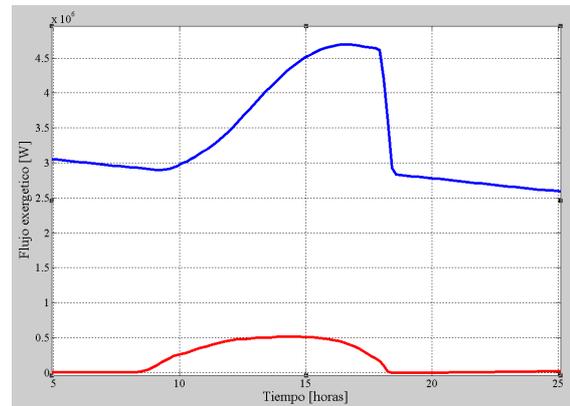


Figura 13: Exergía acumulada.
Tanque (azul), Colector (rojo).

En la Fig. 14 se graficaron los valores de eficiencia de exergía instantáneos del colector, en donde se puede ver que al comienzo del periodo de radiación solar llegó al 10 %. Esto se debe a que el colector tiene menos temperatura y por lo tanto menos pérdidas de exergía. Luego, con valores que oscilaron entre un 8 % y un 6 %, se mantuvo la eficiencia durante casi todo el periodo, ya que las pérdidas de exergía del sistema tienen un valor constante. Finalmente, la eficiencia empieza a

decaer, llegando a ser negativa al final del periodo, que como ya se dijo, no debe considerarse. Por otra parte, el cálculo de la eficiencia del sistema al término de 24 hs da como resultado 11,45 %. Estos bajos rendimientos se deben a que la energía obtenida del colector es de baja calidad, y a diferencia de los resultados de eficiencia de sistemas publicado en la revisión de Hepbaslı (2008), que son menores, se debe probablemente que el sistema de almacenamiento tiene buena aislación y poca destrucción de exergía en la circulación del fluido, tanto en la termosifónica como en la de extracción.



Figura 14: Rendimiento instantáneo del colector

CONCLUSIONES

En primer lugar debemos resaltar el hecho que el cálculo del flujo exergético resulta muy sensible a la temperatura tomada como referencia (T_0), por lo que si a ésta la tomamos como la temperatura ambiente instantánea en cada paso del cálculo, en lugares donde existe una gran amplitud térmica durante el día, los gráficos del flujo de exergía cambiarían sustancialmente. Si se la deja constante durante el día hay que tomar un criterio para fijarla, por ejemplo la media del periodo que estemos considerando, que fue el criterio adoptado en este trabajo, por lo explicado anteriormente.

En lo que respecta a la eficiencia exergética, se realizaron cálculos de valores instantáneos sólo para el colector en horas de irradiación solar. Para el sistema completo se tomaron valores acumulados en el periodo total de tiempo, en este caso un día, para obtener rendimientos diarios. Esto se debe a que el momento de extracción de exergía del sistema no coincide con el proceso de acumulación de exergía.

Podemos concluir que se ha obtenido un modelo analítico que permite evaluar la exergía de un sistema termosifónico, teniendo en cuenta la inercia térmica del colector. Por lo que podemos decir que se cuenta con una herramienta de simulación que permite conocer no solo la eficiencia instantánea del colector o la del sistema en un periodo de tiempo, como el de 24 hs, sino también poder realizar cálculos de flujo de destrucción de exergía y pérdidas tanto en el colector como en el tanque almacenador.

Los diagramas de exergía para distintas horas del día permiten visualizar los efectos de los transitorios tanto en el colector como en el tanque de almacenamiento. De esta manera, se puede también observar la poca destrucción de exergía y la buena aislación del tanque de almacenamiento. Asimismo se puede observar la gran pérdida de exergía y de destrucción de exergía del colector en las horas de irradiación solar.

La herramienta desarrollada tiene la particularidad de manejar situaciones de estado transitorio, lo cual es un avance importante sobre los casos clásicos, que solo muestran resultados con validez para el estado estacionario. Con procedimientos similares, se podrían plantear análisis exergéticos para otros sistemas complejos que contengan componentes de alta inercia térmica. A partir de allí, se podrían identificar los puntos críticos del sistema real, para formular propuestas que permitan optimizar diseños y utilización de materiales, mediante un análisis de sensibilidad de las variables presentes en el modelo.

