

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA CERRADO: EVAPORADOR SOLAR Y LÁMINA VARIABLE EN PROFUNDIDAD DE POLIETILENO TRANSPARENTE COMO COLECTOR - TRANSPORTADOR DE AGUA CONDENSADA

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CLOSED SYSTEM: SOLAR EVAPORATOR AND TRANSPARENT POLYETHYLENE VARIABLE DEPTH SHEET AS COLLECTOR - CONDENSED WATER CONVEYOR

Erick C. Grudner Carranza*

RESUMEN	ABSTRACT	RESUMO
<p>Aplicando una metodología sistémica (salida: volumen de agua condensada, entradas: variables de construcción y registro térmico promedio) al estudio experimental efectuado sobre este sistema de pequeñas dimensiones, se destaca lo siguiente:</p> <p>Variáveis de projeto observadas e registro térmico: Foi demonstrado que conforme h_p e H_w aumentam, em relação à área de fundo preto, o volume de água condensada coletada também aumenta. O monitoramento térmico de todo o processo (aquecimento e inércia térmica) identificou um modelo parabólico com ponto comum correspondente à temperatura máxima atingida tanto pela água do recipiente inicial quanto pelo ambiente interno.</p> <p>El cobertor (lámina), frente a la disipación de calor y producción horaria de condensado: Aplicando un modelo de diferencias finitas en una cavidad rectangular (borde sometido a convección y otro sometido a temperatura constante), los resultados, mostraron un efecto convectivo hacia el medio exterior y una sectorialización de diferencias, que se acentúan más allá del 44,4 por ciento área total del cobertor y muy próximas a los extremos de éste. El análisis de Nusselt para condensación sobre placas inclinadas, estableció que la producción de condensado permanece en un valor constante durante los cambios de temperatura registrados, mientras se manifiesta el proceso (calentamiento e inercia térmica).</p> <p>Finalmente; sobre este sistema, se presentan importantes restricciones de diseño y fisicoquímicas que reducen la recuperación de vapor en forma de agua condensada ($\eta = 24$ por ciento). Pero frente a estas desventajas propias del sistema, destacan dos condiciones experimentalmente demostradas: facilidad de construcción y disponibilidad para conseguir agua destilada, a partir de fuentes hídricas salobres o contaminadas.</p> <p>PALABRAS CLAVE: Evaporación de agua aprovechando la energía solar, condensación de vapor de agua en placas inclinadas, convección natural y forzada, cambios de fase, diferencias finitas, lámina de polietileno.</p>	<p>Applying a systemic methodology (outlet: volume of condensed water, inputs: construction variables and average thermal record) to the experimental study carried out on this small-scale system, the following is highlighted:</p> <p>Observed design variables and thermal record: It has been shown that when h_p and H_w increase, in relation to the black background area, the collected volume of condensed water also increases. The thermal tracking of the whole process (heating and thermal inertia), has identified a parabolic model with a common point that corresponds to the maximum temperature that reaches both the water in the initial container and the interior environment.</p> <p>The cover, facing the heat dissipation and hourly production of condensate: Applying a finite difference model in a rectangular cavity (one edge submitted to convection and the other submitted to constant temperature), the results show, a convective effect towards the middle exterior and one sectorialization of differences, which are accentuated more than 44.4 percent of the total area of the cover and very close to the extremes this. The Nusselt analysis for condensation on inclined plates, established that the condensate production remains at a constant value during the recorded temperature changes, while the process is manifested (heating and thermal inertia).</p> <p>Finally; On this system, there are important design and physicochemical restrictions that reduce the recovery of steam in the form of condensed water ($\eta = 24$ percent). However, in view of these disadvantages of the system, highlighting the experimentally demonstrated conditions: ease of construction and availability to obtain distilled water from brackish or contaminated water sources.</p> <p>KEYWORDS: Evaporation of water using solar energy, condensation of water vapor on inclined plates, natural and forced convection, phase changes, finite differences, polyethylene sheet</p>	<p>Aplicando uma metodologia sistémica (saída: volume de água de condensação, entradas: variáveis construtivas e registro térmico médio) ao estudo experimental realizado neste pequeno sistema, destacam-se:</p> <p>Variáveis de projeto observadas e registro térmico: Foi demonstrado que conforme h_p e H_w aumentam, em relação à área de fundo preto, o volume de água condensada coletada também aumenta. O monitoramento térmico de todo o processo (aquecimento e inércia térmica) identificou um modelo parabólico com ponto comum correspondente à temperatura máxima atingida tanto pela água do recipiente inicial quanto pelo ambiente interno.</p> <p>Cobertura (folha), comparada com a dissipação de calor e produção horária de condensado: Aplicando um modelo de diferença finita em uma cavidade retangular (a borda sujeita à convecção e a outra sujeita à temperatura constante), os resultados mostram um efeito convectivo para a superfície Exterior. Ambiente e uma setorização das diferenças, que se acentuam para além dos 44,4 por cento da área total coberta e muito perto das extremidades da cobertura. A análise de Nusselt para condensação em placas inclinadas estabeleceu que a produção de condensado permanece em um valor constante durante as mudanças de temperatura registradas, enquanto o processo (aquecimento e inércia térmica) se manifesta.</p> <p>Finalmente; Neste sistema existem importantes condições de projeto e físico-químicas que reduzem a recuperação de vapor na forma de água condensada ($\eta = 24$ por cento). No entanto, dadas essas limitações do sistema, duas condições comprovadas experimentalmente de considerável benefício se manifestam: facilidade de construção e disponibilidade para obter água destilada de fontes salobras ou contaminadas.</p> <p>PALAVRAS-CHAVE: Evaporação de água utilizando energia solar, condensação de vapor d'água em placas inclinadas, convecção natural e forçada, mudanças de fase, diferenças finitas, folha de polietileno</p>
<p>History of the article: Received 20 June 2021, Revision of style 27 June 2021, Accepted 30 June 2021.</p>		

