

# Herramienta para la simulación del comportamiento térmico y la productividad de destiladores solares de tipo invernadero

*Tool to simulate the thermal behavior and the productivity of greenhouse tray stiller*

*MSc. Susana Fonseca-Fonseca<sup>I</sup>, sfonseca@cies.cu, Lic. Julio César Rosales-Rodríguez<sup>II</sup>,  
M.Sc. Eider Miranda-Perdomo<sup>II</sup>, Lic. Fernando Fonseca-Acosta<sup>II</sup>,  
Lic. Osmanys Fuentes-Lombá<sup>I</sup>*

*<sup>I</sup>Centro de Investigaciones de Energía Solar, Cuba; <sup>II</sup>Universidad de Oriente, Cuba*

## Resumen

En este trabajo se presenta la metodología utilizada para el diseño y construcción de un software para simular destiladores tipo invernadero de bandeja. Se parte de un balance de energía en las tres partes fundamentales de estos destiladores dígase la bandeja, el agua y el vidrio mediante el planteamiento de un sistema de ecuaciones diferenciales. A partir del establecimiento de este sistema de ecuaciones se implementa un algoritmo para encontrar su solución de forma numérica. Este programa ofrece diferentes opciones para el dimensionado de estos equipos teniendo en cuenta las características climatológicas del lugar donde va a funcionar así como algunas características constructivas. Los resultados obtenidos se muestran mediante gráficos que demuestran la concordancia con cálculos realizados utilizando software profesionales para la solución analítica del sistema de ecuaciones empleado.

**Palabras clave:** *destilador solar de bandeja, software de simulación, solución numérica, energía solar.*

---

## Abstract

In this paper the methodology for the design and construction of a software to simulate a greenhouse tray stiller is presented. It starts from an energy balance in the three main parts of these distillers i.e. tray, water and glass by developing a system of differential equations. Since the establishment of this system of equations was implemented an algorithm to find its numerical solution. This program uses various options for dimensioning the equipment taking into account the climatic characteristics of the place where it will work as well as some structural features. The results are shown by graphs demonstrating consistency with calculations using professional software for the analytical solution of the equation system used.

**Keywords:** *greenhouse tray stiller, simulation software, numerical solution, solar energy.*

## **Introducción**

Las fuentes renovables de energía, en particular la solar, constituyen una alternativa idónea para resolver simultáneamente problemas esenciales: el agotamiento de los combustibles fósiles y el deterioro del medio ambiente debido al uso de éstos, entre otros.

La energía solar es una fuente alternativa de energía para la obtención de agua destilada. Las principales ventajas de la destilación solar son: el no arrastre de agua dura (no hay ebullición) y el no consumo de energía convencional. Mediante las diversas variantes de esta técnica es posible producir agua potable a partir de agua contaminada por lo que resulta especialmente útil para regiones alejadas de las comodidades de la civilización, como islas y regiones costeras poco comunicadas. También pueden encontrarse aplicaciones técnica y económicamente factibles en otros lugares.

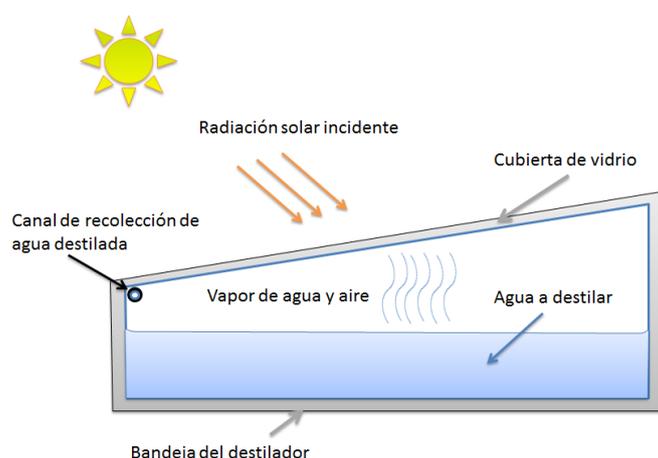
En la actualidad se conocen diversos tipos de destiladores solares, entre los que se destacan los que utilizan el efecto invernadero, por ser este uno de los procedimientos más sencillos y económicos de obtención de agua destilada según Franco [1]. En la literatura se encuentran numerosos trabajos dedicados al estudio de estos dispositivos, tanto desde el punto de vista experimental, como a través de simulaciones numéricas entre las que se puede citar las realizadas por Clark [2] y Massipe [3], procurando analizar qué factores influyen más significativamente en la eficiencia de un destilador solar. La mayor parte de los trabajos se basan en Cooper [4,5] y Dunkle R.V. [6], quienes para calcular la eficiencia realizaron un balance de energía en el sistema, empleando un coeficiente de transferencia térmica global entre la superficie del agua y la cubierta.

