

Software “SoftDest” y su Validación

SoftDest Software and its Validation

*Ing. Susana Fonseca-Fonseca^I, Ing. Julio César Rosales-Rodríguez^I,
MSc. Fernando Fonseca-Acosta^{II}, Ing. Eider Miranda-Perdomo^I,
Ing. Osmanys Fuentes-Lombá^I*

*^ICentro de Investigaciones de Energía Solar, Cuba; ^{II}Universidad de Oriente,
Santiago de Cuba, Cuba*

sfonseca@cies.ciges.inf.cu

Resumen

En este trabajo se presenta un software para predecir el funcionamiento de destiladores solares, en el cual se tienen en cuenta parámetros constructivos y climatológicos, por lo cual es una herramienta útil para el dimensionado de estos equipos, se presenta su validación en tres equipos construidos en el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES). Se utilizan valores experimentales para validar los resultados teóricos reportados por el programa SoftDest. Para esto, se aplican métodos estadísticos de análisis de normalidad, correlación y bandas de predicción. Los datos experimentales fueron obtenidos de destiladores solares construidos con bandeja de metal, fibra de vidrio y materiales de la construcción, respectivamente. Los resultados demuestran la correspondencia entre los valores teóricos y los experimentales, indicando la factibilidad del uso de este programa para el dimensionado y simulación de destiladores solares.

Palabras clave: SoftDest, simulación, destiladores solares, validación estadística.

Abstract

In this work is presented a software to predict the behavior of solar stills, in this the climate and building parameters are taken into account, this means that it is a useful tool to dimension devices, its validation is presented based on three devices built in Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES). Experimental values are used to validate the theoretic results yielded by the SoftDest program. To do that, statistical methods like normality analysis, correlation analysis and finding the prediction bands were applied. Experimental data were obtained from solar distillers built with metal tray, glass fiber and materials for building, respectively. Results show the accurate of theoretical results and experimental data, pointing the feasibility of the use of this software to simulate and dimension solar distillers.

Keywords: SoftDest, simulation, solar stillers, statistical validation.

Introducción

El abastecimiento de agua contribuye de varias e importantes maneras al desarrollo económico y social de un país. Es una necesidad básica para usos domésticos, industrias, agricultura, construcción, seguridad para contribuir a un

ambiente sano. A nivel mundial existe una limitación en el abastecimiento de agua potable, además el crecimiento demográfico impone enormes demandas de agua cada vez mayores. Al mismo tiempo, este líquido no está distribuido equitativamente. En algunas partes del mundo las personas se relajan en piscinas de aguas azules y perfumadas, mientras en las zonas rurales de África es corriente que la mujer tenga que caminar todos los días varios kilómetros para satisfacer las necesidades de agua de su familia. Además de la cantidad de agua es importante tomar en cuenta su calidad [1].

Aunque los beneficios en la salud debido al mejoramiento en el abastecimiento de agua y la eliminación de residuos son difíciles de aislar y prácticamente imposibles de medir, sin embargo, es cierto que la propia agua contaminada es responsable de la mayor parte de las enfermedades del Tercer Mundo, entre ellas la disentería amebiana, el cólera, el tracoma y la fiebre tifoidea. Más de 25 mil personas padecen todos los días a causa de enfermedades originadas por el agua no potable [1].

La desalación y la reutilización de aguas son dos sectores que pueden contribuir en un futuro cercano a la solución de muchos de los problemas derivados de la escasez de agua potable que se presentan en el mundo. Aunque el uso de agua de mar para el aprovechamiento humano es, al menos como idea, muy antiguo, su aplicación real data de mediados del siglo XX, al producirse un avance en la tecnología. La desalación de aguas es una técnica no convencional para incrementar las disponibilidades de este recurso que consiste en tratar aguas saladas o salobres procedentes del mar o de acuíferos salinos, y quitándoles las sales, transformarlas en aguas aptas para abastecimiento a poblaciones o riego. Esta técnica es utilizada para superar los problemas de déficit de abastecimiento humano, es una opción explotada en algunos países con clara escasez de recursos hídricos por considerar este tratamiento como uno de los más idóneos.

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. Para predecir el comportamiento de cualquiera de estos dispositivos antes de

su construcción resulta necesario realizar su modelación matemática y simulación numérica.