INTRODUCCIÓN

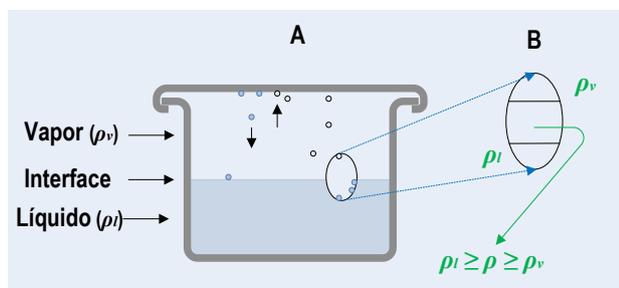
La evaporación es un fenómeno físico de interface que se caracteriza por una progresiva transferencia de masa, ímpetu y energía entre la superficie (frontera) de materia líquida y el ambiente circundante. En consecuencia, moléculas individuales del líquido acompañadas con suficiente energía y velocidad superior a la media, muy próximas a esta frontera, pueden dispersarse desde la interface hacia el medio circundante, cambiando de fase. Estableciéndose un equilibrio dinámico líquido-vapor en menor proporción másica y a temperaturas inferiores al punto de ebullición del líquido.

La evaporación está asociada con el fenómeno físico de condensación, proceso inverso, que se presenta cuando moléculas calientes hacen contacto con superficies o centros de condensación más fríos. Ambos fenómenos en escala macro, se exteriorizan en las “capas inferiores de la atmósfera, (agua en forma de vapor o nubosidad) producto del intercambio entre la atmósfera e hidrosfera” [1]. Originando el vital ciclo geoquímico del agua en la naturaleza:



Al respecto, la emisión global de vapor de agua por evaporación desde la corteza terrestre y las superficies oceánicas (sistemas abiertos). Anualmente corresponde a 420E9 toneladas de agua [2]. Cantidad de agua que regresa condensada y precipitada hacia la litosfera a través de las lluvias.

En una escala menor, es posible asimilar tanto la evaporación como la condensación en sistemas cerrados constituidos por dos fases y una interfase. Ver figura 1.



Fuente: Elaboración propia sobre información de [1]

Figura 1: (A) Interfase bidimensional concepto geométrico.
(B) Región tridimensional donde ocurren cambios de las propiedades de una fase, a las propiedades de la otra

En la figura 1, se distinguen dos fases homogéneas, líquido y vapor. “Cada una de estas fases se caracteriza por un conjunto de propiedades, por ejemplo la densidad puede considerarse constante para ambas fases, pero en la interfase la densidad varía continuamente. Así también conforme la temperatura del líquido aumenta, la energía cinética promedio de las moléculas del líquido se incrementa. El número de moléculas de alta energía capaz de escapar de la interfase se hace mayor; en consecuencia la presión de equilibrio de vapor aumenta” [3], [4].

“La presión de equilibrio de vapor. Es la presión ejercida por el vapor cuando éste se encuentra en equilibrio con su fase líquida. Magnitud que depende de la naturaleza del líquido y de la temperatura” [5].

De esta manera cuanto mayor sea la temperatura a la cual se encuentra el sistema cerrado, la cantidad de vapor aumentará. Registrándose el máximo de vapor, cuando la temperatura está cercana al punto de ebullición del líquido (donde la presión de vapor es igual a la presión barométrica del medio circundante).

Esta capacidad de transferencia de masa de un líquido a su fase vapor en sistemas cerrados, modificando la temperatura para el agua. En la perspectiva tecnológica, ha permitido desarrollar dispositivos especiales (destiladores) que “posibilitan transportar la fase vapor a través de intercambiadores de calor” [6], donde se produce el decremento de temperatura para que el vapor pueda condensar y recuperar una fracción del líquido.

La utilidad obtenida al aplicar tanto la evaporación y la condensación de un líquido, es útil en el campo de los procesos químico-industriales de separación y purificación de líquidos. Es así, que por este medio al presente muy conocido, se puede obtener por ejemplo: agua con niveles extremadamente bajos de contaminantes y sustancias en solución (destilación molecular).

Por lo general los destiladores convencionales requieren consumos energéticos significativos en combustibles

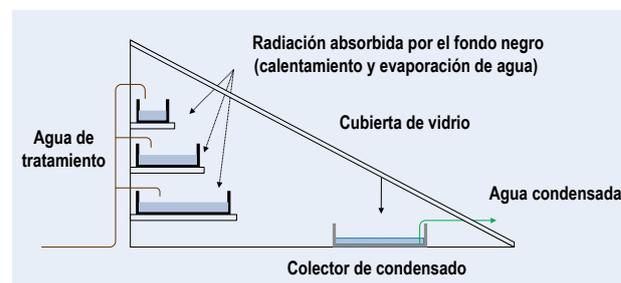
fósiles; frente a esta limitante, en la actualidad se busca cambiar la fuente energética de los combustibles fósiles por energía solar¹.

Estudios más recientes proporcionan información de un número significativo de centros especializados para el aprovechamiento de la energía solar a nivel mundial, dedicados a mejorar el abastecimiento del vapor generado en destiladores de pequeñas y grandes dimensiones, con diferentes formas para la evaporación (un solo efecto o de efectos múltiples principalmente) [8], [9], [10].

Destilador solar de bandeja simple

La figura 2, describe los componentes de un destilador solar de bandeja simple, dispositivo de diseño que se utiliza con mayor frecuencia en los trabajos investigativos experimentales. Los componentes principales de este tipo de destilador son: las cubas ennegrecidas que contienen el agua a evaporar, una cubierta de vidrio en pendiente y un colector de condensado en la parte inferior de la cubierta de vidrio para recoger el agua condensada [11].

