

DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ENERGÉTICAS Y PRODUCCIÓN NOCTURNAS PARA UN DESTILADOR SOLAR ASISTIDO CON TANQUE ACUMULADOR

Fabián L. Venier, Rodolfo G. Stoll, Javier Marchesi, María I. Pontín, Javier H. Zizzias

Grupo de Energía Solar – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC) Ruta Nacional 36 km 601 C.P. 5800 – Córdoba
Tel. 0358-4676488 email: fvenier@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: Este estudio presenta un análisis detallado de un destilador solar asistido por un colector solar de placa plana y un tanque de almacenamiento, con especial énfasis en la cuantificación de las pérdidas energéticas nocturnas del sistema. Mediante un ensayo en condiciones aisladas, se recopilieron datos experimentales para evaluar los factores que influyen en las pérdidas térmicas durante la noche, determinando el coeficiente de pérdidas nocturnas del tanque de almacenamiento. La correlación de este parámetro con los resultados experimentales permite establecer un modelo predictivo del comportamiento del sistema en condiciones de producción nocturna. Adicionalmente, se propone un modelo teórico para estimar la producción de agua destilada durante la noche, lo que constituye un avance para la optimización del diseño de destiladores solares. Este trabajo contribuye al desarrollo de herramientas de simulación más precisas, facilitando la implementación de sistemas sostenibles de desalinización solar con mayor eficiencia energética. Los hallazgos obtenidos representan un aporte significativo hacia soluciones tecnológicas escalables para enfrentar la escasez de agua en regiones áridas y semiáridas.

Palabras clave: destilación solar, pérdidas térmicas nocturnas, coeficiente de pérdidas, modelado predictivo, desalinización sostenible.

INTRODUCCIÓN

La demanda de agua potable a nivel global se incrementó por el aumento poblacional, lo que ha impulsado a la búsqueda de soluciones sostenibles tanto para la desalinización y descontaminación del agua dulce disponible. La escasez de agua potable afecta a millones de personas con implicaciones directas sobre la salud y el desarrollo socioeconómico de las poblaciones (Tiwari G.N. et al., 2008).

La destilación solar surge como una alternativa viable, especialmente en regiones áridas y remotas con alta irradiación solar como la de la región centro sur de Córdoba (Galimberti P. et al. 1995), la cual es una región cuya heliofanía favorece las aplicaciones solares (Grossi Gallegos H., Righini R., 2007), ofreciendo una solución de bajo impacto ambiental para potabilización. En Argentina, la alta irradiación solar favorece la aplicación de esta tecnología, con experiencias exitosas en San Luis y Córdoba con destiladores solares asistidos con colectores (Marchesi J. et al., 2006) y con destiladores solares con tanque acumulador (Zizzias J. et al., 2012).

Un destilador solar es un dispositivo que utiliza la energía solar para purificar agua salobre o contaminada. Este sistema consiste de una batea y que tiene adosada una cubierta. La radiación solar que ingresa por la cubierta evapora el agua contenida en una batea; el vapor entra en contacto con la superficie fría de la cubierta, donde se condensa y se recolecta como agua limpia. Los destiladores solares se clasifican en pasivos (que operan sin ayuda externa) y activos (que incorporan sistemas



adicionales, como calentadores o concentradores, para mejorar su eficiencia). Entre las innovaciones en destiladores activos destacan el uso de concentradores cilíndricos parabólicos (CCP) (Panchal et al., 2021), materiales de cambio de fase (Kumar S. et al. 2024), colectores solares (Marchesi et al., 2006) o tanques acumuladores integrados (Zizzias J. et al., 2012). Estudios más recientes (Mevada et al., 2022; Nema et al., 2025) han profundizado en el papel del almacenamiento térmico y las estrategias de retención de calor para mejorar la producción nocturna.

Sin embargo, optimizar estos diseños requiere evaluar múltiples variables, desde parámetros operativos hasta condiciones climáticas. Aquí es donde la simulación emerge como una herramienta indispensable: permite modelar el comportamiento del destilador, predecir su rendimiento y reducir costos de experimentación. Por ejemplo, Cooper (1973) pionero en simular digitalmente el funcionamiento transitorio de destiladores, sentó las bases para estudios posteriores. Más tarde, Voroupulos et al. (2003) desarrollaron ecuaciones lineales que vinculan condiciones climáticas con la producción de agua, adaptables a distintos tipos de destiladores. Estos avances demuestran que el modelado físico-matemático, basado en balances de energía (Tiwari et al., 2008), es clave para diseñar sistemas más eficientes y escalables.

En este sentido, el Grupo de Energía Solar (GES) de la Universidad Nacional de Río Cuarto ha investigado el destilador solar con tanque acumulador integrado y presentando una modificación asistido por dos colectores solares (DS2C), logrando un aumento significativo en la producción de agua destilada (Marchesi J. et al., 2006; Marchesi, J. et al., 2009; Zizzias J. et al.; 2010; Zizzias J. et al.; 2012). No obstante, aún no se ha explorado la optimización del funcionamiento de este dispositivo. El objetivo del estudio es presentar un modelo que permita realizar un análisis de sensibilidad del prototipo durante el período de producción nocturna.

