

## **ANÁLISIS EXERGETICO DE UN DESTILADOR SOLAR ACOPLADO A UN TANQUE COLECTOR ACUMULADOR.**

Javier Zizzias<sup>1\*</sup>, Jorge Barral<sup>1</sup>, Fabián Venier<sup>1</sup>, Amílcar Fasulo<sup>1y2</sup> y Javier Marchesi<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nac. N° 36 Km. 601  
5800 Río cuarto Tel. 0358-4676485-e-mail jzizzias@ing.unrc.edu.ar

<sup>2</sup>Universidad Nacional de San Luis, Chacabuco y Pedernera  
5700 San Luís Tel. 2652-424689 int. 103.

*Recibido 02/09/15, aceptado 05/10/15*

**RESUMEN:** En este trabajo se presenta un análisis exergetico de un destilador solar integrado a un colector-acumulador. El objetivo es determinar los puntos críticos que afectan negativamente la operación del mismo. El mismo se realizó utilizando un programa computacional basado en un modelo físico matemático validado experimentalmente al que se le agregan las ecuaciones correspondientes a los balances de exergía en el destilador y en el colector-acumulador. Con estas ecuaciones se calcularon flujos exergeticos instantáneos, haciendo hincapié en la determinación de las irreversibilidades. En cuanto al cálculo de eficiencia se consideró adecuado determinar la eficiencia mensual, debido a la gran inercia térmica. Los resultados obtenidos, que se presentan mediante gráficos y tablas, muestran que es significativa la destrucción de exergía en los distintos componentes del destilador y en colector-acumulador, lo que motiva como trabajo a futuro, analizar cambios en el dispositivo para optimizar su funcionamiento.

**Palabras clave:** destilador solar, colector-acumulador, exergía, irreversibilidades y eficiencia.

### **INTRODUCCIÓN**

Es una realidad que la problemática del agua se acentúa en forma muy acelerada y más allá de las campañas de concientización sobre el consumo responsable de este recurso, el aumento poblacional con el consecuente aumento de la producción de alimentos, hace que el consumo de agua, sobre todo potable, sea cada vez mayor. En muchas regiones del mundo esta situación se ve agravada porque no hay reservas de agua o si las hay muchas veces no es apta para el consumo humano. Esto es lo que ocurre en muchas localidades del sur de la provincia de Córdoba, donde si bien los recursos no son tan escasos en cantidad, si lo son en calidad, por cuanto el contenidos de sales de los acuíferos subterráneos no lo hacen aptos para el consumo humano (Blarasin y Cabrera, 2003).

La mayoría de los métodos de potabilización de agua se basan en la utilización de energías convencionales, como la electricidad, la cual no siempre está disponible en zonas rurales aisladas. Por ello el desarrollo de equipos para tratamientos de agua con energías alternativas como la solar o la eólica adquiere mucha relevancia. Ejemplo de ello son los destiladores solares, equipos que vienen siendo desarrollados desde hace mucho tiempo (Aayush Kaushal, 2010) Estos tienen la ventaja de no utilizar energías convencionales y de ser capaz de producir agua destilada de muy buena calidad.

Un problema que tienen los destiladores solares es la baja producción de agua destilada. Es por esto que las investigaciones se centran en aumentar la producción de estos destiladores. En este sentido el Grupo de Energía Solar de la UNRC conjuntamente con el Laboratorio de Energía Solar de la UNSL han venido desarrollando desde más de 15 años prototipos de destiladores solares activos como los son aquellos que son auxiliados por colectores solares planos o por un tanque colector acumulador (Marchesi J. et.al, 2008; Esteban C. et al, 2000). Sobre este último, llamado Destilador Solar Colector Acumulador, DSCA, se realiza un estudio exergetico, con el propósito de optimizar su

funcionamiento mediante la búsqueda de los puntos críticos que afectan negativamente la operación del mismo.

La exergía es una propiedad de un sistema termodinámico (abierto o cerrado) que toma su valor numérico al ser comparada con las condiciones a que llegaría ese sistema cuando equilibrándose con las condiciones de presión y temperatura del medio circundante (entorno), la combinación sistema-entorno fuera incapaz de producir más trabajo o energía útil. Así, la propiedad exergía del sistema en las condiciones de presión y temperatura del entorno, habitualmente denominadas  $p_0$  y  $T_0$ , que en este caso sería la temperatura ambiente, se las suele denominar "estado muerto". Dicho estado se convierte entonces en un punto de referencia, y la diferencia de exergía entre el estado en que se encuentra el sistema y el estado muerto, representa la magnitud teórica de trabajo útil que se podría alcanzar si dicho sistema evolucionara hasta el estado muerto realizando evoluciones reversibles. Obviamente es una magnitud inalcanzable, pero marca el límite teórico y mientras mejor se realicen las evoluciones sistema-entorno (tendiendo a la reversibilidad) más se aproxima el proceso a alcanzar dicha magnitud y por ende a ser su eficiencia exergética (lo aprovechado dividido lo disponible) igual a la unidad (Çengel y Boles, 2006).