La cubierta de vidrio permite que la radiación solar penetre el dispositivo y sea absorbida por el fondo negro, incrementado la temperatura del agua para el cambio de fase, y a la vez, opera como superficie fría de condensación (intercambiador de calor), así, el condensado resbala por la cara interior de la cubierta de vidrio llegando hasta el colector [12].



Fuente: Elaboración propia sobre información de [12]

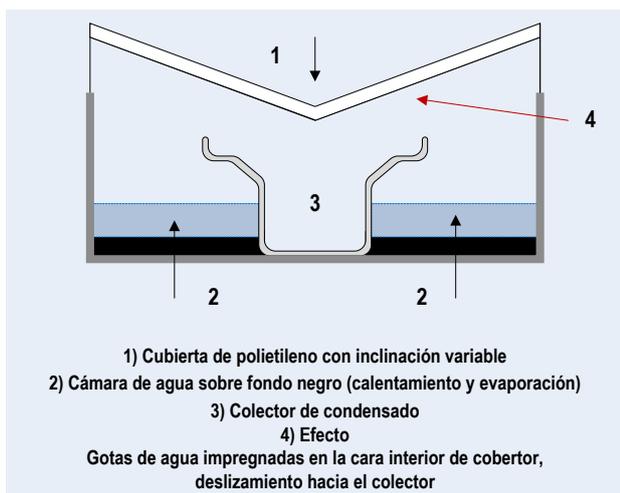
Figura 2: Destilador solar de bandeja simple

Propuesta experimental de investigación

La propuesta investigativa ha sido orientada hacia el estudio experimental de un dispositivo de pequeñas dimensiones, conformado por una lámina inclinada de polietileno transparente, que opera como colector-transportador de agua condensada, en vez de la cubierta de vidrio.

Diseño equivalente a cuatro bandejas simples con inclinación variable, fondo común de lámina (polietileno de color negro), instalado en un recipiente rectangular de 410 mm x 650 mm de área y una altura de 200 mm. El esquema del sistema se muestra en la figura 3.

¹ La referencia más remota indica que en el siglo XIX ya se habían construido destiladores solares [7]. Al respecto, la evidencia histórica establece que en la localidad de Las Salinas-Chile (1878), se construyó un destilador de grandes dimensiones de tipo tejado de vidrio, que se usó alrededor de 30 años para suministrar agua potable. La instalación cubría una superficie de 4738 m² y producía un máximo de 20,4 t de agua destilada por día. [7], [8]



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3: Esquema evaporador propuesto para el estudio experimental

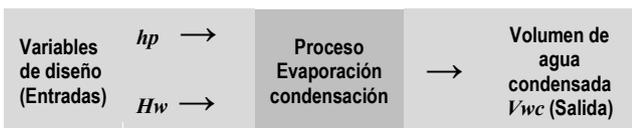
DESARROLLO

Consultada la bibliografía disponible y con referencia a evaporadores solares que utilizan láminas de polietileno como colector y transportador de agua condensada, se ha encontrado información general para diseños diferentes al propuesto, que aportan conceptualmente sobre la facilidad de construcción de estos sistemas y el auxilio que prestan en la obtención de agua para consumo humano, a partir de fuentes hídricas contaminadas o salobres [13], [14]. Consideraciones que sirven de justificativo para evaluar el alcance que tienen estos diseños constructivos de tecnología alternativa, como un medio para abastecimientos particulares de agua en lugares donde los acuíferos se encuentran contaminados, o éstos presentan deficiencias significativas de captación.

Por otra parte, la información consultada si bien describe su construcción y factibilidad de funcionamiento, no precisa aspectos referenciales sobre las cantidades de agua condensada obtenida, cuáles las variables importantes y los parámetros que intervienen en todo el proceso. En consecuencia la investigación presente ha buscado conocer el comportamiento fisicoquímico de los evaporadores solares que utilizan láminas de polietileno.

Metodología aplicada (Variables de diseño)

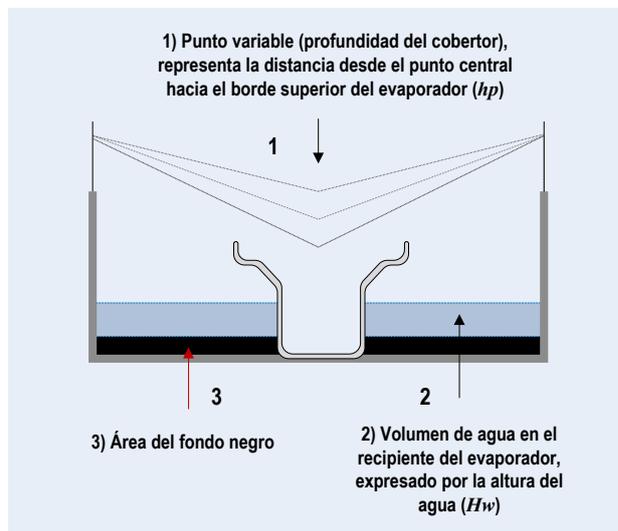
La metodología aplicada, correspondió a una propuesta sistémica [15], orientada a evaluar variables de diseño (entradas) en función al volumen de agua condensada obtenido durante un día de funcionamiento del evaporador (salida).



Las variables de diseño observadas fueron: profundidad (altura) respecto al punto central del colector (h_p) y volumen de agua inicial en las cámaras del evaporador, expresado como altura de agua (H_w). Ambas variables fueron observadas por separado en cuatro evaporadores que recibieron un similar efecto térmico de energía solar de acuerdo con las siguientes áreas de fondo negro:

E_1 225 cm² E_2 625 cm² E_3 1681 cm² E_4 2665 cm²

La figura 4, representa el esquema de observación para tres profundidades (5, 10, 15 cm) y tres volúmenes de agua expresados como altura de agua (1, 2, 3 cm) respectivamente. Aplicándose un convenio de nueve relaciones experimentales profundidad/altura de agua: 5/1, 5/2, 5/3, 10/1, 10/2, 10/3, 15/1, 15/2 y 15/3 para cada evaporador.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Esquema de observación para tres profundidades (5, 10, 15 cm) y tres volúmenes de agua expresados como altura de agua (1, 2, 3 cm) respectivamente.