Prototipo experimental

El prototipo experimental empleado se muestra en la figura 1 fue desarrollado por Marchesi J., et al., (2006), el que consiste en un módulo de destilador con una superficie de batea de 1 m² y con cubierta asimétrica desmontable. de vidrio de espesor 0,004 m. Este diseño solo permite una única orientación para su operación, la que corresponde a su eje puesto en la dirección Este-Oeste. En estas condiciones casi toda la radiación solar ingresará al destilador por la placa de vidrio principal. A este destilador se le adosó en su parte inferior un Tanque Acumulador de Acero Inoxidable cuyas medidas son 0,8 m de altura por 0,8 m de diámetro. La batea tiene en su base una abertura circular de igual diámetro que el tanque y es por donde se comunican ambas partes. La alimentación es por la parte superior del tanque, luego de que el agua se precaliente en dos colectores solares, colocados en paralelo, de placa plana de 2 m² de superficie cada uno, orientados al Norte con un ángulo de inclinación de 44°.

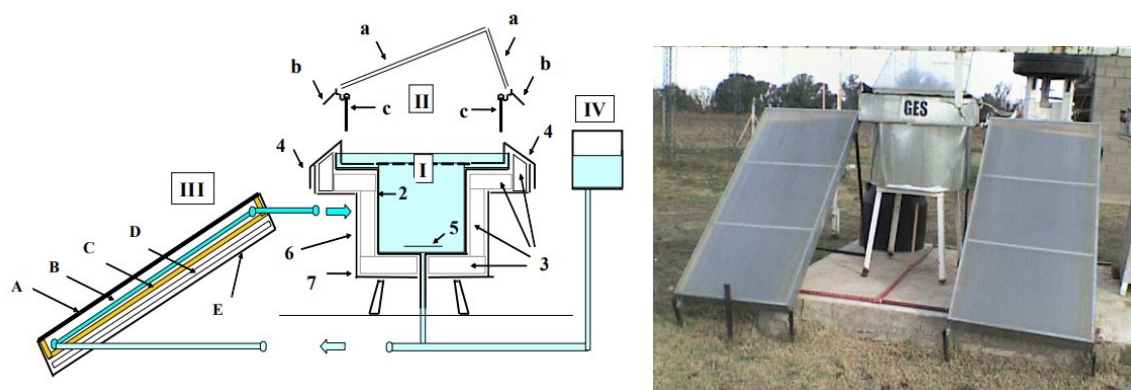


Figura 1: Diagrama e imagen del destilador solar asistido térmicamente (DS2C)

Las principales partes separadas, fuera de escala son: (I) Batea con acumulador. (II) Cubierta vidriada asimétrica desmontable. (III) Colector solar plano. (IV) Tanque de alimentación y control del nivel de la batea.

En (I) tenemos: I.2. Tanque cilíndrico, prolongación de la batea. I.3. Aislantes de poliestireno expandido. I.4. Manta de material plástico que cubre el fondo de la batea y que vuelca hacia los laterales para cubrir la parte superior de sus aislaciones (el sector del círculo que cubre el cilindro perforaciones). I.5. Placa difusora. I.6. Cubierta metálica para la protección del material aislante. I.7. Soporte para elevación y nivelación.

En (II) se encuentra: II.a. Vidrio plano de 0,004 m. II.b. Moldura de acero inoxidable que contiene el canal colector del destilado, el canal invertido para alojar las placas de soporte y sellado de la cubierta vidriada con la batea. II.c. Placa compuesta de material aislante (policarbonato y vidrio) que permiten el cierre entre la cubierta vidriada y la batea, encerrando la atmósfera contenida entre ambas.

En (III) tenemos: III.A. Cubierta de policarbonato celular. III.B. Receptor – convertidor de la radiación solar. III.C. Aislante térmico (lana de vidrio). III.D. aislante térmico (poliestireno expandido). III.E. Caja metálica.

Pérdidas térmicas nocturnas

La producción nocturna de agua destilada está directamente vinculada a las pérdidas térmicas del tanque acumulador a través de dos mecanismos clave:

1. Transferencia de calor útil.

El calor almacenado en el tanque:

$$Q_{\text{útil}} = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Se transfiere a la batea durante la noche, generando evaporación.

Las pérdidas térmicas:

$$Q_{\text{pérdidas}} = U_{\text{tank}} \cdot A_{\text{tank}} \cdot (T_{w_{\text{tank}}} - T_a) \quad (2)$$

Reducen esta energía disponible, disminuyendo la producción según:

$$\dot{m}_{\text{destilado}} \propto \frac{Q_{\text{útil}} - Q_{\text{pérdidas}}}{h_{fg}} \quad (3)$$

Donde h_{fg} es el calor latente de vaporización.

2. Constante de decaimiento del sistema:

Las pérdidas determinan la velocidad de enfriamiento:

$$\kappa = \frac{U_{\text{tank}} \cdot A_{\text{tank}}}{m \cdot c_p} \quad (4)$$

Una κ baja (bajas pérdidas) mantiene $T_{w_{\text{tank}}}$ elevada por más tiempo, extendiendo la producción.