Así, los análisis exergéticos se basan en los principios de conservación de masa y energía, y considerando la segunda ley de la termodinámica, permiten analizar tanto sistemas simples como muy complejos. En particular, para los sistemas complejos tiene la ventaja que se pueden tomar cada uno de los componentes por separado, como si fueran sistemas abiertos, y así cuantificar las pérdidas de energía disponible (exergía) por separado. Es por lo tanto una herramienta más poderosa que el análisis energético (primera ley), y que el estudio mediante la entropía (segunda ley). En estos casos "la energía se conserva", así podría el sistema tener energía en el estado muerto pero no ser aprovechable; "la entropía crece", pero generalmente luego de una evaluación global no se identifica en que partes de todos los procesos se producen los problemas de irreversibilidades. Por el contrario, en un proceso "la exergía se destruye"; una vez que llegué al estado muerto no hay posibilidad de aprovechar más nada, pero el análisis exergético indica cuánto fue realmente aprovechable y en qué lugar del proceso se produjo una destrucción debida a la irreversibilidad del proceso (Dincer y Rosen, 2007).

Algunos investigadores han analizado destiladores solares mediante la aplicación de la exergía en los últimos años (Singh et al., 2011). En particular se ha puesto énfasis a la eficiencia exergética (Kumar y Tiwari, 2011), obteniendo valores muy variables para distintas horas del día. Se realiza en general la suposición de operación en estado estacionario para los cálculos de dicha eficiencia (Gude et al., 2012), lo cual es problemático para sistemas que tienen inercia térmica, y aunque se hagan promedios diarios, la influencia de los momentos en que la radiación es baja y el sistema sigue destilando ocasionan valores de eficiencia instantánea muy altos que distorsionan el análisis global (Dehghan et al., 2015). Torchia et al. (2008) reconocen este problema pero no avanzan en ninguna recomendación o sugerencia al respecto. Para el estudio realizado en el presente trabajo, esta situación se magnifica, dado que la unidad destiladora continúa trabajando durante la noche, en virtud a la acumulación de energía que realiza el colector acumulador que tiene acoplado. Casi nunca la variación de exergía que experimenta el volumen de control puede ser igual a cero.

En la primera sección de este trabajo se describe el dispositivo estudiado. Se presenta luego el modelo físico matemático que fue validado experimentalmente para realizar simulaciones. Se hace el planteamiento analítico de los flujos exergéticos y se les cuantifica, identificándose las irreversibilidades. Mediante tablas y gráficos se analizan los resultados para un mes seleccionado.

## **DESCRIPCIÓN DEL DSCA**

El DSCA consiste en un tanque colector acumulador conectado en su parte superior a un destilador solar de batea con cubierta de vidrio asimétrica a través de una abertura de igual diámetro que el tanque (0,80 m). El tanque de aproximadamente 600 litros es de acero inoxidable exteriormente cubierto por una superficie selectiva y esta rodeado lateralmente por 2 cubiertas de policarbonato. El fondo esta apoyado en una base de madera que le sirve de sostén y aislación. La batea del destilador es

también de acero inoxidable cubierta con un plástico negro y tiene aislación de poliuretano expandido en sus laterales y en el fondo. La cubierta es de vidrio y asimétrica.

La principal característica de este destilador es que debido a la energía que es capaz de almacenar la masa de agua contenida en el tanque durante el periodo de radiación, la producción de agua destilada continúa durante la noche, incrementando los niveles de producción diarios. Los primeros estudios dieron cuenta que la producción del DSCA es un 77% superior al de batea simple. Posteriormente se determinaron las pérdidas térmicas de todo el dispositivo (Fasulo et al., 2006). Luego con el objetivo de tener un conocimiento más detallado del funcionamiento del mismo se retoma el estudio experimental de las pérdidas térmicas pero discriminando entre las que se producen por las paredes laterales y por el fondo del tanque y las que se producen por el del destilador (Zizzias et al, 2012). Se realiza luego un estudio analítico del funcionamiento del dispositivo a partir del cual se proponen modelos físicos-matemáticos que representan tanto el funcionamiento del destilador propiamente dicho como el funcionamiento del tanque colector acumulador. Con el propósito de poder evaluar modificaciones que optimicen su funcionamiento se realiza a partir de aquellos modelos un programa que simula el funcionamiento del DSCA. Validada la simulación a partir de resultados experimentales se analizaron posibles modificaciones y se simularon en el programa realizado. En la Figura 1 se observa un esquema del DSCA y las respectivas referencias.