Los resultados del volumen promedio de agua condensada en la cara interna del cobertor y transportada hasta el colector para cinco réplicas de la relación profundidad/altura de agua por cada uno de los cuatro evaporadores durante 45 días de observación (marzo y abril de 2021) fueron tratados estadísticamente aplicando el análisis de regresión multivariable, obteniéndose las expresiones siguientes:

$$V_{wc225} = 3,0 + 0,4h_p + 1,0H_w \quad (1)$$

$$V_{wc625} = 6,5 + 0,5h_p + 3,5H_w \quad (2)$$

$$V_{wc1681} = 27,5 + 0,5h_p + 5,0H_w \quad (3)$$

$$V_{wc2665} = 46,0 + 0,6h_p + 6,0H_w \quad (4)$$

Adicionalmente en la tabla 1, se reportan los volúmenes promedio de agua obtenidos en cada relación, considerando cinco réplicas (una por día). Notándose un importante aumento de condensado al aumentar la relación profundidad punto central del cobertor/altura de agua inicial en el recipiente de cada evaporador.

Tabla 1
 Relación: h_p/H_w y V_{wc} (cm³) cuatro áreas fondo negro (AFN)

AFN	Relación: h_p/H_w y V_{wc} (cm ³)								
	5/1	5/2	5/3	10/1	10/2	10/3	15/1	15/2	15/3
E_1	6	7	8	9	10	10	10	11	12
E_2	12,5	16	19,5	15	18,5	22	17,5	21	24,5
E_3	35	40	45	37,5	42,5	47,5	40	45	50
E_4	55	61	67	58	64	70	61	67	73

Fuente: Elaboración propia en correspondencia con los resultados experimentales

a) Comportamiento general (observación del proceso)

Terminada la construcción de los cuatro evaporadores y ubicando éstos en la dirección este-oeste en un plano perpendicular a los rayos solares, y aplicadas las relaciones de diseño indicadas anteriormente, El proceso general puede ser descrito en tres etapas: Variaciones en la presión de vapor, efecto de la energía solar (calentamiento) e inercia térmica.

- **Variaciones en la presión de vapor:** En esta etapa, el cobertor comienza a empañarse, impregnándose la cara interior con finísimas gotas de agua, considerando una determinada temperatura del sistema. En esta etapa se presenta el equilibrio líquido-vapor característico de un sistema binario cerrado. Medidas adicionales de la humedad relativa indican que ésta va en ascenso hasta la saturación del ambiente con vapor de agua. Esta etapa puede mantenerse continua mientras el sistema no sea perturbado por un cambio de temperatura significativo.

- **Efecto de la energía solar (Calentamiento):** Durante la exposición de los evaporadores a los rayos del sol, se va produciendo el aumento de temperatura en el agua, y simultáneamente en la cara interna del cobertor se incrementa el empañamiento, así, las finísimas gotas iniciales van agrupándose aumentando su diámetro hasta un diámetro máximo, cuando comienzan a resbalar por la cara interna del cobertor, llegando finalmente hasta el colector.

Esta capacidad de goteo ha sido observada y modelada como variable aleatoria en una distribución de Poisson, debido a su aleatoriedad de manifestación en el área del cobertor (mostrando una mayor incidencia en las zonas cercanas a los bordes del evaporador). En general, la capacidad de goteo aumenta, cuando el evaporador alcanza la máxima temperatura de calentamiento del agua, disminuyendo paulatinamente en la etapa de inercia térmica.

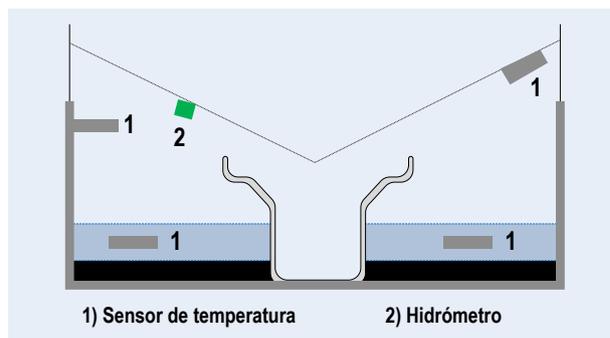
- **Inercia térmica:** Retirado el efecto calórico de los rayos solares (movimiento del sol), y alcanzada la temperatura máxima de calentamiento, al cesar la exposición, el evaporador va disipando energía (disminución de la temperatura). Etapa donde se presenta un agrupamiento mayor de las finísimas gotas iniciales de agua que resbalan en mayor número por la cara interna del cobertor hasta llegar al colector. El tiempo de inercia térmica es proporcional con el aumento máximo de temperatura. Posterior a esta etapa, y al disminuir la temperatura hasta igualarse con la temperatura ambiente, nuevamente aparece el efecto de presión de vapor.

Operando los evaporadores en el transcurso de un día, se manifiestan las tres etapas descritas anteriormente y a lo largo de los días de la experimentación, se repite el ciclo, presentándose variaciones pequeñas en los volúmenes de agua condensada recuperada, atribuidas hipotéticamente a las variaciones de la temperatura ambiente y los vientos predominantes en la etapa de calentamiento e inercia térmica.