Una κ alta (altas pérdidas) acelera el enfriamiento, reduciendo la producción acumulada.

Los resultados de este estudio constituyen la base fundamental para cuantificar en futuras investigaciones el aporte energético de los colectores solares acoplados al sistema (Figura 1), permitiendo así optimizar tanto el dimensionamiento del área de captación como los parámetros de operación, con el objetivo de maximizar la eficiencia global del destilador solar en condiciones reales de operación.

Para el desarrollo de un modelo que permita determinar la producción nocturna se realizó un ensayo de enfriamiento con objeto de determinar las pérdidas térmicas nocturnas del tanque acumulador aislado, excluyendo la influencia de los colectores solares y del destilador. Los resultados obtenidos permitirán caracterizar las pérdidas energéticas asociadas a condiciones ambientales y al acoplamiento del sistema de destilación, así como cuantificar el calor útil transferido desde el tanque hacia el destilador durante el periodo nocturno.

METODOLOGÍA

Método de ensayo de pérdidas nocturnas del tanque aislado

Para realizar el ensayo, se retiró la cúpula de vidrio del destilador y se aisló térmicamente la interfaz tanque-destilador mediante una placa de poliestireno expandido (EPS) de 10 cm de espesor. El tanque acumulador, con capacidad de 400 litros, presentaba un aislamiento externo de 10 cm compuesto por perlas de EPS de distintos diámetros.

El experimento consistió en calentar el agua del tanque hasta alcanzar una temperatura uniforme de aproximadamente 60°C, valor cercano a la temperatura máxima registrada en la batea del destilador. Para ello, se implementó un sistema de recirculación en circuito cerrado equipado con una resistencia calefactora de 2000 W y una bomba centrífuga de ¾ HP, que mantenía un flujo continuo desde la salida inferior hasta la entrada superior del tanque.

El monitoreo térmico se realizó mediante termocuplas tipo T distribuidas verticalmente con un espaciado de 20 cm, complementado con mediciones de temperatura ambiente. La adquisición de datos se efectuó a intervalos de 5 minutos utilizando un registrador de datos Onset HOBO UX120-014M, extendiéndose las mediciones durante 12 horas posteriores a la estabilización térmica. La homogeneidad del sistema se verificó mediante una diferencia de temperatura inferior a 1°C entre la entrada y salida del circuito. En la Figura 2 se esquematiza la configuración experimental: el agua es impulsada desde la parte superior del tanque, circula a través de la bomba, es calentada por la resistencia eléctrica (2000 W) y retorna por la base. Las termocuplas (T_1 a T_3) registran las temperaturas cada 20 cm de altura, mientras que el tanque de acero se encuentra rodeado por el aislante de poliestireno expandido EPS.

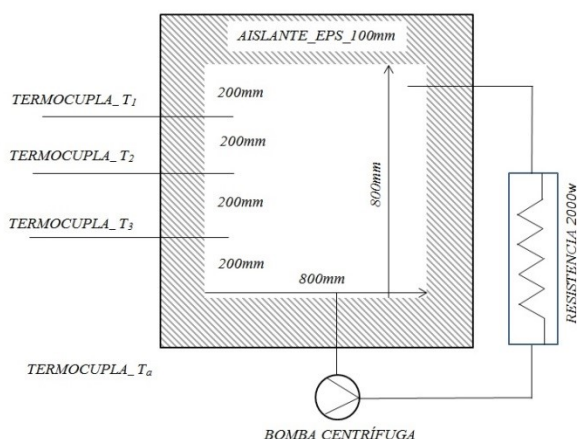


Figura 2: Corte del tanque aislado del DS2C para el ensayo de pérdidas nocturnas

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelo de pérdidas energéticas del tanque acumulador

Para las pérdidas nocturnas, el balance de energía en el tanque se simplifica, ya que dichas pérdidas de energía son por la influencia del medioambiente. Se consideró que las pérdidas de calor ocurren fundamentalmente por conducción a través del aislante que cubre al tanque cilíndrico. Se despreció la capacidad calorífica de las paredes del tanque de acumulación y que no existe estratificación.

En la Figura 3 se representa el circuito equivalente correspondiente al ensayo nocturno del tanque aislado en donde T_w es la temperatura del agua del tanque, T_p corresponde a la temperatura de la pared exterior del tanque, T_a es la temperatura ambiente. También, se muestran las distintas resistencias relacionadas con las pérdidas por conducción, convección y radiación.

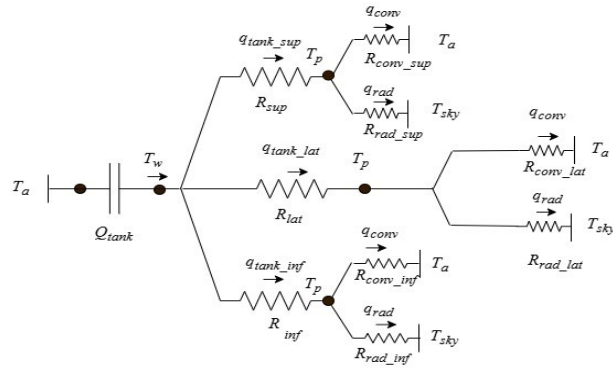


Figura 3: Circuito térmico equivalente para el modelo de pérdidas nocturnas del tanque aislado

El modelo de enfriamiento nocturno considera las resistencias térmicas del sistema, a saber:

I. Resistencia del aislante lateral (Ec. 1), se trata de un caso de conducción radial en un cilindro de acuerdo a Nellis G. y Klein S., (2009):

$$R_{lat} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L \cdot k_{poli_per}} \quad (5)$$

En donde r_2 y r_1 son los radios exterior e interior, L la altura, y k_{poli_per} la conductividad térmica del poliestireno perlado, mientras que k_{pol} es la conductividad del poliestireno en placa.