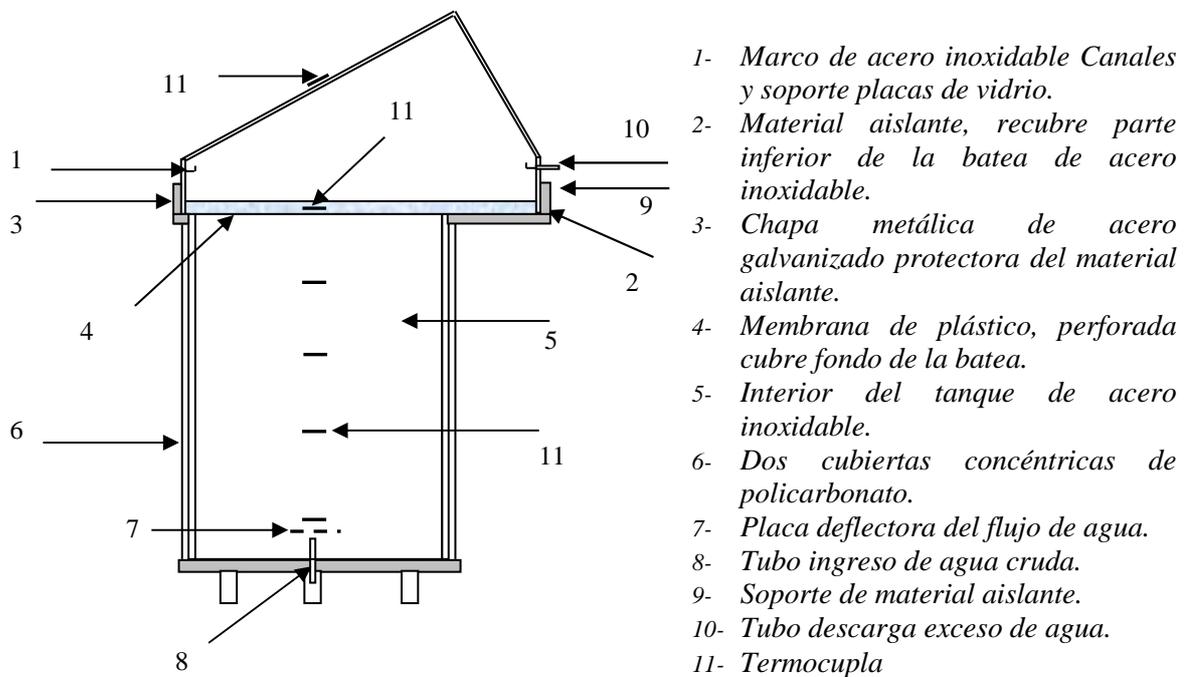


Figura 1. Esquema y referencias del Destilador Solar acumulador usado en nuestra experiencia

## MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO. SIMULACIÓN.

El modelo físico matemático se basa en el propuesto por Tiwari G. y Tiwari A. (2008), y utiliza las expresiones de los coeficientes de transferencia de calor dados por Dunkle (1961) y Cooper (1969). Para el cálculo de la producción utiliza el método dado por Belessiotis et al., (1995).

Para la elaboración del modelo físico matemático se han hecho las siguientes consideraciones:

- El sistema está en estado estacionario durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  (1 hora) considerado.
- El destilador solar es un sistema cerrado.



$$\alpha'_w \cdot I + h_{c,bw} \cdot (T_b - T_w) = m \cdot c_p \cdot \frac{dT_w}{dt} + h_{r,wg} \cdot (T_w - T_g) + h_{c,wg} \cdot (T_w - T_g) + h_{e,wg} \cdot (T_w - T_g) \quad (3)$$

Balance de energía en la cubierta de policarbonato interior

$$h_{c,tp1} \cdot (T_t - T_{p1}) + h_{r,tp1} \cdot (T_t - T_{p1}) = h_{c,p1p2} \cdot (T_{p1} - T_{p2}) + h_{r,p1p2} \cdot (T_{p1} - T_{p2}) \quad (4)$$

Balance de energía en la cubierta de policarbonato exterior

$$h_{c,p1p2} \cdot (T_{p1} - T_{p2}) + h_{r,p1p2} \cdot (T_{p1} - T_{p2}) = h_{c,p2a} \cdot (T_{p2} - T_a) + h_{r,p2a} \cdot (T_{p2} - T_a) \quad (5)$$

Balance de energía en el tanque colector acumulador

$$S = M_t \cdot c_p \cdot \frac{dT_t}{dt} + U_L \cdot (T_t - T_a) + U_F \cdot (T_t - T_a) + \dot{q}_{tw} \quad (6)$$

### **Producción de agua destilada**

El cálculo de la producción de destilado se realiza mediante la Ec. (7) la cual se obtuvo mediante una aproximación lineal múltiple (Zizzias et al., 2012).

$$P_{DSCA} = -0,024745 - 0,013676 \cdot (T_w - T_a) + 0,0562805 \cdot h_{e,wg} - 0,0000622 \cdot S - 0,0001285 \cdot I \quad (7)$$

Los datos reales medidos de la radiación global horizontal, la temperatura ambiente y la velocidad del viento más la radiación absorbida por el colector que es calculada mediante otro programa, son los datos de entrada para el cálculo de las temperaturas del agua de la batea, del agua del tanque, de la batea, de la cúpula de vidrio y de las cubiertas de policarbonatos. A partir de éstas se obtienen todos los flujos de calor presentes en el equipo y la producción de destilado. Como hipótesis se considera que la temperatura de la pared del tanque es la misma que la del agua del tanque y esta es uniforme en todo su volumen.

La validación de esta simulación se la realizó comparando los datos obtenidos por ésta con los obtenidos experimentalmente.

### **FLUJOS DE EXERGÍAS, IRREVERSIBILIDADES Y EFICIENCIA EXERGETICA**

Petela (2003), propone la siguiente expresión para la exergía contenida en la radiación isotrópica del sol, considerado este como cuerpo negro, a la temperatura de su superficie, referida a la temperatura ambiente:

$$\dot{X}_{Sol} = I_s \left( 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right) - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right) \quad (8)$$

La exergía asociada a una interacción de calor puede expresarse como (Çengel y Boles, 2006):

$$\dot{X} = \dot{q} \left( 1 - \frac{T_a}{T} \right) \quad (9)$$

Donde  $\dot{q}$  es el flujo de calor  $T$  la temperatura del sistema, con  $\dot{X}$  expresado en W/m<sup>2</sup>.