Con el objetivo de poseer una herramienta útil para la modelación de destiladores solares tipo bandeja se desarrolló el software SoftDest. El mismo implementa un modelo matemático para la modelación de la distribución de las temperaturas en las diferentes partes de un destilado, y con estas temperaturas se evalúa el volumen de agua destilada en un intervalo de tiempo específico [2]. SoftDest permite de forma eficiente y rápida realizar los cálculos necesarios para el dimensionado y estudio de destiladores solares de bandeja, así como analizar el comportamiento de estos equipos ante la variación de los parámetros que incluyen variables meteorológicas y diversos materiales constructivos. Sin embargo, dado que sus resultados se obtienen mediante simulación numérica, la verificación y validación del modelo utilizado es un paso crítico, ya que permite determinar si el modelo es válido para la modelación del fenómeno bajo estudio.

Debido a la importancia y las potencialidades de esta herramienta como simplificador y facilitador para el diseño, dimensionado y evaluación de destiladores solares de tipo invernadero, SoftDest requiere que sus resultados numéricos sean validados por medio de la comparación con valores experimentales obtenidos de mediciones realizadas a equipos operando en condiciones reales. Por tal motivo el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el nivel de correlación y el tipo de relación existente entre los resultados del SoftDest y los valores experimentales.

Materiales y métodos

Equipos utilizados para la medición experimental

Las mediciones experimentales se realizaron de forma horaria en tres equipos contruidos en el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES). Los datos de radiación solar, temperatura ambiente, y velocidad del viento se registraron por el CIES. Se utilizaron termorresistencias de platino y termómetros de columna líquida de mercurio con intervalo de 0 - 100 °C con clase de precisión de 1 °C, y probeta graduada para medir el volumen de agua destilada.

Descripción del destilador metálico

El destilador solar metálico, fue construido con bandejas formadas por chapas de acero galvanizado recubiertas con pintura negro mate. Como aislante térmico se utilizaron láminas de poliestireno expandido de 50 mm de espesor. La cubierta de vidrio es de 4 mm de espesor (3). En su borde inferior, el vidrio descansa sobre una canal de recolección de agua destilada (5) construida de acero inoxidable. Una manguera plástica conecta la canal de recolección al frasco de recolección evitando la contaminación con el ambiente. La alimentación del agua se realiza por la parte trasera mediante un tubo plástico (7). El destilador se coloca inclinado 20° respecto a la horizontal sobre una base de perfiles angulares de 25 mm x 25 mm. Las pruebas experimentales permitieron medir una productividad promedio de 3 L / m² día [3]. Figura 1.

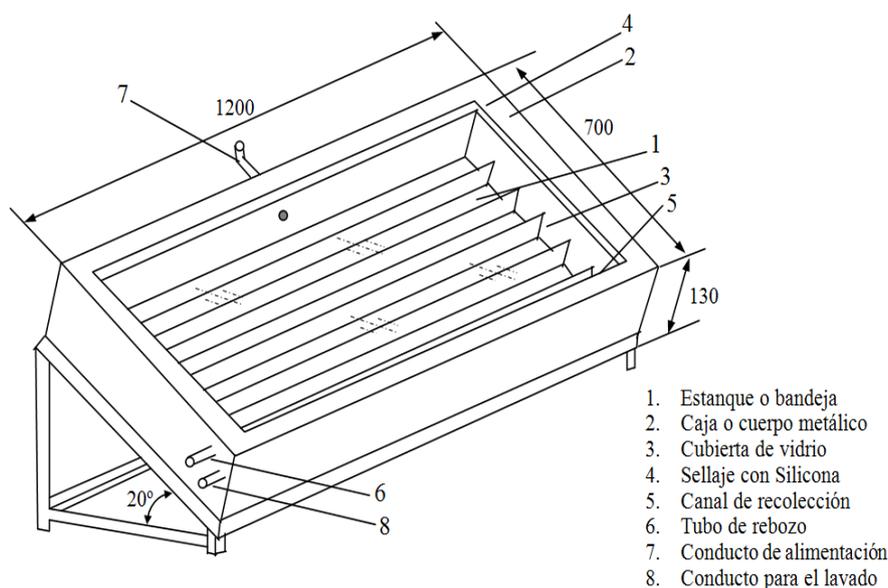


Fig. 1. Esquema del destilador metálico utilizado en las mediciones experimentales

Este destilador fue investigado por un período de tiempo en el cual demostró sus buenas cualidades desde el punto de vista de funcionamiento. Una muestra del comportamiento térmico del equipo se presenta a continuación a partir de mediciones realizadas durante un día del período evaluado con radiación solar de 18 657 kJ.