Para conocer más sobre el comportamiento fisicoquímico de estos dispositivos, se implementó un nuevo proceso experimental, centralizado en el evaporar E - 4, dispositivo que mostró el mayor volumen de agua condensada transportada hacia el colector (relación $h_p/H_w = 15/3$).

b) Registro térmico y de humedad

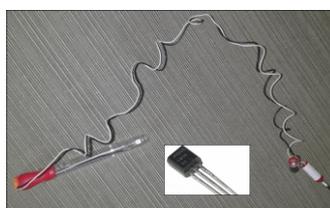
La figura 5, muestra el esquema de disposición de cuatro sensores electrónicos de temperatura (aplicación LM35) para el registro térmico y un hidrómetro (sensor de humedad) para medir la humedad relativa del ambiente interno.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5: Disposición sensores de temperatura e hidrómetro Para el registro térmico y de humedad

- Dos sensores de temperatura² en la altura propuesta del agua, un sensor muy cercano al cobertor y el otro en una de las paredes del recipiente. El hidrómetro se incorporó en la lámina de polietileno (cobertor).

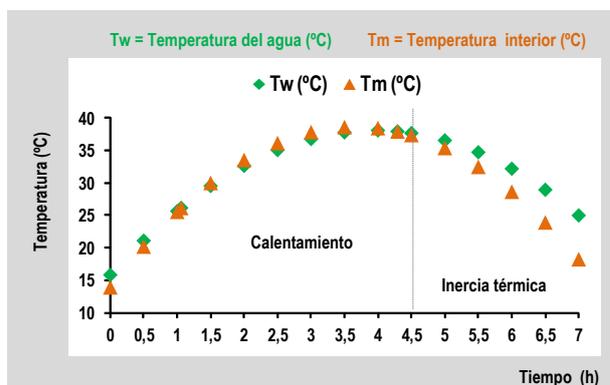


Sensor LM35 protegido para inmersión en el agua



Hidrómetro utilizado

El evaporador se instaló en un plano estacionario con dirección este a oeste para recibir la exposición térmica de los rayos solares. Estas condiciones permitieron absorber la energía solar durante 4,5 horas por día (periodo de experimentación abril de 2021). Los resultados del registro térmico, identifican dos zonas importantes: agua sobre el fondo negro y ambiente interior. Por otra parte estos registros determinan también dos regiones, una región donde asciende la temperatura hasta alcanzar un máximo, caracterizando al proceso de calentamiento, y otra donde la temperatura desciende una vez terminada la exposición solar, caracterizando el proceso de inercia térmica (enfriamiento). Notándose muy poca variación respecto a la humedad del medio interior.



Fuente: Elaboración propia en correspondencia con los resultados experimentales

Figura 6: Modelo parabólico para las zonas: agua y ambiente interior, y las regiones: calentamiento e inercia térmica. Intervalos de tiempo: n, (n+0,5) → n de 0 a 6,5 horas

² LM35 sensor de temperatura precisión 1°C, intervalo de medida -55 a 150°C. Mide fácilmente la temperatura, debido a que este sensor es analógico. En consecuencia se puede medir la temperatura en un multímetro como voltaje de salida (10 mV = 1°C).

Los coeficientes de transferencia de calor para este periodo, muestran un paso de régimen turbulento a laminar y éstos corresponden a coeficientes de convección. En los posteriores intervalos la transferencia de calor entre el agua y el ambiente interno, es por conducción pura (intervalos 1,5 a 4,0), entre el intervalo (4,0 a 4,5), las dos zonas alcanzan la misma temperatura. En consecuencia el tiempo de calentamiento por efecto de la energía solar es de aproximadamente 4,5 horas y la inercia térmica es de 2,5 horas. La tabla 2, muestra las temperaturas registradas frecuentemente para el agua y el ambiente interno:

Tabla 2
Temperaturas registradas para el agua y el ambiente interno

Intervalo de tiempo (horas)	T _w (°C)	T _m (°C)	Observación
0,0	15,82	13,90	T _w > T _m
0,5	21,09	20,19	T _w > T _m
1,0	25,65	25,56	T _w > T _m
1,1	26,14	26,14	T _w = T _m
1,5	29,54	30,01	T _m > T _w
2,0	32,64	33,54	T _m > T _w
2,5	35,07	36,15	T _m > T _w
3,0	36,79	37,84	T _m > T _w
3,5	37,80	38,61	T _m > T _w
4,0	38,10	38,46	T _w > T _m
4,3	37,95	37,95	T _w = T _m
4,5	37,69	37,39	T _w > T _m
5,0	36,57	35,40	T _w > T _m
5,5	34,74	32,49	T _w > T _m
6,0	32,20	28,66	T _w > T _m
6,5	28,95	23,91	T _w > T _m
7,0	24,99	18,24	T _w > T _m

Fuente: Elaboración propia en correspondencia con los resultados experimentales

c) Producción de vapor

Asumiendo que el fondo negro absorbe una importante cantidad de energía solar, y ésta, es transferida hacia la masa de agua en forma de calor para calentar el agua y por efecto de este calentamiento una fracción de agua cambia (de fase) a vapor.

La producción másica nominal de vapor por intervalo de tiempo (calentamiento) puede determinarse aplicando las expresiones siguientes [16]:

$$Q_{absFN} = Q_w$$

$$Q_w = Q_w$$

$$m_w c_w T_w (\Delta T_w) = m_v h_{f,g} \tag{5}$$

$$m_{v(n)} = V_w \rho_w T_{mw} \cdot c_w T_{mw} \cdot (T_n - T_{n-0,5}) \cdot (\lambda_{f,g} T_m)^{-1} \text{ (g)} \tag{6}$$

Donde:

- m_{v(n)} = Masa de vapor por intervalo de tiempo de calentamiento,
- c_{wTmw} = Calor específico del agua, función temperatura media del intervalo,
- n = Intervalo de tiempo (horas) de 0 a 4,2115,
- V_w = Volumen inicial de agua en el evaporador,
- ρ_{wTm} = Densidad media del agua, función temperatura media del intervalo,
- T_n = Temperatura intervalo superior consecutivo,
- T_{n-0,5} = Temperatura intervalo inferior consecutivo,
- λ_{f,g Tm} = Calor latente de vaporización función temperatura media.