La exergía almacenada tanto en el agua de la batea como en el agua del tanque puede ser estimada por la siguiente relación (Karakilcik y Dincer, 2008):

$$DX_w = m \cdot c_p \cdot \left( (T_f - T_i) - T_a \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) \right) / \Delta t \quad (10)$$

Donde  $T_i$  y  $T_f$  son las temperaturas iniciales y finales en un intervalo de tiempo en el sistema, en este caso el agua.

En cuanto al cálculo de la eficiencia exergetica, en general se propone el cálculo de la eficiencia exergetica instantánea que por ejemplo Dehghan et al., (2015), la define como el cociente entre flujo de exergía asociado a la cantidad de destilado producido y el flujo de exergía asociada a la radiación solar más, eventualmente, el aporte de algún dispositivo auxiliar.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{q}_{we} \left( 1 - \frac{T_a}{T_w} \right)}{\dot{X}_s + \dot{X}_{aux}} \quad (11)$$

Sin embargo, debido a la particularidad que presenta el DSCA, que consiste como ya se mencionó, en la gran inercia térmica producto de la acumulación de energía que se produce en el colector-acumulador, que hace que la producción dependa de la energía acumulada en el día anterior, se considera conveniente calcular la eficiencia energética mensual, cuyo valor se obtiene de integrar la expresión dada por Syahrul et al. (2002) a lo largo de todo un mes. Esta expresión es la siguiente:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{X}_{ew}}{\dot{X}_{ent}} = \frac{A \times h_{c,ew} \times (T_w - T_g) \times \left( 1 - \frac{T_a}{T_w} \right)}{\dot{X}_{st} + \dot{X}_s} \quad (12)$$

### Balances de exergía

Se plantea en esta sección, al igual que en el balance energético, 3 balances de exergía en el destilador, es decir, en el vidrio, en el agua de la batea y en la batea y un balance de exergía en el colector acumulador. Estos balances de flujos de exergía, expresados en W, son los que se muestran a continuación:

### ***En el destilador***

En el balance de vidrio no se tiene en cuenta la variación de exergía en el mismo ya que por su espesor la inercia térmica puede ser despreciada. El vidrio recibe los flujos de exergía proveniente del sol y de la batea, mientras que cede la exergía debida a las pérdidas. La diferencia da la exergía destruida.

$$\dot{X}dg = \alpha'_g \dot{X}s + \dot{X}wg - \dot{X}ga \quad (13)$$

El agua de la batea recibe los flujos exergéticos del sol y de la batea y cede los flujos por pérdidas al ambiente y los flujos por radiación evaporación y convección hacia el vidrio.

$$\dot{X}dw = a'_w \dot{X}s + \dot{X}b - \dot{X}wg - DXw \quad (14)$$

En el balance en la batea tampoco se tiene en cuenta la variación de exergía de la misma, ya que solo es chapa y plástico contenedores del agua, de muy baja inercia térmica.

$$\dot{X}db = \alpha'_b \dot{X}s + \dot{X}tu - \dot{X}pwa - \dot{X}b \quad (15)$$

Hay que tener en cuenta que durante el día el flujo exergético de calor útil,  $\dot{X}tu$ , es cero, no así durante la noche, que es el periodo durante el cual el colector le transfiere calor a la batea.

### ***En el colector-acumulador***

En el balance en el agua del colector, el flujo de exergía absorbido por el colector menos el flujo de exergía que se transfiere a la batea del destilador, el flujo exergético asociado a las pérdidas y la variación de exergía asociada a la variación de energía interna es igual a la exergía destruida. De igual manera que para la batea hay que tener en cuenta que durante el día el calor útil,  $\dot{X}tu$ , es cero durante el día, mientras que durante la noche es cero la exergía de la radiación absorbida.

$$\dot{X}dt = \dot{X}st - \dot{X}tu - \dot{X}pwa - DXt \quad (16)$$

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Las siguientes figuras muestran los datos obtenidos en las experiencias realizadas en el mes de octubre. En la figura 3 se observan las temperaturas ambiente, de agua de la batea, de agua del colector y la del vidrio, además de la radiación global horizontal. Mientras que en la figura 4 se presentan las temperaturas del agua de la batea, la del vidrio y la curva de producción.

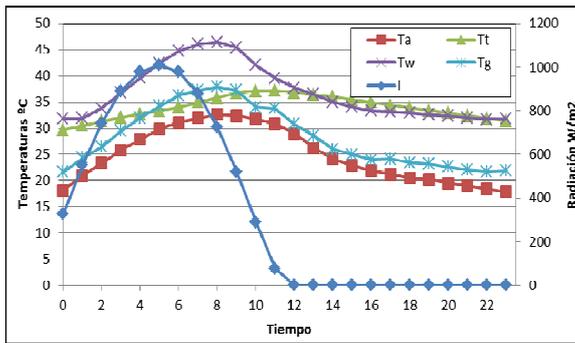


Figura 3: Temperaturas del agua de la batea y del colector, del vidrio, la ambiente y radiación global horizontal.