II. Resistencias inferior y superior dadas por las ecuaciones (2) y (3), responden a casos de conducción a través de placa plana, dadas por:

$$R_{inf} = \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot k_{poli_per}} \quad (6)$$

$$R_{sup} = \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot k_{pol}} \quad (7)$$

Las resistencias R_{inf} , R_{sup} y R_{lat} corresponden a las resistencias del fondo, tapa y paredes laterales del tanque, respectivamente.

III. Del lado exterior del tanque existirán pérdidas simultáneas por convección y radiación. De acuerdo con Nellis G. y Klein S., (2009); Tiwari G.N. y Tiwari A. K. (2008), el coeficiente de pérdidas por convección y radiación exterior a las mismas está dado por:

$$h_{lg} = h_{conv_{ga}} + h_{rad_{ga}} \quad (8)$$

$$h_{conv_{ga}} = 5,7 + 3,8 \cdot w \quad (9)$$

$$h_{rad_{ga}} \approx \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{prom}^3 \quad (10)$$

$$T_{prom} = \frac{T_p + T_a}{2} \quad (11)$$

Con este resultado se determinan las resistencias inferior, superior y lateral, que se corresponden con las pérdidas externas de calor como se muestra en la Figura 3.

$$R_{cr/l} = \frac{1}{h_{lg} \cdot A_{lat}} \quad (12)$$

$$R_{cr/i} = \frac{1}{h_{lg} \cdot A_{inf}} \quad (13)$$

$$R_{cr/s} = \frac{1}{h_{lg} \cdot A_{sup}} \quad (14)$$

Siguiendo con el circuito de la figura 3:

$$R_1 = R_{inf} + R_{cr/i} \quad (15)$$

$$R_2 = R_{sup} + R_{cr/s} \quad (16)$$

$$R_3 = R_{lat} + R_{cr/l} \quad (17)$$

La resistencia del tanque (R_{tank}) por combinación en paralelo de las resistencias 1, 2 y 3 es:

$$R_{tank} = \left(\left(\frac{1}{R_1} \right) + \left(\frac{1}{R_2} \right) + \left(\frac{1}{R_3} \right) \right)^{-1} \quad (18)$$

Comparación del comportamiento del prototipo y de su modelo físico matemático

El resultado del ensayo nocturno puede observarse en la Figura 4 en donde se comparan las temperaturas medidas experimentalmente durante el ensayo y las temperaturas que predice el modelo propuesto. En la gráfica se pueden observar los valores de la constante de tiempo experimental y simulado.

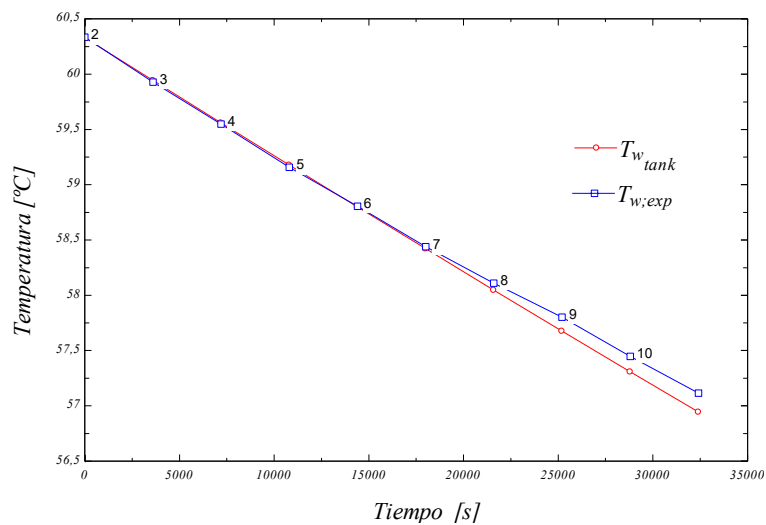


Figura 4: Temperatura medida experimental versus temperatura de predicción del ensayo nocturno

El modelo simulado predice los datos experimentales validando la metodología empleada y confirma que las pérdidas predominantes corresponden efectivamente a mecanismos conductivos a través del aislamiento térmico.

Se identificó un $U_{tank} = 2,1 [w/m^2 \cdot K]$, con pérdidas predominantes por conducción a través del aislamiento. Las comparaciones del modelo propuesto en relación a los datos experimentales de las pérdidas de calor se muestran en la Figura 5. Las pérdidas nocturnas de calor del tanque aislado son sensibles a los cambios de la temperatura ambiente como se muestra.