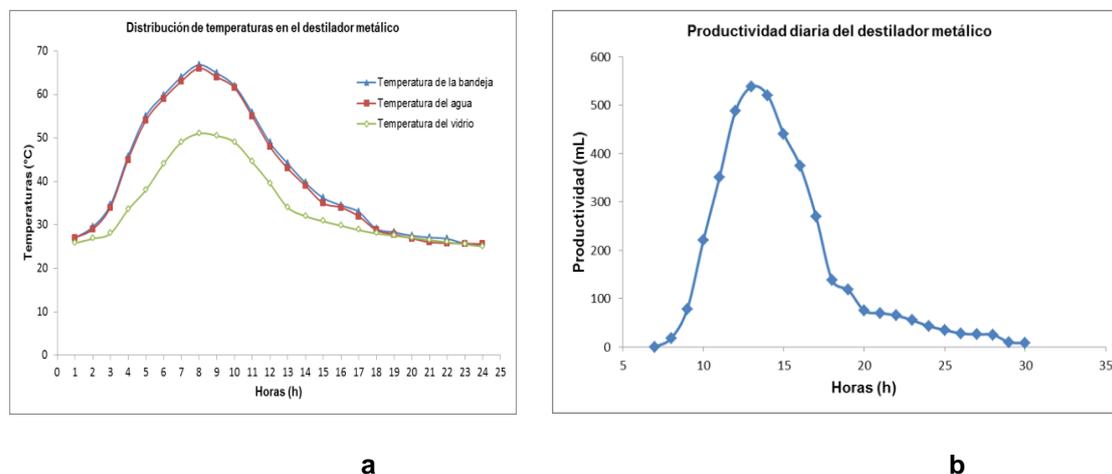


Fig. 2. a) Distribución de temperaturas y b) Productividad diaria del destilador metálico

En la figura 2 se observa el comportamiento de la temperatura en el vidrio, el agua y la bandeja del destilador. Se observa que las temperaturas en los diferentes puntos señalados siguen una trayectoria similar, comenzando con valores bajos, que se incrementan en el transcurso del día al incrementarse la radiación solar incidente y después de alcanzar valores máximos en el período de 12:00 m a 1:00 pm comienzan a disminuir paulatinamente al disminuir la radiación solar. se aprecia la variación horaria del volumen de agua destilada. A partir de su inicio el volumen horario de agua destilada se va incrementando y alcanza valores máximos en el período de 1:00 pm a 3:00 pm, coincidiendo con el intervalo de máxima radiación solar y mayor temperatura del agua, después de este período el volumen de agua destilada disminuye progresivamente, la destilación continúa algún tiempo aún después de la puesta del sol, debido a la energía almacenada en la masa de agua, y cesa en las últimas horas del día.

Descripción del destilador de materiales de la construcción

El destilador de materiales de la construcción (figura 3), consta de un depósito (2) construido con bloques o ladrillos sobre una base de hormigón (1), que contiene el agua a destilar (7), y tiene paredes de poca altura. Una de las paredes de este recipiente (la posterior) tiene una altura mayor que la otra, para dar la inclinación necesaria al vidrio (3), y permitir el deslizamiento de las gotas de agua destilada por la superficie interna del mismo hasta la canal de recolección del agua destilada (5) que debe ser de acero inoxidable. En la unión del vidrio con el depósito se garantizó la hermeticidad para evitar fugas de vapor o entrada de polvo, agua de lluvia u otra suciedad ya que

este es un aspecto es de vital importancia. Ensayos de campo permitieron medir una productividad promedio de 2 L/m² día [3].

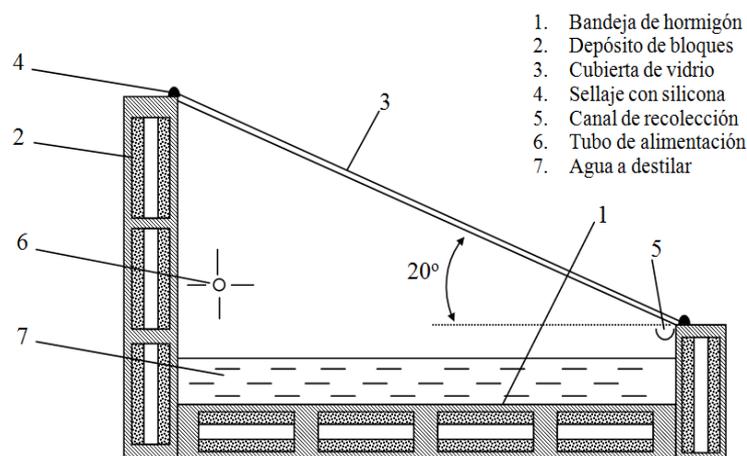


Fig. 1. Esquema del destilador de materiales de la construcción utilizado en las mediciones experimentales