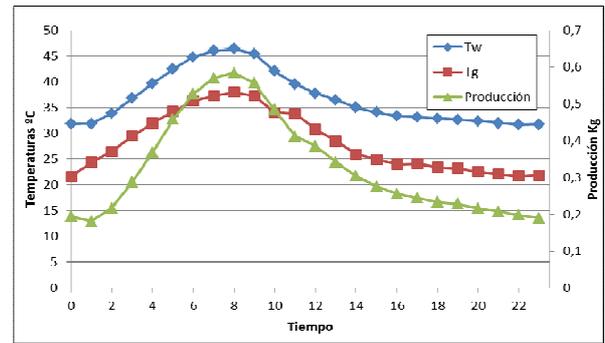


Figura 4: Temperaturas del agua de la batea y del vidrio y de la producción.

Para realizar el análisis exergético se consideraron 2 periodos de 1 hora cada una, a las 13hs y a las 21hs. Se realizó de esta manera el análisis, debido a las diferencias del funcionamiento que presenta el dispositivo entre el periodo diurno y el nocturno. El agua del destilador durante el día recibe energía del sol, mientras que durante el periodo nocturno recibe energía solo desde el colector-acumulador.

Los resultados obtenidos sobre flujos exergéticos e irreversibilidades se presentan en las siguientes tablas. En estas se presentan los flujos de exergía presentes en cada componente, expresados en W, y en la última columna de cada tabla el porcentaje de exergía destruida, calculada sobre la exergía recibida por cada componente:

En la batea

	$\alpha_b X_I$	$X_{tu}$	$X_b$	$X_{pwa}$	$X_{db}$	% $X_{db}$
<b>13hs</b>	123,7	0	5,13	0,12	118,4	95,71
<b>21hs</b>	0	8,58	3,00	0,90	5,48	63,87

Tabla 1: Flujos exergéticos en la batea

En el vidrio

	$\alpha_g X_I$	$X_{wg}$	$X_{pg}$	$X_{dg}$	% $X_{dg}$
<b>13hs</b>	36,86	3,35	2,03	38,18	94,95
<b>21hs</b>	0	2,99	0,78	2,21	73,91

Tabla 2: Flujos exergéticos en el vidrio

En el agua de la batea

	$\alpha_w X_I$	$X_{wg}$	$X_b$	$DX_w$	$X_{pwa}$	$X_{dw}$	% $X_{db}$
<b>13hs</b>	42,41	3,35	5,14	5,06	0,12	39,13	82,29
<b>21hs</b>	0	2,99	3,01	-0,51	0,09	0,52	17,27

Tabla 3: Flujos exergéticos en el agua de la batea

En el agua del colector-acumulador

	$X_{St}$	$X_{tu}$	$X_{tp}$	$DX_t$	$X_{dt}$	% $X_{dt}$
<b>13hs</b>	642,6	0	1,52	0,79	640,3	99,62
<b>21hs</b>	0	8,58	3,43	-0,80	0	0

Tabla 4: Flujos exergéticos en el agua del colector-acumulador

El promedio de exergía destruida por hora, en día estudiado, es en la batea 43,11 W/m<sup>2</sup>, en el vidrio 15,43 W/m<sup>2</sup> y en el agua de la batea es de 13,85 W/m<sup>2</sup>. De los resultados obtenidos, lo más significativo es el alto porcentaje que representa la exergía destruida en el periodo diurno, sobre todo en el colector-acumulador y la batea del destilador. No sucede lo mismo con la exergía asociada a las pérdidas que son pequeñas.

El gráfico 6 muestra la variación de la exergía destruida a lo largo del día

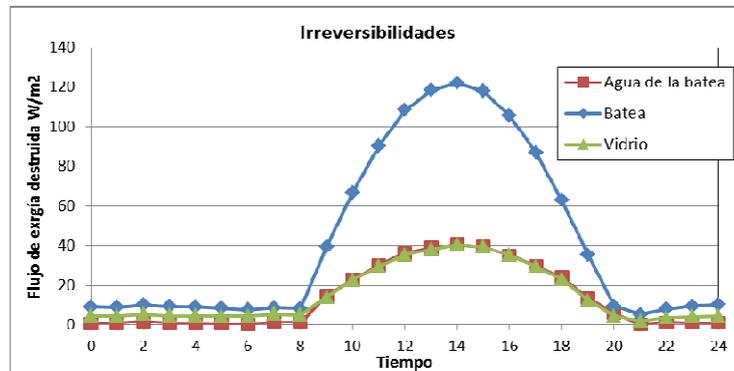


Tabla 5: Irreversibilidades en la batea, en el agua de la batea y en el vidrio

Por otro lado el cálculo la eficiencia exergetica mensual da un valor de 1,2%, valor muy pequeño pero propio de este tipo de dispositivos. Hay que considerar que la energía recibida es importante debido a las dimensiones de la superficie colectora del tanque acoplado al destilador.

Basándose en las tablas previas, resulta ilustrativa la representación de los flujos de exergía en diagramas que identifiquen las partes del equipo y las magnitudes de los flujos. Estos diagramas exergeticos son mucho más útiles que los diagramas energéticos (diagramas de Sankey), ya que permiten visualizar no sólo los aportes de energía disponible, sino también aquellos puntos críticos en los cuales se produce la destrucción de exergía. Se muestran a continuación dos diagramas correspondientes a la Batea para las distintas horas del día consideradas.