Existe una gran diversidad de materiales que pueden ser empleados en la construcción de destiladores solares, observándose una tendencia mundial a la utilización de los más asequibles y de bajo costo, lo que conlleva a equipos con rendimientos muy diferentes Franco [1]. Por tal razón resulta conveniente predecir el comportamiento de estos antes de su construcción con el fin de estimar la factibilidad de su aplicación en función de las condiciones climáticas, los materiales y el dimensionado, para ello es necesario realizar su modelación matemática y simulación numérica.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar una aplicación informática para la simulación de los perfiles de temperatura en las diferentes partes de destiladores solares de tipo invernadero con vista a caracterizar el funcionamiento dinámico desde el punto de vista térmico así como predecir su productividad durante las veinticuatro horas del día.

### *Fundamentación teórica*

El destilador solar tipo invernadero de simple efecto consiste en una bandeja poco profunda, casi siempre oscurecida, donde se almacena el agua a destilar Fig. 1. La radiación solar que atraviesa la cubierta transparente calienta la bandeja y esta transfiere calor al agua produciéndose la evaporación de la misma, y quedando las sales concentradas en el fondo. El aislante térmico reduce las pérdidas caloríficas al medio. El vapor de agua se condensa en la superficie interior de la cubierta de vidrio, cuya pendiente permite el deslizamiento del condensado hasta la canal de recolección y de esta a un depósito convenientemente protegido de la contaminación ambiental [1].



**Fig. 1 Esquema de un destilador solar tipo de invernadero de bandeja.**

La productividad de un destilador se expresa generalmente por la cantidad de agua destilada por unidad de área de la bandeja en el día. Esta cantidad varía según el diseño del destilador, intensidad de la radiación solar, velocidad del viento, temperatura del ambiente, profundidad de la capa de agua y los materiales de construcción.

### **Descripción del modelo**

La formulación del modelo se establece a partir de un sistema de ecuaciones diferenciales que describen el balance de energía en las principales partes del equipo. Es de interés determinar la variación de la temperatura en cada uno de los elementos del destilador, a lo largo de todo el día, para luego determinar la productividad horaria y diaria.

El balance de energía se establece de la siguiente forma:

$$[\text{Variación de energía}] = [\text{Entrada de energía}] - [\text{Salida de energía}] \quad (1)$$

Los destiladores solares funcionan fundamentalmente en el horario diurno aprovechando la radiación solar incidente. Dependiendo de los materiales y el diseño utilizados para su construcción, existen equipos que pueden continuar destilando agua en el horario nocturno, debido a su capacidad de almacenar la energía absorbida durante el día[7].

Para realizar el planteamiento del modelo se hacen las consideraciones siguientes:

- No existen fugas de vapor en el equipo.
- Se supone gas ideal.
- Las superficies del agua y la cubierta se consideran paralelas.
- La viscosidad, conductividad, calor de vaporización se consideran constantes.
- Se considera que no existen gradientes de temperatura en la dirección vertical ni horizontal en la bandeja, el agua y la cubierta.
- La temperatura en la superficie interior y exterior de la cubierta de vidrio es aproximadamente la misma.
- Las características ópticas de transmitancia, reflectancia, absorbencia y emitancia se suponen constantes. Esto se considera válido, ya que aunque dichas características varían de acuerdo con el ángulo de incidencia del Sol, lo hacen de una manera insignificante para el análisis en cuestión.
- La irradiancia solar se simula por una función sinusoidal.

Para determinar las temperaturas en las tres regiones del equipo se parte del balance de energía en cada una de ellas, es decir en la bandeja, el agua a destilar y la cubierta. Se considera además que el día está formado por dos períodos con características diferentes:

- El día solar en el cual el funcionamiento del equipo ocurre producto de la energía solar absorbida.
- La noche, en la cual los procesos en el destilador ocurren a expensas de la energía acumulada durante el día solar.

Teniendo en cuenta las diferentes partes que integran el destilador y a partir de las consideraciones anteriores pueden plantearse las ecuaciones de balance de energía siguientes:

### Horario diurno

#### Balance de energía en la bandeja

La bandeja es el recipiente que contiene el agua a destilar, la ganancia de energía en esta región, debido a la radiación solar incidente se expresa por la ecuación:

$$[\text{Ganancia de energía en la bandeja}] = \alpha_b \tau_w \tau_g H_s = \zeta_3 H_s \quad (2)$$

donde

$\alpha_b$ : absorbencia de la bandeja

$\tau_w$ : transmitancia del agua

$\tau_g$ : transmitancia de la cubierta de vidrio

$\zeta_3$ : fracción de la energía solar incidente que es absorbida por la bandeja

$H_s$ : irradiancia en un instante dado

Las pérdidas de energía que experimenta la bandeja están constituidas por el calor cedido al agua por convección  $Q_{CW} = h_3(\tau_b - \tau_w)$  y el término  $h_4(T_b - T_a)$  que incluye las pérdidas por convección  $Q_C$  y radiación de calor  $Q_{rba}$  al ambiente, o sea  $h_4(T_b - T_a) = Q_C + \frac{Q_{rba}}{T_b - T_a}$ .