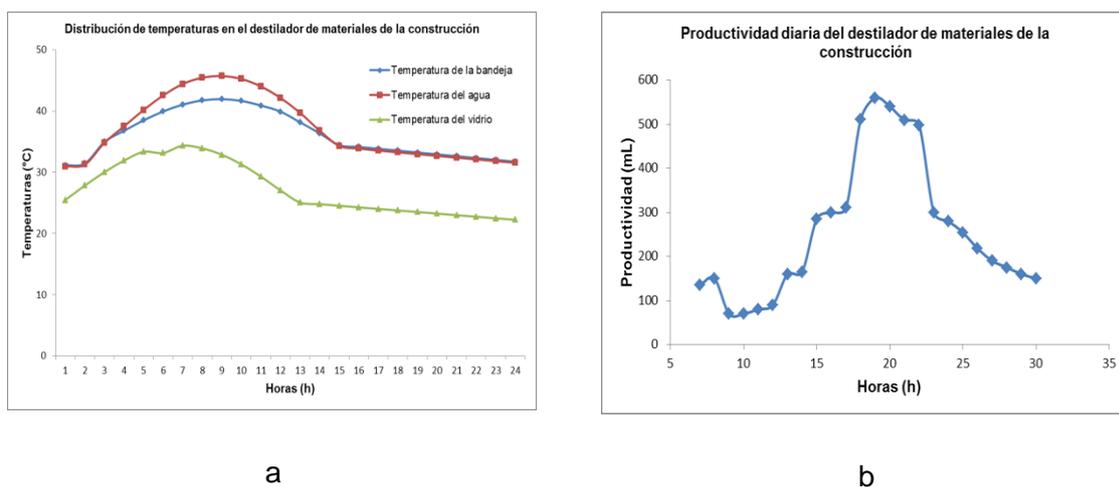


Fig. 4.a) Distribución de temperaturas y b) Productividad diaria del destilador de materiales de la construcción

En la figura 4, se ilustran los resultados experimentales de la temperatura de la cubierta de vidrio y del agua, así como la productividad horaria a lo largo de todo el día. Las temperaturas máximas se alcanzan alrededor del mediodía solar lo que responde a los picos de irradiancia solar. La temperatura máxima del vidrio durante estas mediciones fue 34,3°C y se alcanza a las 13 h, mientras que la temperatura máxima del agua fue 45 °C y se alcanza un poco después, alrededor de las 15 h. Este desfase se debe a las propiedades termofísicas de los materiales, es decir, el vidrio al tener una menor masa y

menor calor específico, presenta una menor inercia térmica en relación con el agua, la cual demora un poco más en calentarse y en enfriarse.

Descripción del destilador de fibra de vidrio

El destilador solar de fibra de vidrio, con 0,16 m² de área de captación, consta de un depósito construido de fibra de vidrio (3) que contiene el agua a destilar, y tiene paredes de poca altura. Una de las paredes de este recipiente (la posterior) tiene una altura mayor que la otra, para dar la inclinación necesaria al vidrio (1), y permitir el deslizamiento de las gotas de agua destilada por la superficie interna del mismo hasta la canal de recolección del agua destilada (2) construida del mismo material y con salida por un tubo de acero inoxidable que se acopla a una manguera unida directamente al pomo de recolección de agua destilada. Tiene además un orificio en la parte superior de la pared posterior para la entrada de agua a destilar y uno en la parte inferior para rebozo. En la parte superior, cerrando el equipo se encuentra una cubierta de vidrio inclinada a 20° respecto a la horizontal. A continuación se muestra una vista de sección transversal y una foto del equipo. Figura 5