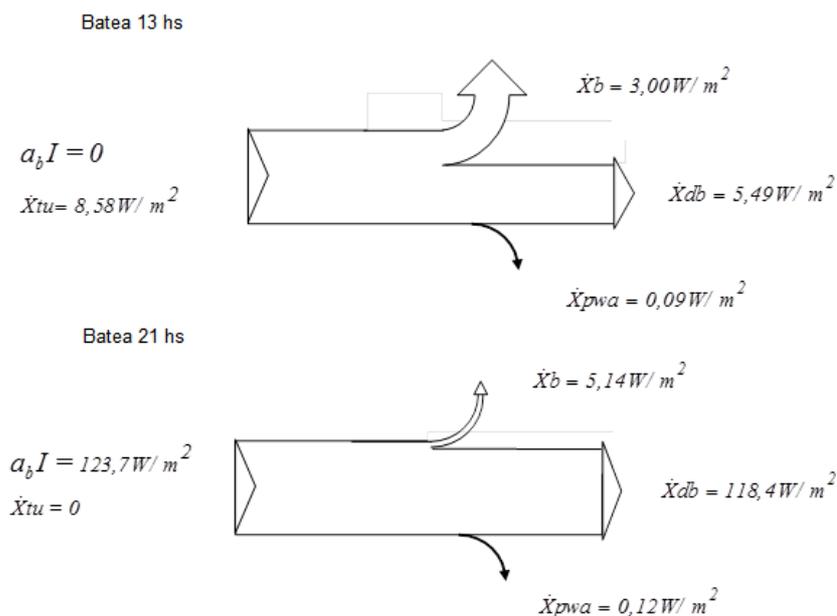


Figura7: Diagramas de exergía correspondientes a las 13hs y a las 21hs.

## ***Discusión***

Es importante destacar que si se quisiera analizar el dispositivo en función de la eficiencia exergética, los resultados no serían razonables si uno tomara el sistema globalmente. Si se tiene en cuenta que durante la noche no se recibe radiación solar, pero el sistema continúa produciendo agua destilada, de la definición de rendimiento exergético, su valor tendería a infinito. Esto se debe a que la continuidad del proceso se da por la acumulación de energía en el tanque que compone el colector con acumulación integrada.

Por lo dicho anteriormente, resulta incluso cuestionable la utilización de la eficiencia exergética para el análisis de un destilador solar de batea simple. Por lo que se ve en los resultados de otros autores (Dehghan et al., 2015) (Kumar y Tiwari, 2011), lógicamente los valores de eficiencia exergética instantánea conducen a valores muy altos hacia el atardecer, cuando la radiación solar se atenúa y tiende a anularse y el sistema continúa destilando. Esto no significa que el proceso haya mejorado, sino que la inercia térmica de la batea permite aún la continuidad del proceso de evaporación y por ende la continuación del proceso.

Por lo dicho es que se propone como una alternativa para aproximar mejor el relevamiento cuantitativo de las regiones de destrucción de exergía, realizar el análisis considerando al menos un cálculo de valores medios mensuales. No se hace una propuesta de valores medios diarios teniendo en cuenta que el colector con acumulación integrada tiene muy alta inercia térmica, lo cual hace que los efectos de acumulación de energía se propaguen al menos de un día para otro. Siguiendo este lineamiento, se han calculado los valores acumulados de flujos exergéticos de cada uno de los componentes del sistema. Con un agregado al algoritmo del mismo software de cálculo, se han calculado entonces dichos valores acumulados. Como ejemplo, para el mes de octubre, considerando los valores de destilado total producido y de exergía total de entrada, se puede inferir una eficiencia exergética media mensual del equipo completo de 1,2.

## **CONCLUSIONES**

Se ha analizado utilizando la herramienta de los análisis exergéticos un sistema que contiene componentes que poseen inercia térmica y están energéticamente acoplados, con la particularidad de que el destilador recibe aporte de energía disponible durante el día por efectos de la radiación solar y durante la tarde-noche por parte del tanque almacenador, con pequeñas etapas de solapamiento entre ambos efectos. Estas condiciones dificultan el análisis del conjunto como si fueran sucesivos pasos en estado estacionario.

Se ha hecho uso de la ventaja de los estudios exergéticos, que permiten analizar cada componente por separado para visualizar flujos y destrucción de exergía. De esta manera, se han representado los correspondientes diagramas exergéticos, en los cuales se observa que para un mismo componente, las diferencias son sustanciales. Por lo tanto, si bien los diagramas aportan al conocimiento del comportamiento del sistema, Fig. (7), es necesario hacer uno por cada periodo de tiempo que se quiera considerar.

Los resultados obtenidos determinan los puntos críticos del sistema en términos de destrucción de exergía. Se observa que es significativa la destrucción de exergía en el vidrio y en la batea del destilador y más aún en el colector-acumulador, lo que hace plantear como trabajo a futuro, el análisis de mejoras en el dispositivo para optimizar su funcionamiento.