NOMENCLATURA

χ	= Exergía. [J]	T	= Temperatura. [°K]
$\dot{\chi}$	= Flujo exergético. [W]	u	= Energía interna. [J/kg]
ψ	= Flujo exergético por unidad de masa. [W]	V	= Volumen. [m ³]
ϕ	= Exergía por unidad de masa. [J]	v	= Velocidad. [m/s]
$\tau\alpha$	= Producto de la transmitancia-absorbancia efectiva. [adimensional]		Subíndice
Δt	= Intervalo de tiempo. [s]	a	= Ambiente.
A	= Área. [m ²]	c	= Colector.
c_p	= Calor específico. [J/(kg °K)]	dest	= Destrucción.
G	= Irradiancia en el plano del colector [W/m ²]	ent	= Entrada.
g	= Gravedad. [m/s ²]	nodo	= Nodo.
h	= Entalpía. [J/kg]	0	= Estado Muerto.
m	= Masa. [kg]	sal	= Salida.

\dot{m} = Flujo másico. [kg/s]
P = Presión. [N/m²]
s = Entropía.[J/(kg °K)]

sc = Sistema completo
sol = Sol.
t = Tiempo.

REFERENCIAS

- Barral J. R., Andreani R. J. L., Lucchini J. M., Fasulo A. J. (2004). Evaluación exergética de sistemas de calentamiento de agua solares termosifónicos. XII Congreso Ibérico y VII Congreso Ibero Americano de Energía Solar, Vigo, Galicia, España.
- Bejan, A. (1994). Entropy generation through heat and fluid flow. Wiley Interscience, New York.
- Çengel Y. A. y Boles M. A. (2006). Thermodynamics: an engineering approach, 5th ed., McGraw-Hill Interamericana, Mexico.
- Duffie J.A. y Beckman W.A. (2006). Solar engineering of thermal processes, 3th ed., John Wiley and Sons, Inc, New York.
- Hollands K. G. T. y Lightstone M. F. (1986). A review of low-flow, stratified-tank solar water heating systems. Solar Energy 43, 2, 97-105.
- Hepbasli A. (2008). A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future, renewable and sustainable energy reviews, Vol. 12, pp. 593–661.
- Iqbal M. (1983) An Introduction to Solar Radiation, Academic Press.
- Lucchini, J. M. Stoll, R. G. Garnica, J. H. y Barral, J. R. (2012). Simulación y validación de un sistema termosifónico compuesto por un colector con inercia térmica. Avances en Energía Solar y Medio Ambiente, Vol. 16, 08, pp. 215-222.
- Moran M. J. y Shapiro H. N. (2004). Fundamentos de termodinámica técnica, 2th ed., Reverté, España.
- Morrison G. L. (1986). Reverse circulation in thermosyphon solar water heaters. Solar Energy 36, 4, 377-379.
- Petela R. (2003). Exergy of undiluted thermal radiation, Solar Energy, Vol. 74, pp. 469-488.
- Rosen M.A. (2001). The exergy of stratified thermal energy storage, Solar Energy, Vol. 71, N° 3, pp.173-185.
- Rosen M. A. y Dincer I. (2003). Exergy methods for assessing and comparing thermal storage systems, Int. J. Energy Res., Vol. 27, pp. 415-430, DOI: 10.1002/er.885.
- Rosen M. A., Tang R. y Dincer I. (2004). Effect of stratification on energy and exergy capacities thermal storage systems, Int. J. Energy Res., Vol. 28, pp. 177-193, DOI: 10.1002/er.960.
- Torres Reyes E., Cervantes de Gortari J. G., Ibarra-Salazar B. A. y Picon-Nuñez M. (2001). A design method of flat-plate solar collectors based on minimum entropy generation. Exergy, an International Journal 1, 1, 46-52.

ABSTRACT: An exergetic analysis for a thermosyphonic system with a collector of high thermal mass is presented here. This study is proposed for the whole system collector-storage tank by using exergy balance equations in transient state. The corresponding equations were included in a computational model experimentally validated, in order to determine instantaneous exergy fluxes, exergy efficiencies, and accumulated exergy efficiencies as well. The model was run for complete days using real climatic data and extraction profiles for four people. Then, the solution of differential equation systems were performed by finite difference methods. Considering the variability of the ambient temperature, the use of the daily average temperature is proposed as reference temperature for the dead state. The results are presented by means of plots that show the accumulated exergy in tank and collector and by exergetic diagrams that allow the visualization of the transient effects working on the system.

Keywords: exergy, solar energy, simulation, thermosyphonic system, hot water, thermal mass.