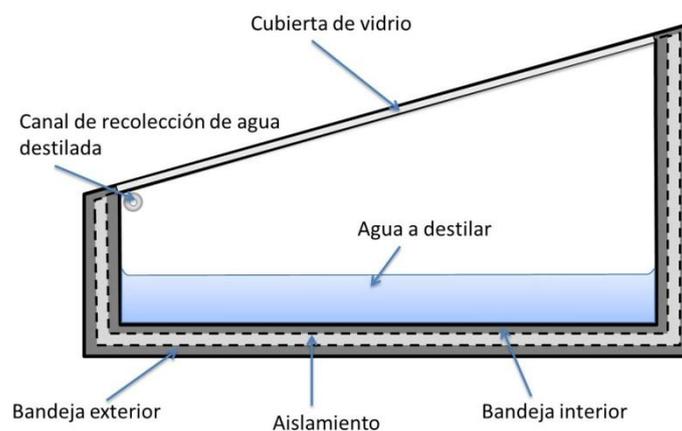
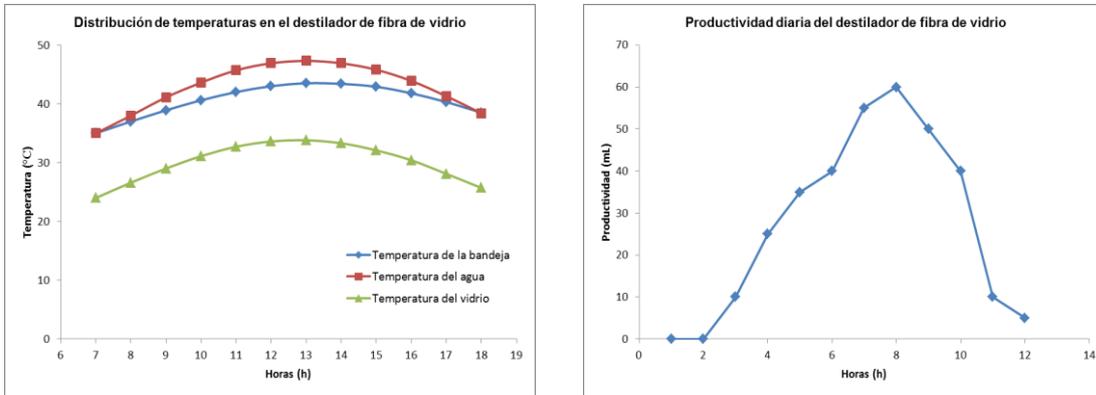


Fig. 5. Esquema del destilador de fibra de vidrio utilizado en las mediciones experimentales



a

b

Fig. 6. a) Distribución de temperaturas y b) Productividad diaria del destilador de fibra de vidrio

En la figura 6 se ilustran los valores experimentales de la temperatura de la cubierta de vidrio, del agua y de la bandeja, así como la productividad horaria a lo largo del día solar. Las temperaturas en las partes medidas siguen la misma tendencia, las máximas se alcanzan alrededor del mediodía solar lo que responde a los picos de irradiancia solar. Del gráfico del volumen de agua destilada de forma horaria, se puede observar que el equipo comienza a destilar entre las 9:00 am y las 10:00 am y el volumen de agua destilada aumenta progresivamente alcanzando valores máximos entre las 12:00 m y 2:00 pm donde destila aproximadamente el 43% del destilado total. Luego el volumen de agua destilada va disminuyendo progresivamente hasta las 5:00 pm hora en que prácticamente termina de destilar.

Validación estadística de la simulación numérica

Se realiza un análisis estadístico para validar los resultados obtenidos con el programa, para ello se comparan los resultados experimentales en tres destiladores solares con los simulados. Las técnicas empleadas para este análisis son la correlación y regresión lineal, bandas de predicción y una prueba de hipótesis para la comparación de las medias entre los datos experimentales y los simulados. Se analizan si los datos experimentales y simulados siguen una distribución normal para poder aplicar las herramientas estadísticas para validar los resultados del programa SoftDest.

Análisis de Normalidad de los Datos

Aplicando la prueba de normalidad según el método de Kolmogorov-Smirnov se determina que los datos de temperatura en la bandeja, el agua y el vidrio, así como el volumen de agua destilada, para cada uno de los destiladores estudiados, siguen aproximadamente una distribución normal obteniéndose en todos los casos un coeficiente p superior a 0,05, lo que significa que no es posible rechazar la normalidad. Los valores exactos del parámetro p en cada uno de los casos se resumen en la tabla 1.

Tabla 1
Valores del parámetro p de Kolmogorov-Smirnov para la prueba de normalidad de los datos medidos en los destiladores

Destilador	Bandeja		Agua		Vidrio		Agua destilada	
	Experimental	Simulada	Experimental	Simulada	Experimental	Simulada	Experimental	Simulada
Metálico	0.38645	0.16798	0.29472	0.10782	0.32613	0.20413	0.05135	0.06303
Materiales de la construcción	0.38645	0.38645	0.77282	0.77282	0.71091	0.71091	0.49803	0.49803
Fibra de Vidrio	0.26568	0.26568	0.26396	0.26396	1	1	0.65276	0.65276

Análisis de correlación

La tabla 2 presenta un resumen de los valores que toma el parámetro de correlación, r , para cada uno de los pares teórico-experimental de los 3 destiladores estudiados. Se puede apreciar que existe una fuerte correlación positiva tomando en todos los casos valores superiores a 0,80 siendo significativa para los valores de volumen de agua destilada, resultado de mayor interés en el estudio de los destiladores solares, donde r adquiere valores por encima de 0,92, muy próximos a la correlación netamente lineal.