## **NOMENCLATURA**

*A<sub>c</sub>* Área del colector en m<sup>2</sup>  
*c<sub>p</sub>* Calor específico del agua

*I* Radiación global horizontal en W/m<sup>2</sup>  
*m* Masa del agua de la batea en kg  
*M<sub>t</sub>* Masa del agua del tanque en kg

*DX<sub>w</sub>* Exergía acumulada en el agua de la batea

*DX<sub>t</sub>* Exergía acumulada en el agua del colector

*h<sub>c,tp1</sub>* Coef. Transf. por convección desde el tanque a policarbonato 1 en W/m<sup>2</sup>

$h_{c,p1p2}$  Coef. Transf. por convección desde policarbonato 1 a policarbonato 2 en  $W/m^2$   
 $h_{c,p2}$  a Coef. Transf. por convección desde policarbonato 2 al ambiente en  $W/m^2$   
 $h_{r,tp1}$  Coef. Transf. por radiación desde el tanque al policarbonato 1 en  $W/m^2$   
 $h_{r,tp1}$  Coef. Transf. por radiación desde policarbonato 1 a policarbonato 2 en  $W/m^2$   
 $h_{r,tp1}$  Coef. Transf. por radiación desde policarbonato 2 al ambiente en  $W/m^2$   
 $h_{k,p1}$  Coef. Transf. por conducción en el policarbonato 1 al ambiente en  $W/m^2$   
 $h_{k,p2}$  Coef. Transf. por conducción en el policarbonato 2 al ambiente en  $W/m^2$   
 $h_{k,ba}$  Coef. Transf. por conducción desde la batea al ambiente en  $W/m^2$   
 $h_{c,ma}$  Coef. Transf. por convección desde madera al ambiente en  $W/m^2$   
 $h_{k,m}$  Coef. Transf. por conducción en el madera en  $W/m^2$   
 $h_{r,ma}$  Coef. Transf. por radiación desde madera al ambiente en  $W/m^2$   
 $h_{c,wg}$  Coef. Transf. por convección desde el agua al vidrio en  $W/m^2$   
 $h_{r,wg}$  Coef. Transf. por radiación desde el agua al vidrio en  $W/m^2$   
 $h_{e,wg}$  Coef. Transf. por evaporación desde el agua al vidrio en  $W/m^2$   
 $h_{c,bw}$  Coef. Transf. por convección desde batea al agua en  $W/m^2$   
 $h_{c,ga}$  Coef. Transf. por convección desde el vidrio al ambiente en  $W/m^2$   
 $h_{r,ga}$  Coef. Transf. por radiación desde el vidrio al ambiente en  $W/m^2$   
 $h_{k,g}$  Coef. Transf. por conducción en el vidrio en  $W/m^2$   
 $P_{DSCA}$  Producción del DSCA en kg  
 $h_{t,ga}$  Coef. Transf. total desde el vidrio al ambiente en  $W/m^2$   
 $\dot{q}_{r,ga}$  Flujo de energía por radiación desde el vidrio al ambiente [ $W/m^2$ ].  
 $\dot{q}_{c,ga}$  Flujo de energía por convección desde el vidrio al ambiente [ $W/m^2$ ].  
 $\dot{q}_{c,wg}$  Flujo de energía por convección desde el agua de la batea al vidrio [ $W/m^2$ ].  
 $\dot{q}_{e,wg}$  Flujo de energía por evaporación desde el agua de la batea al vidrio [ $W/m^2$ ].

$\dot{q}_{r,wg}$  Flujo de energía por radiación desde el agua de la batea al vidrio [ $W/m^2$ ].  
 $\dot{q}_{k,ba}$  Flujo de energía por conducción a través de la batea [ $W/m^2$ ].  
 $\dot{q}_{c,bw}$  Flujo de energía por convección desde la batea al agua de la batea [ $W/m^2$ ].  
 $\dot{q}_{tw}$  Flujo de energía que se produce entre el agua de la batea y el agua del tanque [ $W/m^2$ ].  
 $R_b$  Factor geométrico  
 $R_g$  Fracción de radiación reflejada por el vidrio  
 $R_w$  Fracción de radiación reflejada por el agua  
 $S$  Radiación absorbida por la batea en  $W/m^2$   
 $S_t$  Radiación absorbida por el tanque en  $W/m^2$   
 $T_a$  Temperatura ambiente en  $^{\circ}C$   
 $T_b$  Temperatura de batea en  $^{\circ}C$   
 $T_w$  Temperatura del agua de la batea en  $^{\circ}C$   
 $T_t$  Temperatura agua del tanque en  $^{\circ}C$   
 $T_g$  Temperatura del vidrio en  $^{\circ}C$   
 $T_{p1}$  Temperatura cub. de policarbonato interior  
 $T_{p2}$  Temperatura cub. de policarbonato exterior  
 $U_L$  Coeficiente total de pérdidas por los laterales del tanque  $W/m^2$   
 $U_F$  Coeficiente total de pérdidas por el fondo del tanque en  $W/m^2$   
 $V$  Velocidad del viento en m/seg.  
 $\dot{X}_{sol}$  Flujo exergético del sol  
 $\dot{X}_{aux}$  Flujo exergético de equipo auxiliar  
 $\dot{X}_{ew}$  Flujo exergético de evaporación  
 $\dot{X}_{pwa}$  Flujo exergético de pérdidas del agua al ambiente  
 $\dot{X}_b$  Flujo exergético de la batea al agua  
 $\dot{X}_{dw}$  Destrucción de exergía en el agua de la batea  
 $\dot{X}_{wg}$  Flujo exergético del agua al vidrio  
 $\dot{X}_{ga}$  Flujo exergético del vidrio al ambiente  
 $\dot{X}_{dg}$  Destrucción de exergía en el vidrio  
 $\dot{X}_{tu}$  Flujo exergético del colector a la batea  
 $\alpha'_g$  Fracción de radiación absorbida por el vidrio  
 $\alpha'_w$  Fracción de radiación absorbida por el agua  
 $\alpha'_b$  Fracción de radiación absorbida por la batea  
 $\rho_g$  Reflectancia del suelo  
 $\eta_{ex}$  Rendimiento exergético