En esta región existe acumulación debido a la masa de la bandeja. Por lo tanto, combinando las ecuaciones y sustituyéndolas en (1), se obtiene el balance de energía en la bandeja. Esto se expresa mediante la ecuación siguiente:

$$M_b C_{pb} \frac{dT_b}{dt} = \tau_3 H_s - h_3(T_b - T_w) - h_4(T_b - T_a) \quad (3)$$

### **Balance de energía en agua**

La segunda región está constituida por la masa de agua colocada en la bandeja, cuyos términos de ganancia de energía están formados por la proporción de radiación solar incidente que absorbe el agua  $\zeta_2 H_s = \alpha_w \tau_g H_s$  y por el calor obtenido desde la bandeja por convección  $Q_{cw}$  es decir:

$$[\text{Ganancia de energía en el agua}] = \alpha_w \tau_g H_s + Q_{cw} \quad (4)$$

donde

$\alpha_w$  absorbencia del agua.

$\zeta_2$  fracción de la energía solar incidente que es absorbida por el agua.

Los términos de pérdidas de energía en esta región se originan en la superficie del agua por la convección interna del aire, el calor del proceso de evaporación-condensación y el intercambio radiante entre la superficie del agua y la cubierta de vidrio. Por lo tanto las pérdidas de energía es esta región queda expresada por la ecuación siguiente:

$$[\text{Pérdida de energía en el agua}] = Q_{cw} + Q_u + Q_r \quad (5)$$

El término de variación de la energía se puede expresar en la forma de la ecuación (1) combinando las ecuaciones (4), (5) y (1), el balance de energía en la región del agua queda expresado de la manera siguiente:

$$M_w C_{pw} \frac{dT_w}{dt} = \tau_2 H_s + h_3(T_b - T_w) - h_1(T_w - T_g) \quad (6)$$

donde

$h_1$  - coeficiente integral de transferencia de calor entre el agua y el vidrio.

$h_1(T_w - T_g) = Q_{cw} + Q_u + \frac{Q_r}{T_w - T_g}$  representa el calor transferido del agua al vidrio por convección, evaporación-condensación y radiación.

### Balance de energía en el vidrio

La tercera región donde se realiza balance lo constituye la cubierta de vidrio. Los términos de ganancia de energía están formados por la radiación absorbida por el vidrio, el calor transferido desde la superficie de agua por convección, evaporación-condensación y el intercambio radiante, esto es:

$$[\text{Ganancia de energía en la cubierta}] = \alpha_g H_s + Q_{cw} + Q_u + Q_r \quad (7)$$

donde

$\alpha_g = \tau_1$  es la absorbencia del vidrio. Las pérdidas de esta región se constituyen por el término  $Q_{ca}$  que representa la convección debido al viento y el término  $Q_{rga}$  que representa la radiación hacia la atmósfera, obteniéndose:

$$[\text{Pérdida de energía en la cubierta}] = Q_{ca} + Q_{rga} \quad (8)$$

El término de acumulación también es considerado y combinando las ecuaciones (7) y (8) para hacer el balance en la cubierta se tiene finalmente:

$$M_g C_{pg} \frac{dT_g}{dt} = \tau_1 H_s + h_1(T_w - T_g) - h_2(T_g - T_a) \quad (9)$$

donde

$h_2$  - coeficiente integral de transferencia de calor entre el vidrio y el ambiente.

$h_2(T_g - T_a) = Q_{ca} + \frac{Q_{rga}}{T_g - T_a}$  representa la transferencia de calor entre el vidrio y el

ambiente por convección y radiación.

Las ecuaciones (3), (6) y (9) constituyen el sistema de ecuaciones que describe la distribución de las temperaturas en el destilador durante el día. Una vez resuelto este sistema se obtiene el comportamiento de las temperaturas del agua, la cubierta y la bandeja en este período de tiempo.