Aplicando la expresión (6) proceso de calentamiento por intervalos de tiempo, la producción másica de vapor, se indica en la tabla 3.

Tabla 3
Producción másica de vapor por (l) intervalo de tiempo (Calentamiento)

l (h)	T _n (°C)	T _{n-0,5} (°C)	T _m (°C)	Q _w (Kcal)	m _{v(n)} * (g)	m _{v(n)} ** (g)
0,5	21,09	15,82	18,46	42,071	70,87	70,97
1,0	25,65	21,09	23,37	36,302	61,50	61,76
1,5	29,50	25,65	27,58	30,577	52,06	52,41
2,0	32,64	29,50	31,07	24,889	42,55	42,92
2,5	35,07	32,64	33,86	19,231	32,99	33,33
3,0	36,79	35,07	35,93	13,596	23,38	23,65
3,5	37,80	36,76	37,30	7,977	13,74	13,91
4,0	38,10	37,80	37,95	2,368	4,08	4,13
4,5	38,10	38,10	38,10	0,00	0,00	0,00
Valor acumulativo				Q_w (Kcal)	m_{v(n)}* g	m_{v(n)}** g
				177,017	301,18	303,08

*: Valor obtenido tomando en cuenta las variaciones en la densidad y el calor específico del agua en función del aumento de temperatura

** : Valor obtenido manteniendo constantes la densidad y calor específico (ρ = 1g.cm⁻³, c_w = 1 cal. g⁻¹.°C⁻¹)

Fuente: Elaboración propia en correspondencia con los resultados experimentales

Durante el tiempo de calentamiento, la capacidad nominal de producción acumulativa de vapor corresponde aproximadamente a 303g. Producción que implica una transferencia de 177,017 Kcal absorbido por el fondo negro (radiación solar) hacia el volumen inicial de agua, que incrementa la temperatura de ésta y genera el trabajo termodinámico requerido para el cambio de fase.

Caso ideal que sirve de referencia para evaluar el rendimiento de recuperación de vapor por condensación y transporte hacia el colector, determinándose que el rendimiento de recuperación es del 25 por ciento. Valor aceptable, tomando en cuenta que una buena parte del vapor vuelve condensado al volumen de agua inicial, resbalando por las paredes laterales del evaporador, ineficiencia propia del diseño constructivo de este tipo de evaporadores que no puede prescindir de las paredes laterales para sostener el cobertor..

d) Ambiente térmico interior

El modelo ideal propuesto en la tabla 3, establece que el calentamiento en los primeros intervalos de tiempo, favorece mayor producción de vapor. En consecuencia, al aumentar el número de moléculas que pasan a la fase vapor, se debería esperar un incremento en la formación de gotas (condensación) sobre la cara interna del cobertor de polietileno laminar.

Observándose al respecto, un aumento parcial en el diámetro de las gotas que no llegan al diámetro máximo que permite a éstas resbalar fácilmente por la cara interna del cobertor. Por otra parte, el registro térmico en las vecindades próximas al cobertor (ambiente interno), indica que no hay diferencias significativas entre la temperatura más cercana al cobertor y el ambiente interno. Existiendo dificultad para precisar la temperatura real del cobertor durante el calentamiento, se asume que la temperatura más cercana al cobertor (1cm) es igual a la del cobertor (ver tabla 4).

Tabla 4
Registro térmico ambiente interno y distancia más cercana (1 cm) al cobertor para las condiciones experimentales del evaporador

Intervalo de tiempo (horas)	T _m (°C)	T _m (°C) (1cm)
0,0	13,90	13,90
0,5	20,19	20,19
1,0	25,56	25,56
1,1	26,14	26,14
1,5	30,01	30,01
2,0	33,54	33,54
2,5	36,15	36,15
3,0	37,84	37,84
3,5	38,61	38,61
4,0	38,46	38,46
4,3	37,95	37,95
4,5	37,39	37,39
5,0	35,40	35,40
5,5	32,49	32,49
6,0	28,66	28,66
6,5	23,91	23,91
7,0	18,24	18,24

Fuente: Elaboración propia en correspondencia con los resultados experimentales

Bajo estas condiciones, al no existir variación aparente en la temperatura, la condensación no debería manifestarse en la etapa de calentamiento e inercia térmica. Situación que es contraria a lo observado durante el tiempo de experimentación. Es importante resaltar una propiedad física del polietileno laminar, referente a su conductividad térmica muy baja ($1,116 \times 10^{-3} \text{ cal. s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$), 103 veces menor que la del hierro y 3 veces menor que la conductividad térmica del vidrio laminar (0,3cm de espesor). Propiedad que caracteriza al polietileno laminar como uno de los mejores aislantes térmicos a excepción del vacío. Por lo tanto tiende a concentrar el calor en el medio interno y rápidamente adquiere la temperatura de éste.

En consecuencia, para que exista condensación, el medio interno debe disipar energía hacia el ambiente exterior principalmente por convección, y para probar esta aseveración se recurrió a un modelo de diferencias finitas.

e) Modelo de diferencias finitas [17], [18]

Este modelo analiza una cavidad rectangular:

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq a, \\ y = l, \\ z = 0. \end{aligned}$$