Este ensayo permitió validar el modelo térmico para predecir la producción nocturna lo que permite establecer para el futuro, criterios de diseño en lo que respecta a la reducción de U_{tank} mediante aislamientos de menor conductividad y/o aumentar la masa de agua (m) para elevar la constante de tiempo τ y extender la producción.

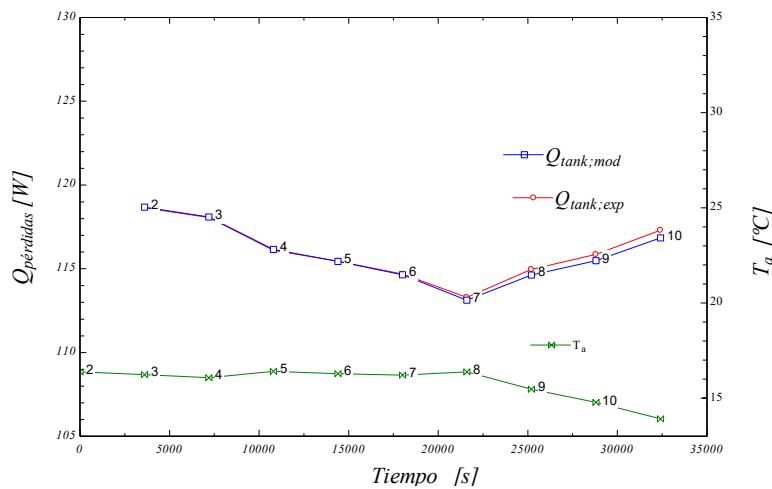


Figura 5: Pérdidas de calor horarias durante el ensayo nocturno de enfriamiento. Comparación de los resultados experimentales con el modelo propuesto, los cambios observados son sensibles a la variación de T_a

Producción nocturna del DS2C

Para la etapa de producción nocturna las pérdidas térmicas serán por conducción a través de las paredes de la batea (U_b) y del tanque (U_{tank}), el cual ya fue ensayado, sumado finalmente a las pérdidas térmicas de la batea al vidrio (U_{top}) y de la cúpula del prototipo al ambiente por convección y radiación.

El modelo térmico de producción nocturna del prototipo DS2C se muestra en la Figura 6 en el que se muestran las pérdidas por el tanque U_{tank} , que fueron evaluadas en el ensayo nocturno. En esta etapa el calor contenido en el tanque se transfiere a la superficie de la batea y a las paredes del tanque.

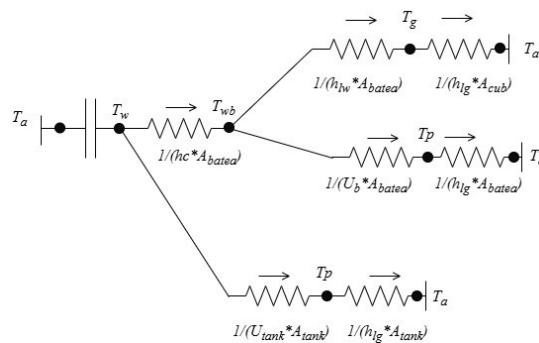


Figura 6: Modelo térmico de pérdidas en el prototipo DS2C durante la producción nocturna

Análisis del balance de energía nocturno del DS2C

Balance de energía en la cubierta de vidrio de acuerdo a Tiwari G.N. y Tiwari A. K., (2008):

$$\dot{Q}_{r_{wg}} + \dot{Q}_{c_{wg}} + \dot{Q}_{e_{wg}} = \dot{Q}_{r_{gsky}} + \dot{Q}_{c_{ga}} \quad (19)$$

Balance de energía en la batea:

$$\dot{Q}_{batea} = \dot{Q}_{r_{wg}} + \dot{Q}_{c_{wg}} + \dot{Q}_{e_{wg}} + \dot{Q}_{U_{batea}} \quad (20)$$

Balance de energía en el agua:

$$(m \cdot c_p)_w \cdot \frac{dT_w}{dt} = \dot{Q}_{batea} + \dot{Q}_{U_{tank}} \quad (21)$$

Los distintos calores de las expresiones anteriores pueden expresarse en términos de sus coeficientes de transferencia de calor respectivos.

$$h_{lw} \cdot A_{batea} \cdot (T_w - T_g) = h_{lg} \cdot A_{cubierta} \cdot (T_g - T_a) \quad (22)$$

$$h_w \cdot A_{batea} \cdot (T_w - T_{wb}) = h_{lw} \cdot A_{batea} \cdot (T_w - T_g) + U_{batea} \cdot A_{lat_{batea}} \cdot (T_{wb} - T_a) \quad (23)$$

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT_w}{dt} = h_w \cdot A_{batea} \cdot (T_w - T_{wb}) + U_{tank} \cdot A_{tank} \cdot (T_w - T_a) \quad (24)$$

En donde h_{lg} está dado en la Ec. 8, mientras que h_w puede obtenerse de la Ec. 23 y h_{lw} se determina como:

$$h_{lw} = h_{conv_{wg}} + h_{rad_{wg}} + h_{evap_{wg}} \quad (25)$$

Consideraciones del Modelado Térmico

Se mantuvo un nivel constante de agua en la cámara de destilación mediante un sistema de reposición controlada desde el tanque acumulador. La producción de agua destilada durante la noche, se reemplaza introduciendo un volumen equivalente de agua de reposición (a temperatura ambiente T_a) en la base del tanque, manteniendo así la masa total del sistema.