### Horario nocturno

Balance de energía en la bandeja

$$M_b C_{pb} \frac{dT_b}{dt} = -h_3(T_b - T_w) - h_4(T_b - T_a) \quad (10)$$

Balance de energía en el agua

$$M_w C_{pw} \frac{dT_w}{dt} = h_3(T_b - T_w) - h_1(T_w - T_g) \quad (11)$$

Balance de energía en la cubierta

$$M_g C_{pg} \frac{dT_g}{dt} = h_1(T_w - T_g) - h_2(T_g - T_a) \quad (12)$$

La temperatura ambiente se comporta de la forma siguiente:

$$T_a = T_{minN} + (T_{maxN} - T_{minN}) \left( \frac{\frac{T_s}{2} - 0.5(t-1)}{\frac{T_s}{2}} \right) \quad (13)$$

Productividad del destilador

La productividad diaria del destilador viene expresada por:

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{A_w h_u (T_w(i) - T_g(i))}{\gamma \rho_w} \quad (14)$$

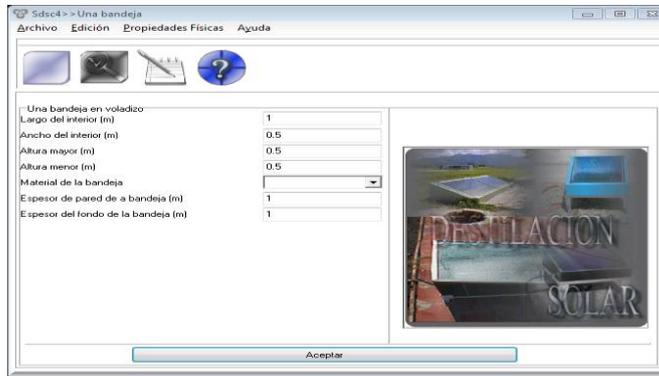
### Características principales del software

La primera pantalla del programa (Fig. 2) presenta un formulario en el que se solicita la introducción de datos climatológicos y dimensionales fundamentales para la simulación, tales como la radiación solar, los intervalos de temperatura ambiente, la velocidad del viento, el volumen de agua a destilar entre otros parámetros. En esta pantalla es donde se escoge la configuración de las bandejas que se desea utilizar de entre cuatro opciones disponibles: una bandeja, una bandeja en una base, dos bandejas y dos bandejas en una base.

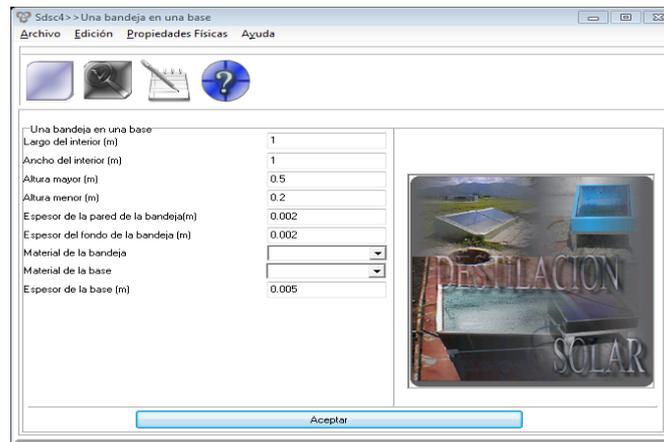


Fig. 2 Primera pantalla solicitando los datos iniciales para la simulación.

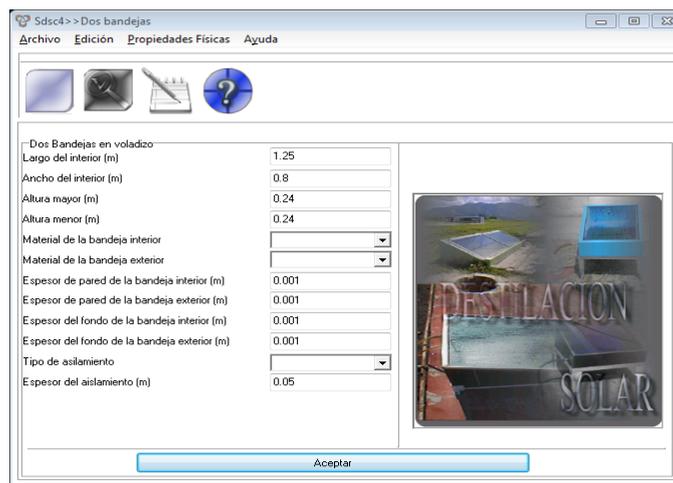
En función de la configuración escogida la segunda pantalla (Fig. 3) presentará diferentes parámetros que determinarán las dimensiones y el material a utilizarse tanto para la o las bandejas como para el aislamiento en caso de utilizarse. Nótese que estos son los valores controlables que mayor influencia ejercen sobre la productividad del destilador por lo que su elección en cierta medida ayuda en el proceso de diseño del equipo.