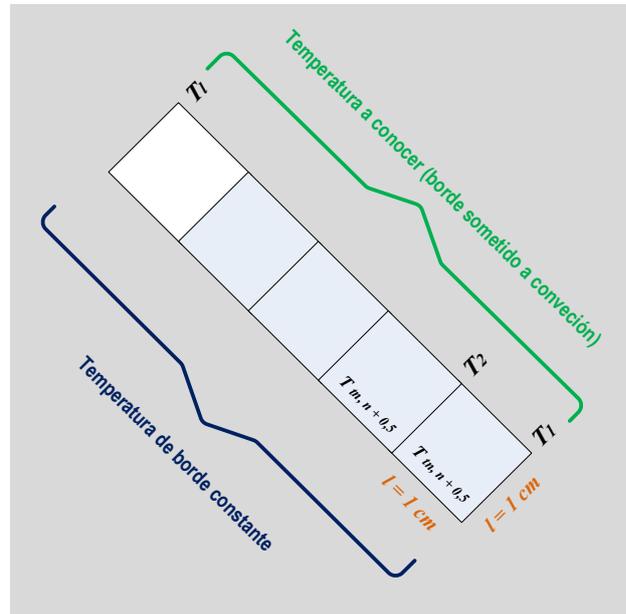
Un borde sometido a convección (lámina) y el otro borde a la temperatura más cercana (1cm) de distancia. Dividiendo toda la cavidad rectangular (punto de mayor profundidad del cobertor hasta el borde del superior del cobertor) en cuadrados de 1cm de lado. Aplicando para cada nodo m, n ; la ecuación de diferencia finita cuando un borde es sometido a convección [17], [18]:

$$2T_{m-1,n} + T_{m,n-1} + T_{m,n+1} - (4 + G) T_{m,n} + GT_{\infty} + H = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} G = g_{m,n} l^2 / k \\ H = 2hl/k \end{aligned} \rightarrow 0$$

Estableciendo una temperatura constante para el medio exterior $T_{\infty} = 18^{\circ}\text{C}$, y discriminando las contribuciones de G y H (ecuación 7) por ser muy pequeñas.

La diferencia de temperaturas en función de la longitud del cobertor inclinado (línea imaginaria de 0 a 36cm) y para cada temperatura determinada en los intervalos de tiempo ($n, n + 0,5$), mostró un comportamiento similar característico (ver tabla 5).



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5
Variación de temperatura en el cobertor respecto a la distancia de la cavidad rectangular $0 \leq x \leq l, y = l, z = 0$

Distancia desde el punto de mayor profundidad en dirección al borde superior (cm)		$\Delta T_{T_{n,n+0,5}}$ (°C)
Área1: 733,9 cm ² $\phi 65,22^{\circ}$	Área2: 825,5 cm ² $\phi 53,87^{\circ}$	
0 a 4	0 a 3	$5,00 \times 10^{-9}$
4 a 8	3 a 6	$1,75 \times 10^{-8}$
8 a 12	6 a 9	$6,25 \times 10^{-8}$
12 a 16	9 a 12	$2,42 \times 10^{-7}$
16 a 20	12 a 15	$9,00 \times 10^{-7}$
20 a 24	15 a 18	$3,38 \times 10^{-6}$
24 a 28	18 a 21	$1,26 \times 10^{-5}$
28 a 32	21 a 24	$4,70 \times 10^{-5}$
32 a 36	24 a 27	$1,41 \times 10^{-4}$

Fuente: Elaboración propia en correspondencia con los resultados experimentales

De acuerdo con los resultados obtenidos por el modelo de diferencias finitas, la disipación de calor en el cobertor es independiente de la temperatura que alcanza éste por su contacto con la fuente de calor del ambiente interno (periodo de calentamiento e inercia térmica).

Estableciéndose nueve intervalos de distancia donde la diferencia de temperatura varía desde $5,00 \times 10^{-9}$ a $1,41 \times 10^{-4} \text{ °C}$, similares para todas las temperaturas alcanzadas durante el calentamiento e inercia térmica. Asumiendo que en el primer cuadrado, la temperatura del borde sometido a convección $T_1 \approx T_{n,n+0,5}$ es igual a la del otro borde (temperatura constante).

f) Condensación sobre placas inclinadas

Las variaciones de temperaturas determinadas por el modelo de diferencias finitas, se incorporaron en las

ecuaciones del análisis de Nusselt para la condensación sobre placas inclinadas (coeficiente de transferencia de calor promedio) [19], [20], [21], [22]:

$$h_m = 0,943 (A \cdot \text{Sen } \varphi / B)^{0,25} \quad (8)$$

Donde:

$$A = g\rho_l(\rho_l - \rho_v)h_{fg}k_l^3 \quad \text{y} \quad B = \mu_l(T_v - T_w)L$$

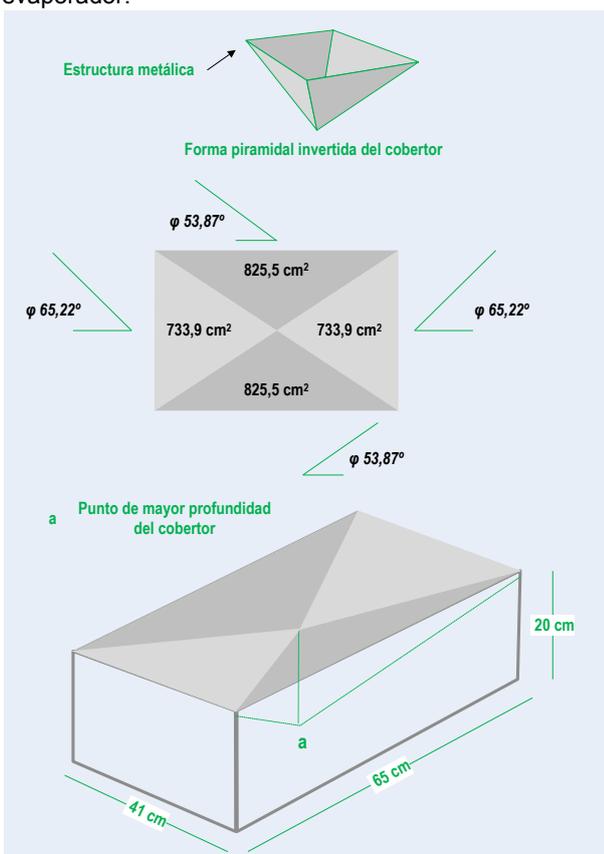
- h_m = Coeficiente promedio de transferencia de calor,
- g = Aceleración de la gravedad,
- ρ_l, ρ_v = Densidad del líquido y del vapor,
- h_{fg} = Calor latente de vaporización,
- k_l = Conductividad térmica del líquido,
- μ_l = Viscosidad del líquido,
- T_v, T_w = Temperaturas vapor y superficie,
- L = Longitud de la superficie,
- φ = Ángulo de inclinación.