Tabla 2
Valores obtenidos para el parámetro de correlación en todos los casos estudiados

Destilador	Temperatura de la bandeja	Temperatura del agua	Temperatura del vidrio	Volumen de agua destilada
Metálico	0.91	0.89	0.82	0.94
Materiales de la construcción	0.96	0.97	0.90	0.93
Fibra de Vidrio	0.85	0.91	0.81	0.95

Una vez demostrada la correlación entre los datos teóricos y los experimentales se utiliza el análisis por bandas de predicción, para determinar la posibilidad de utilizar los resultados del programa en la estimación de los valores reales. Se utilizará como muestra para el análisis exhaustivo los datos obtenidos del destilador de bandeja metálica. Realizaremos el análisis para las temperaturas en la bandeja, el agua y el vidrio y para los valores de la productividad.

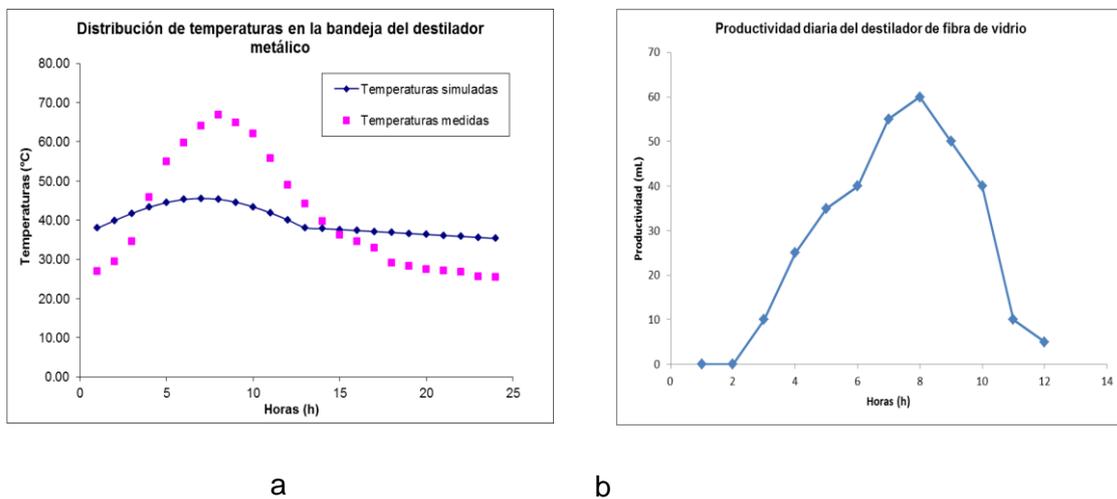


Fig. 7. Temperaturas en la bandeja del destilador metálico. a) Valores experimentales comparados con los simulados. b) Relación entre los valores experimentales y los simulados