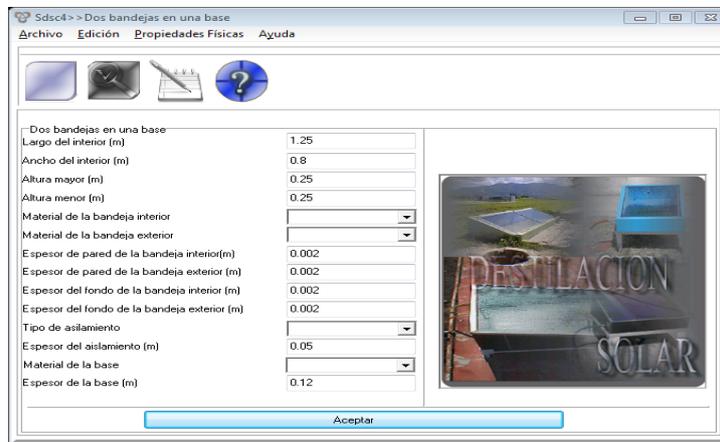
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fig. 3** Pantalla con los parámetros para la base y la bandeja en diferentes configuraciones.

En la figura 3, los esquemas son para diferentes configuraciones: (a) una bandeja, (b) una bandeja en una base, (c) dos bandejas, (d) dos bandejas en una base.

Una vez configurados todos los parámetros para la simulación, el programa está listo para calcular y reportar los resultados en la pantalla siguiente. En la misma los valores de temperatura y productividad calculados se encuentran agrupados dentro de opciones de una lista desplegable en las categorías de: *Temperaturas en el día*, *Productividad en el día*, *Temperaturas en la noche* y *Productividad en la Noche*. Escoger cualquiera de estas categorías presenta una tabla como las presentadas en la Fig. 4 en la que se muestran los valores en cada hora de las temperaturas de las tres zonas principales del destilador y la productividad durante el día, respectivamente.

Horas	Temp. Bandeja	Temp. Agua	Temp. Vidrio
1	35.95233154	36.09049606	26.91303634
2	37.85029983	39.16289520	29.56065940
3	39.61982345	42.20538711	32.03199005
4	41.13718414	44.70578002	34.10510635
5	42.28917694	46.61030960	35.68461227
6	43.00662231	47.59662626	36.54125213
7	43.23048782	47.77190395	36.70407104
8	42.94223785	47.13112640	36.16348646
9	42.15826416	45.70819854	34.95515060
10	40.92877576	43.57585144	33.15787506
11	39.33435821	40.84518432	30.88914295
12	37.48057174	37.66126251	28.36157417

(a)

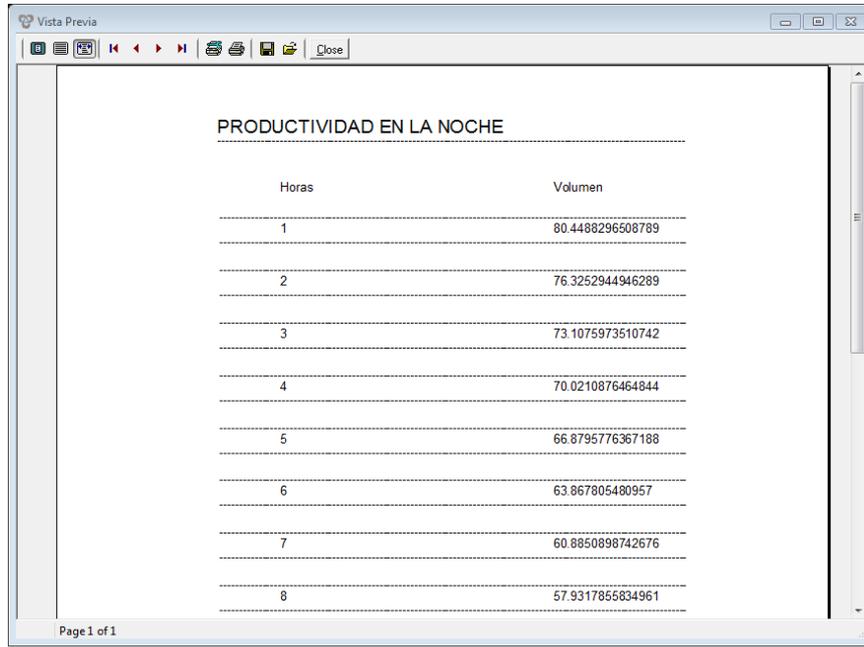
Horas	Volumen (ml)
1	91.90323638
2	131.0167694
3	176.5971832
4	217.5457916
5	251.2175292
6	268.5439756
7	271.4028015
8	259.6591491
9	234.5816192
10	198.7826232
11	156.0704956
12	110.3962020
Vol.TD ía	2367.717525