El ingreso de agua fría creó una zona de mezcla homogénea que se extendió hasta 60 cm desde la base del tanque, verificada mediante termopares ($\Delta T < 1^\circ\text{C}$ en esta región). Este efecto de mezclado forzado se consideró utilizando un perfil de temperatura uniforme en la zona inferior del tanque.

Las pérdidas por evaporación se incorporaron implícitamente en el coeficiente efectivo de transferencia de calor (U_{top}). La capacidad térmica de la cubierta de vidrio se despreció debido a su rápido equilibrio con el ambiente. Un sello hidráulico hermético evitó pérdidas de vapor, confirmado mediante inspecciones visuales. Se consideraron áreas específicas para cada componente: batea de destilación 1.032 m², cubierta de vidrio 2.05 m² y tanque acumulador 2.4 m².

La dinámica térmica sigue la formulación de primer orden típica de destiladores solares, (Thakur V.K., et al., 2021):

$$\frac{dT_w}{dt} + a \cdot T_w = f(t) \quad (26)$$

En dónde a incorpora tanto las pérdidas térmicas como los efectos de reposición, $f(t)$ representa las condiciones ambientales variables. La solución presenta el decaimiento exponencial característico observado experimentalmente. Estas suposiciones se justifican adicionalmente por la capacidad del

modelo para reproducir las características clave de los datos experimentales en múltiples ciclos de operación.

Discusiones sobre el modelo

A partir del equilibrio energético en la cubierta podemos determinar:

$$T_{g,mod} = \frac{h_{lw} \cdot A_{batea} \cdot T_w + h_{lg} \cdot A_{cubierta} \cdot T_a}{h_{lw} \cdot A_{batea} + h_{lg} \cdot A_{cubierta}} \quad (27)$$

La predicción sobre la temperatura de la cubierta de vidrio durante a producción nocturna se muestran en la Figura 7.

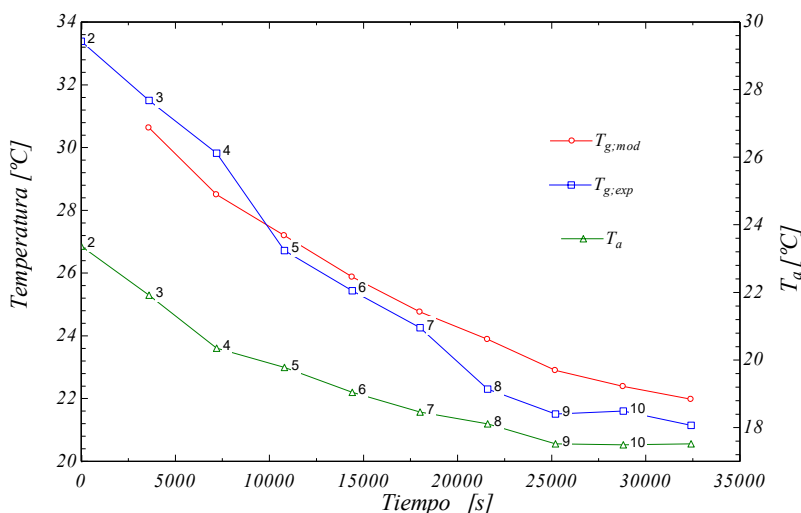


Figura 7: Predicción de la temperatura de la cubierta y temperatura medida experimentalmente

Determinación numérica de la temperatura del agua en la batea

La temperatura del agua (T_w) se calculó numéricamente utilizando una implementación en Python del método de Crank-Nicolson. Este esquema numérico, de segundo orden en tiempo, es ampliamente reconocido para resolver ecuaciones de difusión de calor parabólicas, como la que modela la transferencia de calor transitoria en este sistema térmico. La elección de este método se basó en su estabilidad incondicional y su alta precisión, propiedades cruciales para capturar con fiabilidad la dinámica de enfriamiento nocturno exponencial del sistema, incluso utilizando pasos de tiempo relativamente grandes.

La implementación numérica incluyó la discretización del balance energético, incorporando los coeficientes de pérdidas térmicas (U_{top} y U_{tank}) y la resolución iterativa del perfil de temperatura, considerando acoplamientos entre conducción-convección en las paredes de la batea y radiación hacia el ambiente.

Los resultados (Figura 8) muestran una concordancia notable entre las temperaturas simuladas (T_w , Crank Nicolson y $T_{w,mod}$) y las medidas experimentalmente ($T_{w,exp}$), validando el enfoque. El análisis reveló que el decaimiento térmico nocturno sigue una respuesta exponencial clásica de primer orden, descrita por:

$$T_{w,mod} = T_{w0} \cdot e^{(-k \cdot tiempo)} - T_a \cdot e^{(-k \cdot tiempo)} + T_a \quad (28)$$

donde la constante de decaimiento k (Ecuación 28):

$$k = \frac{U_{top} \cdot A_{cubierta} + U_{tank} \cdot A_{tank}}{m \cdot c_p} \quad (29)$$

cuantifica el efecto combinado de las pérdidas por la cubierta y el tanque. Esta formulación confirma que la tasa de enfriamiento es proporcional a la diferencia $T_w - T_a$, típica de sistemas gobernados por inercia térmica.