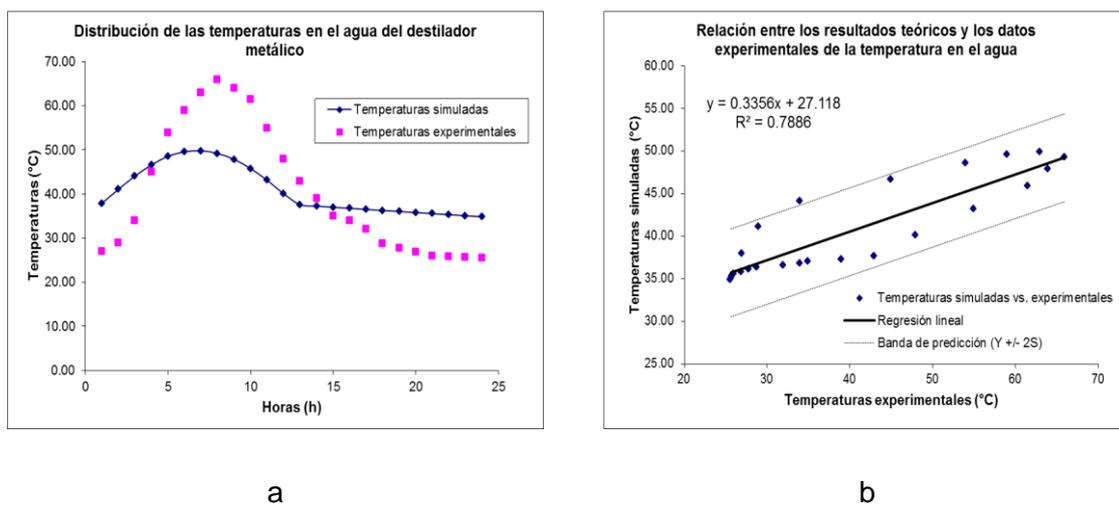


Fig. 8. Temperaturas en el agua del destilador metálico. a) Valores experimentales comparados con los simulados. b) Relación entre los valores experimentales y los simulados

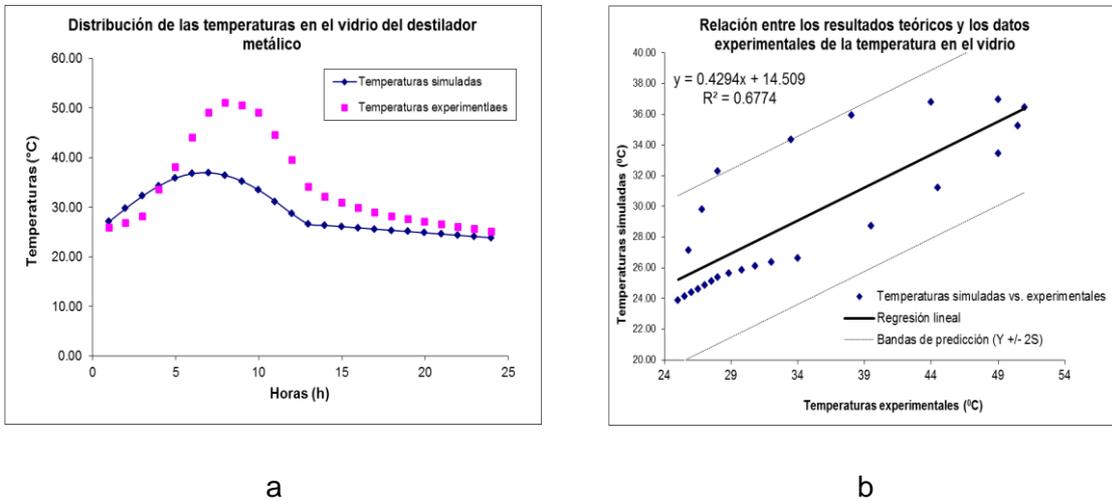


Fig. 9. Temperaturas en el vidrio del destilador metálico. a) Valores experimentales comparados con los simulados. b) Relación entre los valores experimentales y los simulado

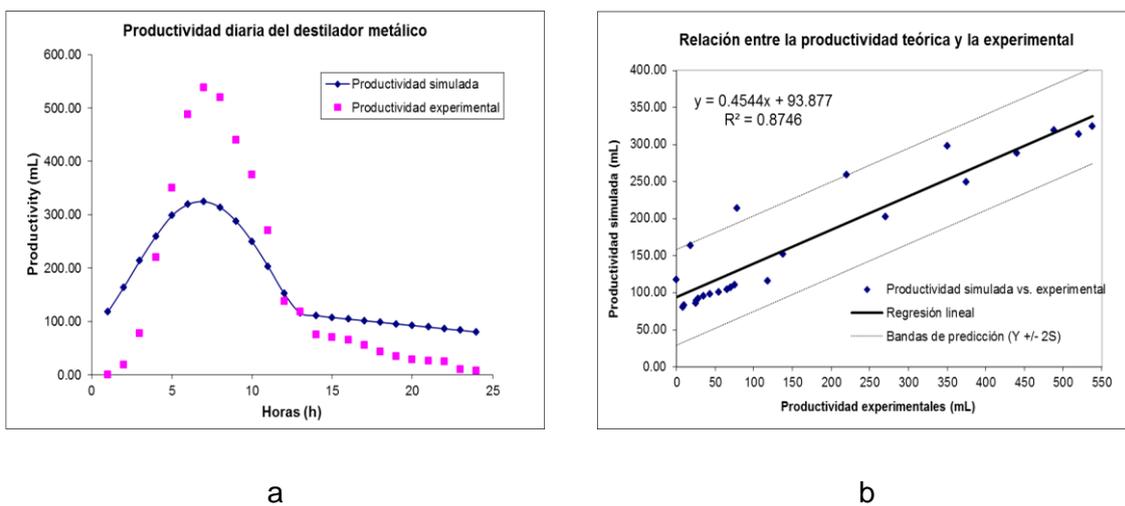


Fig. 10. Productividad diaria del destilador metálico. a) Valores experimentales comparados con los simulados. b) Relación entre los valores experimentales y los simulados