(b)

**Fig. 4 Resultado de la simulación: a) valores de temperatura en el día y b) valores de productividad en el mismo período.**

Utilizando la herramienta *Vista Previa* mediante el ícono con forma de lupa, ubicado en la zona superior de las pantallas, es posible imprimir los valores visualizados en la pantalla, o sea, si se ha seleccionado la categoría *Temperaturas durante el día* y se utiliza la herramienta antes mencionada, se tendrá una vista previa de la impresión de los valores calculados para las temperaturas en el horario diurno, Fig. 4a. Es importante señalar que es

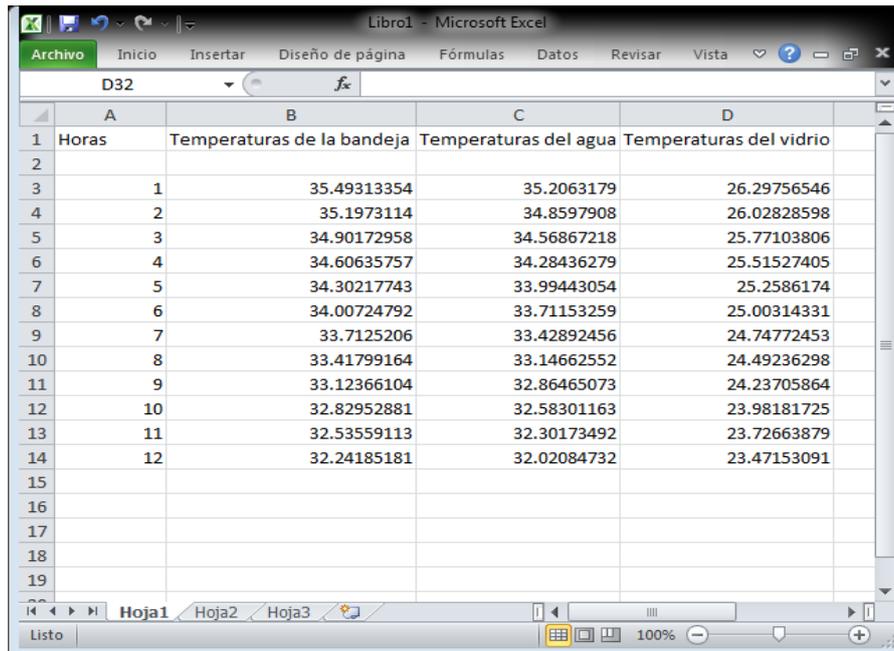
necesario visualizar la vista previa de los datos al menos una vez antes de poder utilizar la herramienta *Exportar al Excel*, que como su nombre indica permite la fácil exportación hacia Microsoft Excel, Fig. 5b.



The screenshot shows a 'Vista Previa' window with a table titled 'PRODUCTIVIDAD EN LA NOCHE'. The table has two columns: 'Horas' and 'Volumen'. The data is as follows:

Horas	Volumen
1	80.4488296508789
2	76.3252944946289
3	73.1075973510742
4	70.0210876464844
5	66.8795776367188
6	63.867805480957
7	60.8850898742676
8	57.9317855834961

(a)



The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data:

Horas	Temperaturas de la bandeja	Temperaturas del agua	Temperaturas del vidrio
1	35.49313354	35.2063179	26.29756546
2	35.1973114	34.8597908	26.02828598
3	34.90172958	34.56867218	25.77103806
4	34.60635757	34.28436279	25.51527405
5	34.30217743	33.99443054	25.2586174
6	34.00724792	33.71153259	25.00314331
7	33.7125206	33.42892456	24.74772453
8	33.41799164	33.14662552	24.49236298
9	33.12366104	32.86465073	24.23705864
10	32.82952881	32.58301163	23.98181725
11	32.53559113	32.30173492	23.72663879
12	32.24185181	32.02084732	23.47153091

(b)

Fig. 5 Pantallas con datos exportados a) para imprimir y b) hacia el Microsoft Excel.

Todos los valores de las propiedades de los componentes que intervienen en la simulación son tabuladas en una ventana accesible mediante el menú *Propiedades Físicas*, Fig. 6. Las mismas solo se pueden editar si se ha iniciado el programa como administrador, es decir, los usuarios invitados solo pueden visualizarlos pero no pueden cambiarlos.