El esquema de Crank-Nicolson demostró ser robusto frente a fluctuaciones rápidas de temperatura, como las ocurridas durante la transición día-noche, evitando inestabilidades numéricas comunes en métodos explícitos. Esta capacidad es crítica para predecir la producción de agua destilada en condiciones reales, donde la dinámica transitoria está dominada por la capacidad térmica del sistema.

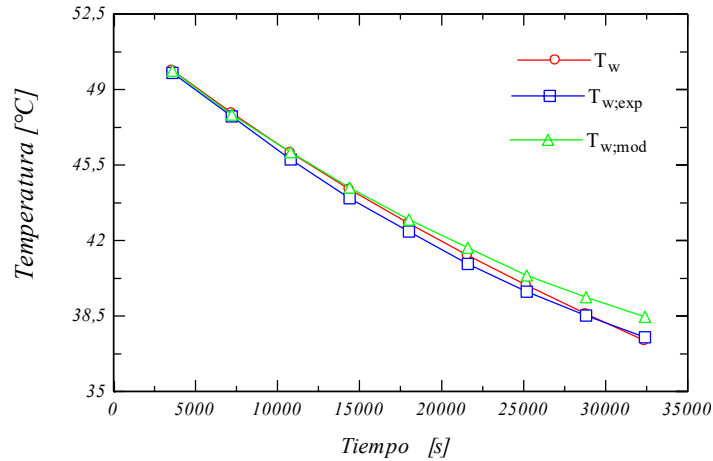


Figura 8: Predicción de la temperatura del agua T_w (Crank Nicolson), temperatura $T_{w;mod}$ (Ley de enfriamiento) y temperatura medida experimentalmente $T_{w;exp}$

La producción nocturna también pudo ser reproducida por la aplicación del modelo como se muestra en la Figura 9.

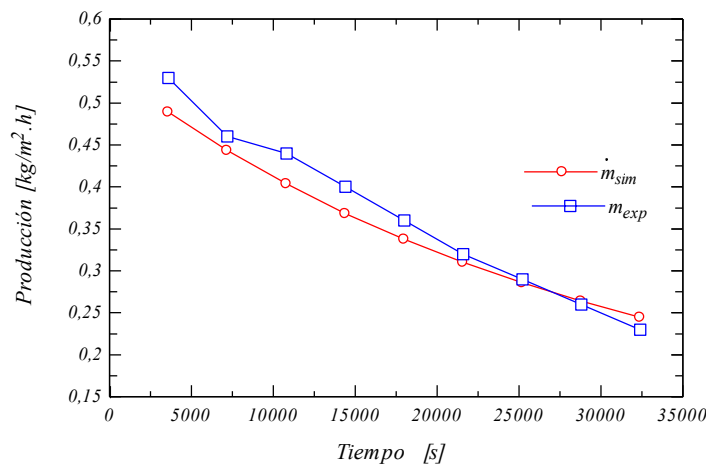


Figura 9: Predicción de la producción nocturna del prototipo DS2C y la producción medida experimentalmente

Con las determinaciones de las pérdidas en el prototipo es posible determinar el calor útil (Q_{util}), como se muestra en la ecuación 29, encontrando que el mismo está en proporción al calor que interviene en la convección, radiación y evaporación (Q_{ew}) dentro de la cúpula del destilador como se muestra en la Figura 10.

$$\dot{Q}_{util} = \dot{Q}_{tanque} - \dot{Q}_{perdidas} \quad (30)$$

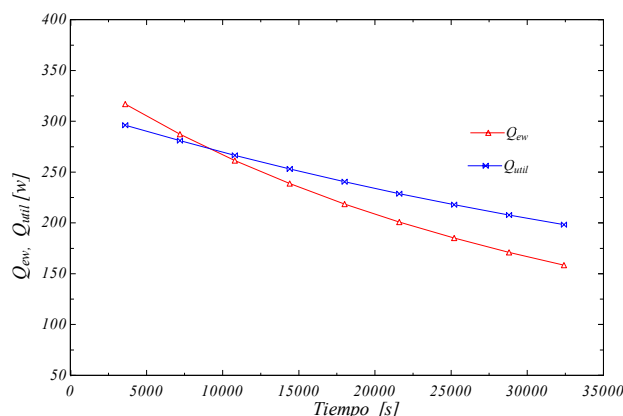


Figura 10: Comparación del calor útil (Q_{util}) con el calor necesario (Q_{ew}) para la producción nocturna.

CONCLUSIONES

Este trabajo demostró que la caracterización experimental de las pérdidas térmicas nocturnas del tanque aislado (U_{tank}) fue fundamental para desarrollar un modelo predictivo preciso de producción nocturna. Los resultados revelaron que el sistema sigue una dinámica de primer orden con constante de decaimiento κ , donde el enfriamiento es proporcional a la diferencia $T_w - T_a$.