## REFERENCIAS

- Aayush Kaushal V. (2010) Solar stills: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, pp. 446–453.  
 Belessiotis V., Voropoulos K. and Delyannis E. (1995); Experimental and theoretical method for the determination of the daily output of a solar still; Desalination, vol. 100, pp. 99-104.  
 Blarasin M, y Cabrera A, (2003) Año Internacional del agua dulce, Aguas subterráneas y Ambiente. Cartilla de divulgación. Editorial UNRC.  
 Çengel Y. A. y Boles M. A. (2006). Thermodynamics: an engineering approach, 5th ed., McGraw-Hill Interamericana, Mexico.  
 Cooper P. I. (1969); Digital Simulation of Transient Solar Still Processes. Solar Energy, Vol. 12, pp. 313-331.  
 Dehghan A.A, Afshari A., Rahbar N., (2015). Thermal modeling and exergy analysis of a thermoelectric assisted solar still. Solar Energy. Vol. 115, pp. 277-289.

- Dincer I. y Rosen M. A. (2007). *Exergy*, 1<sup>st</sup> ed., Elsevier Science. Impreso en Estados Unidos.
- Dunkle R. V. (1961); *Solar Water Distillation: The Roof Type Still and Multiple Effect Diffusion Still*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization Victoria, Australia.
- Esteban C., Franco J. y Fasulo A. (2000); *Destilador solar asistido con colector solar acumulado AVERMA*, Vol. 1, 3.8
- Fasulo A., Zizzias J., Odicino L., Marchesi J. (2011) y Fasulo A., *Evaluación de un destilador colector solar acumulador operado en condiciones térmicas extremas*. CAyER 2011, pp. 566-576.
- Gude V. G., Nirmalakhandan N., Deng S., Maganti A. (2012) *Desalination at low temperatures: an exergy analysis*. *Desalination and Water Treatment*, Vol. 40, pp. 272–281.
- Karakilcik M. y Dincer I. (2008); *Exergetic performance analysis of a solar pond*. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol.47, pp 93-102.
- Kumar S. y Tiwari G.N., (2011); *Analytical expression for instantaneous exergy efficiency of a shallow basin passive solar still*. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol 5., pp, 2543-2549.
- Marchesi J, Ducculi E, Adaro J. y Fasulo A. (2008); *Comparación del rendimiento de un destilador solar de batea básico respecto de un destilador asistido térmicamente*. AVERMA; Vol. 12, pp. 63-70.
- Petela R. (2003). *Exergy of undiluted thermal radiation*, *Solar Energy*, Vol. 74, pp. 469-488.
- Singh R., Dev R., Hasan M., Tiwari G.N., (2011); *Comparative Energy and Exergy Analysis of Various Passive Solar Distillation Systems*. *Solar Thermal Applications*. WREC. Suecia.
- Syahrul S., Hamdullahpur F., Dincer I.(2002); *Exergy Analisis of Fluidised Bed Drying of Moist Particles*, *Exergy International Journal*, 2, pp. 87-98.
- Tiwari,G.N. y Tiwari A.K. (2008). *Solar Distillation Practice for Water Desalination*. Systems Anshan Tunbridge Wells UK and Anamaya Publishers, New Delhi. Impreso en la India
- Torchia Nuñez J.C., Porte Gándara M.A. Cervantes de Gotari J.G.(2008); *Energy analysis of pasive solar still*. *Renewable Energy*. Vol. 33, pp. 608-616.
- Zizzias J., Fasulo A., Venier F., Marchesi J., Odicino L. (2011); *Evaluación detallada de un destilador solar colector acumulador*. ASADES 2010 vol.14 pp. 03.63-03.69.
- Zizzias J., Stoll R., Marchesi J., Fasulo A., Venier F. (2012) *Evaluación mediante simulación de modificaciones propuestas en un destilador solar asistido por un tanque colector acumulador integrado*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Rosario. Vol.16, pp. 03.63-03.70

## ABSTRACT

An exergetic analysis was made on a solar still integrated with an integral collector storage system. The goal of this work was the determination of the critical points that negatively affect the operation of the prototype. The analysis was made by using a computational tool based on an experimentally validated physical-mathematical model, where equations for exergy balances were added. Instantaneous exergy flows were calculated, emphasizing over the determination of irreversibilities. Taking into account the concept of exergy efficiency, it was recommended the use of monthly mean values, due to the high thermal mass of the integral collector storage system. The results are presented by means of tables, plots and figures. They show a substantial destruction of exergy in different components of the still and the collector, which motivates a future work to analyze changes in the prototype to optimize its efficiency.

**Keywords:** solar still; integral collector storage system; exergy; irreversibility; efficiency