Sdsc4 >> Una bandeja en una base

Archivo Edición **Propiedades Físicas** Ayuda

- Agua
- Aislante
- Aire
- Material de la Bandeja

Soluciones

Temperaturas en la noche [gr-C]

Temperaturas en la noche [gr-C]

Horas	Temp. Bandeja	Temp. Agua	Temp. Vidrio
1	35.49313354	35.20631790	26.2975654E
2	35.19731140	34.85979080	26.0282859E
3	34.9017295E	34.5686721E	25.7710380E
4	34.60635757	34.2843627E	25.51527404
5	34.30217742	33.99443054	25.25861740
6	34.00724792	33.7115325E	25.00314331
7	33.7125205E	33.4289245E	24.7477245E
8	33.4179916E	33.14662551	24.49236297
9	33.12366104	32.86465072	24.2370586E
10	32.82952880	32.58301162	23.98181724
11	32.53559112	32.30173492	23.7266387E
12	32.24185180	32.02084732	23.47153091

Fig. 6 Visualización de los valores que internamente utiliza el software para calcular el despliegue del menú *Propiedades Físicas*.

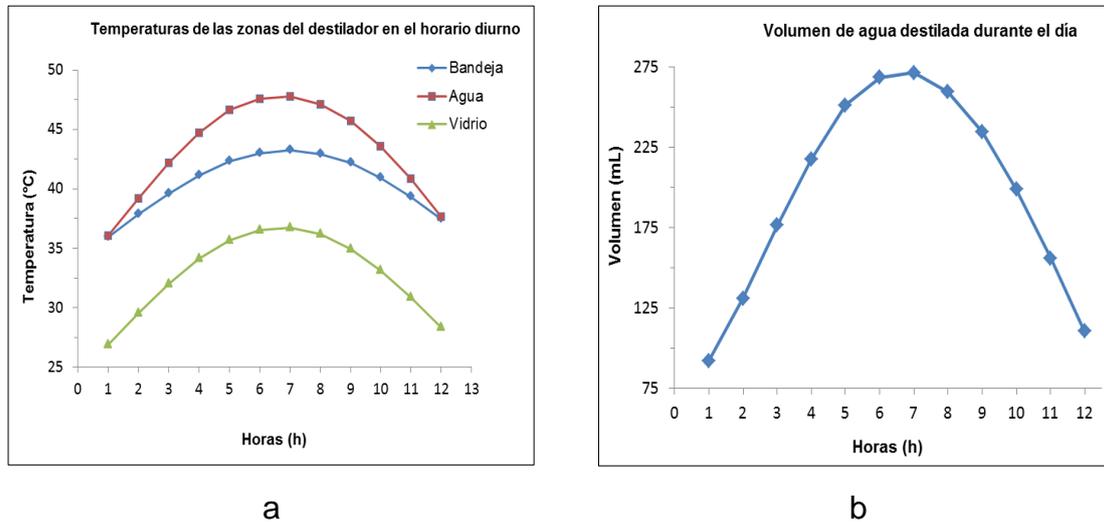
### Resultados y discusión

Para demostrar el funcionamiento del software se ha escogido un caso de estudio con la configuración siguiente:

Parámetro	Valor
Radiación solar	18657 kJ/m <sup>2</sup>
Volumen de agua a destilar	20 L
Temperatura ambiente máxima del día	30 °C
Temperatura ambiente mínima del día	25 °C
Temperatura ambiente máxima de la noche	25 °C
Temperatura ambiente mínima de la noche	22 °C
Velocidad del viento	2 m/s
Ángulo de inclinación del vidrio respecto a la horizontal	20 °
Largo del vidrio	0,8 m
Ancho del vidrio	1,25 m
Espesor del vidrio	0,004 m
Tipo de destilador a simular	Una bandeja en una base
Largo del interior	1 m
Ancho del interior	1 m
Altura mayor	0,5 m
Altura menor	0,2 m
Espesor de la pared de la bandeja	0,002 m
Espesor del fondo de la bandeja	0,002 m
Material de la bandeja	Acero
Material de la base	Hormigón armado
Espesor de la base	0,005 m

Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 7 y 8, en las que se puede visualizar que el comportamiento simulado es muy similar al obtenido de forma analítica en Fonseca-Fonseca [8]. En la Fig. 7 donde se representan las temperaturas expresadas en °C y la productividad ambas en mL, ambas durante el horario diurno, se puede observar que las curvas siguen un

comportamiento sinusoidal en ambos casos, con máximos coincidentes en el mismo punto alrededor del mediodía solar, cuando se alcanza el pico de irradiancia solar en total correspondencia con los resultados obtenidos en Fonseca-Fonseca [8].



**Fig. 7** Valores para el horario diurno obtenidos mediante la simulación, a) valores de temperatura en los diferentes partes del destilador y b) valores de productividad.