El modelo reproduce con precisión las temperaturas del agua en la batea (T_w) y cubierta (T_g), como así también la producción nocturna acumulada.

La correlación entre pérdidas térmicas ($Q_{pérdidas}$) y producción nocturna establece que la reducción de U_{tank} , mejoraría la producción. Además, el acoplamiento con colectores solares (Fig. 1) deberá optimizarse considerando esta inercia térmica.

Para trabajos futuros el modelo validado permite realizar un análisis de sensibilidad para optimizar geometrías y materiales, extendiendo el estudio al ciclo diurno, integrando la contribución solar y explorar el uso de materiales para amortiguar el decaimiento de T_w .

REFERENCIAS

- Cooper, P. I. (1973). Digital simulation of experimental solar still data. *Solar Energy*, 14(4), 451-468. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(73\)90023-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(73)90023-6).
- Galimberti P., Adaro J., Barral J., Lema A. (1995). Variables climáticas de la región centro sur de Córdoba. ASADES. 04.67. San Luis. Argentina. ISSN: 2314-1433
- Grossi Gallegos H., Righini R., (2007). Atlas de radiación solar de la República Argentina. Secretaría de Energía. Buenos Aires. ISBN: 978-987-9285-36-7.
- Panchal H., Kumar S.K., Suresh M., Israr M., Sengottain S. (2021): A concise review on Solar still with parabolic trough collector, *International Journal of Ambient Energy* <https://doi.org/10.1080/01430750.2021.1922938>
- Kumar S., Ahmad A., Irshad K., Prakash O., Kausher R., Mozammil Hasnain S.M., Pandey S., Tapalova A., Akylbekov N., Rustem Zairov R. (2024). Solar stills: A review for water scarcity solutions. *Heliyon*. 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38751>
- Marchesi J., Ducculi E., Adaro J., Fasulo A. (2006). Destilación solar en la U.N.R.C. Construcción y primeros resultados. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10, pp. 31-37. ISSN: 0329-5184.
- Marchesi J., Galimberti P., Tobares N., Adaro J., Fasulo A. (2009). Determinación experimental de la producción de un destilador solar respecto a la temperatura del agua en la batea. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, pp. 105-111. ISSN: 0329-5184.
- Mevada D., Panchal, H., Ahmadein M., Zayed M., Alsaleh N., Djuansjah J., Moustafa E., Elsheikh A., Sadasivuni K. (2022). Investigation and performance analysis of solar still with energy storage

- materials: An energy- exergy efficiency analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*. Volume 29. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101687>
- Nema A., Thakur V.K., Singh P., Gaur M.K., Shrivastava V., Ray R. (2025). Performance assessment of passive solar still with different thermal energy storage materials. *Desalination and Water Treatment*. 323. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101288>
- Nellis G., Klein S. (2009). *Heat Transfer*. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-88107-4.
- Thakur V.K., Gaur M. K., Sagar M. K., Tiwari G: N. (2021). A study on heat and mass transfer analysis of solar distillation system. *Journal of Thermal Engineering*. Vol. 7. N°5, pp. 1184-1205. DOI: 10.18186/thermal.978021
- Tiwari G.N, Singh H.N., Rajesh Tripathi (2003). Present status of solar distillation. *Solar Energy*, 75, 367-373. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.005>
- Tiwari G.N., Tiwari A. K. (2008). *Solar distillation practice for water desalination systems*. Anamaya Publishers. pp. 182-202. ISBN: 978-1-905740-88-8
- Voropoulos, K., Mathioulakis, E., Belessiotis, V. (2003). Experimental investigation of the behavior of a solar still coupled with hot water storage tank. *Desalination*, 156, 315–322. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00362-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00362-X)
- Zizzias J., Fasulo A., Venier F., Marchesi J., Odicino L. (2010). Evaluación detallada de un destilador solar colector acumulador. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 14. Impreso en la Argentina. pp. 63-69. ISSN 0329-5184.
- 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 acumulador integrado. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 16. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.

DETERMINATION OF ENERGY LOSSES AND NIGHTTIME PRODUCTION IN A SOLAR STILL ASSISTED WITH A STORAGE TANK

ABSTRACT This study presents a detailed analysis of a solar still assisted by a flat-plate solar collector and storage tank, with particular emphasis on quantifying the system's nighttime energy losses. Through an isolated conditions test, experimental data were collected to evaluate the factors influencing thermal losses during nighttime operation, determining the storage tank's nocturnal heat loss coefficient. The correlation of this parameter with experimental results enables the development of a predictive model for system performance under nighttime production conditions.

Additionally, a theoretical model is proposed to estimate overnight distilled water production, representing a significant advancement for optimizing solar still designs. This work contributes to developing more accurate simulation tools, facilitating the implementation of sustainable solar desalination systems with enhanced energy efficiency. The findings provide valuable insights for scalable technological solutions to address water scarcity in arid and semi-arid regions.

Keywords: solar distillation, nocturnal thermal losses, heat loss coefficient, predictive modeling, sustainable desalination.