En las figuras 7a, 8a, 9a y 10a se muestra, a modo de comparación, el comportamiento de los datos experimentales y teóricos para las temperaturas en las tres partes fundamentales y los valores de productividad, respectivamente. Se puede apreciar que existe una diferencia en los correspondientes mínimos y máximos en todos los casos. Esto se puede explicar en la forma siguiente: para el cálculo se utilizó como parámetro la radiación total incidente en un día de experimentación, esta radiación total se modeló con una ecuación sinusoidal distribuyéndose los valores de radiación

horaria de forma más homogénea que la realidad, por lo que los valores picos simulados no se corresponden totalmente con los experimentales. Para resolver esta diferencia sería necesario estudiar otras funciones para modelar la distribución horaria de la radiación solar y determinar la que mejor se aplica.

Tabla 3
Valores obtenidos para r^2 en todos los casos estudiados

Destilador	Temperatura de la bandeja	Temperatura del agua	Temperatura del vidrio	Volumen de agua destilada
Metálico	0.83	0.79	0.68	0.87
Materiales de la construcción	0.93	0.95	0.81	0.86
Fibra de Vidrio	0.73	0.84	0.65	0.90

En las figuras 7b, 8b, 9b y 10b se representa la relación existente entre los datos experimentales y los resultados teóricos para las temperaturas en las tres partes fundamentales del destilador y los valores de productividad, respectivamente. Se aplica en todos los casos una regresión lineal y sus correspondientes bandas de predicción. Los ajustes lineales reportan valores de r^2 en el orden de 0,8, 0,8, 0,7 y 0,9 respectivamente, valores que, aun siendo afectados por la distribución de radiaciones horarias, permiten establecer una relación lineal entre los datos experimentales y los resultados teóricos posibilitando la estimación de uno en función del otro en al menos un 70 % de los casos. La tabla 3 muestra todos los valores de r^2 para los tres destiladores estudiados. Nótese que los valores mínimos se obtienen para la temperatura en el vidrio en los tres destiladores mientras que el resultado fundamental, el volumen de agua destilada, exhibe altos valores de r^2 en todos los casos.

Utilizando las bandas de predicción para realizar el análisis se obtiene que más del 95 % de los valores analizados se explican mediante una ecuación lineal con un error de $\pm 2S$, siendo S la desviación estándar; que en el destilador metálico para las temperaturas en la bandeja toma el valor de 1,5 °C, en el agua es de 2,6 °C, en el vidrio es 2,7 °C y para el volumen de agua destilada su valor es de 32,3 mL. En el resto de los casos estudiados el comportamiento es muy similar.

Del estudio de correlación realizado a los datos experimentales y los resultados teóricos se determinó la fuerte correlación existente entre ellos, que junto al análisis por bandas de predicción y los valores de r^2 , obtenidos del ajuste lineal de la relación teórico-experimental, brinda las bases para argumentar que SoftDest predice el comportamiento de los destiladores con buena aproximación.

Conclusiones

- 1. Las temperaturas y productividad simuladas siguen una distribución normal y se determinó que existe una fuerte correlación entre los valores experimentales y los resultados teóricos representada en todos los casos por un coeficiente de correlación lineal superior a 0,80.**
- 2. El coeficiente de determinación r^2 demostró que es posible estimar los valores experimentales de productividad a partir de los teóricos con una aproximación superior al 85 %.**
- 3. El análisis por bandas de predicción mostró resultados que permiten aceptar la predicción de valores experimentales a partir de los simulados.**
- 4. Por todo lo expuesto se considera adecuado SoftDest para predecir el funcionamiento de destiladores solares tipo invernadero.**

Referencias bibliográficas

1. NANDWANI, SHYAM S.; MARIN, S. Estudio preliminar de tres modelos destiladores solares para producir sal y agua potable. En *Uniciencia*. Universidad Nacional Costa Rica, 1986. pp. 59-69.
2. FONSECA FONSECA, S. *et al.* Modelo matemático y solución analítica del funcionamiento de un destilador solar de bandeja. *Tecnología Química*, 2012, **32** (2), pp. 154-161.
3. FONSECA S. *et al.* Destilación de agua con energía solar. Informe Final. CIES, 1993.