Por su parte la Fig. 8, que representa las temperaturas y la productividad durante el horario nocturno, describe un comportamiento decreciente, totalmente lógico si se entiende que durante este horario la irradiancia solar es mínima y la temperatura ambiente es más baja que durante las horas del día. Nótese que la curva de productividad nunca alcanza el valor cero debido al tipo de destilador que se está simulando, donde se utilizó una base de hormigón armado, material con un valor elevado de calor específico que conjugado con su masa provoca que el equipo posea una alta capacidad calorífica, favoreciendo la conservación de energía durante las horas de la noche y utilizándola para la destilación.

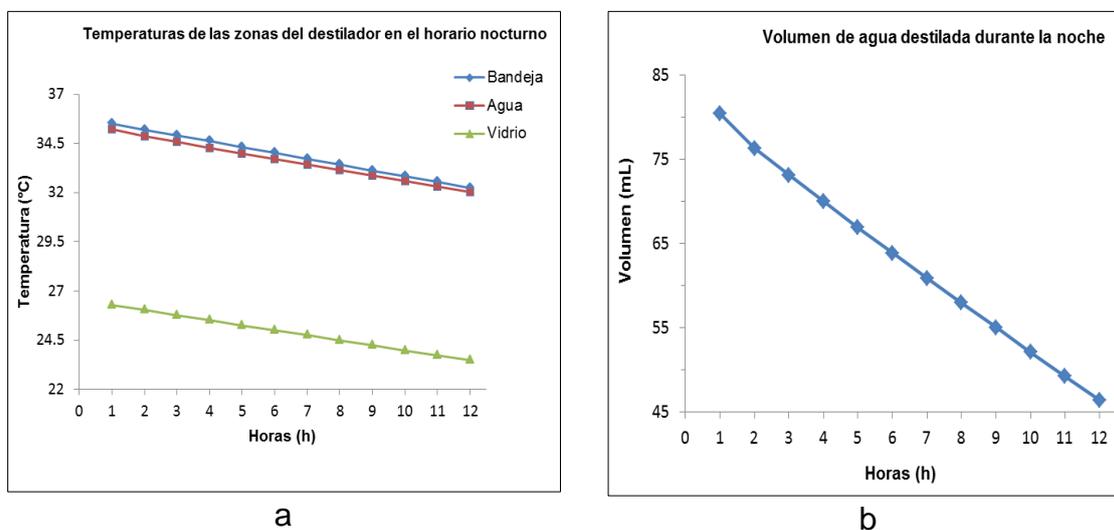


Fig. 8 Valores para el horario nocturno obtenidos mediante la simulación, a) valores de temperatura en los diferentes partes del destilador y b) valores de productividad.

## Conclusiones

- 1. Se elaboró el software SoftDest que permite el cálculo de las temperaturas en las tres partes fundamentales de un destilador solar de bandeja tipo invernadero caracterizando con estas el funcionamiento dinámico desde el punto de vista térmico así como predecir su productividad durante las 24 h del día**
- 2. Los resultados obtenidos mediante la simulación con el SoftDest están en total concordancia con los obtenidos mediante la solución analítica del mismo sistema de ecuaciones que describen el funcionamiento termodinámico del destilador, lo que induce a pensar en la validez de los mismos.**

## Bibliografía

1. FRANCO, J. "Producción de agua potable con energías renovables en zonas aisladas del Noa". Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina, 1994.
2. CLARK, J. A., "The Steady-State Performance of a Solar Still". Solar Energy, 1990, vol. 44, No 1, pp 43-49.
3. MASSIPE, J. R., FONSECA-FONSECA, S., et al. "Simulación numérica del destilador solar de cascada". Revista Tecnología Química, 1990, vol. XI, No 1, p. 55-64.

4. COOPER, P. I., "Digital simulation of experimental solar still data". *Solar Energy*, 1973, vol. 14, No 4, p. 451-468.
- [5] COOPER, P. I., "The maximum efficiency of single-effect solar stills". *Solar Energy*, 1973, vol. 15, No 3, p. 205-217.
6. DUNKLE, R. V. "International development in heat transfer". En: *ASME Proceedings. Inter. Heat Transfer, Part V*, University of Colorado, 1961, vol. 895.
7. FONSECA-FONSECA, S, ABDALA-RODRÍGUEZ, JL: "Modelo Matemático del Destilador Solar con materiales de la Construcción civil". *Revista Tecnología Química*, 1995, Vol 15. No. 1, p. 39-43.
8. FONSECA-FONSECA, S., MIRANDA-PERDOMO, E., TORRES-TEN, A., "Modelo matemático y solución analítica del funcionamiento de un destilador solar de bandeja". *Revista Tecnología Química*, 2012, vol. XXXII, N° 2, p. 154-161.