Coeficiente que permite determinar la tasa de flujo másico de condensado W_c en la base de la placa:

$$W = S \cdot h_m \cdot (T_v - T_w) \cdot h_{fg}^{-1} \quad (9)$$

S = Área de la placa

Si bien la disposición del cobertor es de forma piramidal invertida y de base rectangular, comprende cuatro áreas triangulares hundidas en profundidad al interior del evaporador:



Fuente: Elaboración propia

Para la determinación se tomaron áreas equivalentes respecto a la altura del punto de mayor profundidad. En consecuencia, las áreas similares correspondieron a: lado menor (733,9 cm², ángulo de inclinación 65,22°) y lado mayor (825,5 cm², ángulo de inclinación 53,87°).

Los resultados del análisis de Nusselt por cada área se muestran en la tabla 5.

Tabla 5
Análisis Nusselt placas inclinadas, tasa de flujo másico W_c (g.h⁻¹)

Área 733,9 cm²

T_v (°C)	$\Delta T_{T_n, n+0,5} E^{-9}$ (°C)					$\sum W_c \rightarrow \Delta T_{T_n, n+0,5}$ (g.h ⁻¹)
	900	3380	12600	47000	141000	
20,19	313	840	2254	6050	13792	23249x10 ⁻⁴
25,56	325	873	2343	6290	14338	24169 x10 ⁻⁴
30,01	336	902	2420	6495	14806	24959 x10 ⁻⁴
33,54	344	925	2482	6662	15187	25600 x10 ⁻⁴
36,15	349	943	2529	6789	15475	26085 x10 ⁻⁴
37,84	354	955	2560	6872	15665	26406 x10 ⁻⁴
38,61	356	960	2574	6910	15751	26551 x10 ⁻⁴
38,46	355	959	2572	6903	15735	26524 x10 ⁻⁴
37,39	353	951	2552	6850	15614	26320 x10 ⁻⁴
35,40	348	938	2516	6752	15392	25946 x10 ⁻⁴
32,49	340	918	2464	6612	15073	25407 x10 ⁻⁴
28,66	331	893	2396	6432	14662	24714 x10 ⁻⁴
23,91	320	863	2316	6215	14168	23882 x10 ⁻⁴
18,24	307	828	2223	5966	13599	22923 x10 ⁻⁴
Producción promedio horaria condensado (g.h ⁻¹)						25195 x10 ⁻⁴

Área 825,5 cm²

T_v (°C)	$\Delta T_{T_n, n+0,5} E^{-9}$ (°C)					$\sum W_c \rightarrow \Delta T_{T_n, n+0,5}$ (g.h ⁻¹)
	900	3380	12600	47000	141000	
20,19	372	1000	2683	7203	16419	27677
25,56	387	1039	2788	7488	17069	28771
30,01	400	1074	2881	7732	17626	29713
33,54	408	1101	2955	7932	18080	30476
36,15	416	1122	3011	8082	18422	31053
37,84	421	1136	3048	8181	18648	31434
38,61	425	1142	3065	8226	18751	31609
38,46	423	1141	3061	8217	18731	31573
37,39	420	1133	3038	8154	19588	31333
35,40	414	1116	2995	8038	18323	30886
32,49	405	1093	2932	7871	17943	30244
28,66	394	1063	2853	7657	17455	29422
23,91	382	1027	2757	7399	16866	28431
18,24	367	986	2446	7102	16189	27090
Producción promedio horaria condensado (g.h ⁻¹)						29979 x10 ⁻⁴

Fuente: Elaboración propia en correspondencia con los resultados experimentales

g) Discusión de resultados

Examinando los resultados de la producción horaria de condensado (tabla 5) para ambas áreas, se desprenden las siguientes consideraciones:

- La producción de condensado va en aumento significativo desde el intervalo quinto hasta el noveno, siendo en este último donde se produce una mayor cantidad de condensado. Sucesivamente entre estos intervalos se presentan diferencias de temperatura diferenciales que indican el efecto de convección ejercido desde el medio externo para reducir la temperatura de la lámina y favorecer el cambio de fase. Haciendo notar que en los cuatro intervalos iniciales, la producción de condensado es extremadamente pequeña o casi nula.

- Respecto a la sumatoria de producción para estos cinco intervalos, los valores se incrementan levemente al ascender la temperatura del medio interno próximo a la lámina (Calentamiento) y descienden de manera similar en la etapa de inercia térmica. Mostrando diferencias muy pequeñas, menores a 0,4 g.

Esta última observación, estableció considerar que la producción horaria de condensado siguiendo el modelo parabólico de temperaturas por intervalo de tiempo para el ambiente interior y marcando intervalos longitudinales para determinar el efecto convectivo hacia el medio exterior (diferencias finitas), se mantiene prácticamente constante.

En consecuencia, la producción horaria promedio de condensado en ambas áreas respectivamente es:

$$\begin{aligned} \text{Área}_1 & 733,9 \text{ cm}^2, W_{ct} = 25195 \times 10^{-4} \text{ g} \\ \text{Área}_2 & 825,5 \text{ cm}^2, W_{ct} = 29979 \times 10^{-4} \text{ g} \end{aligned}$$

Considerando que el tiempo total del proceso son siete horas (calentamiento más inercia térmica), para ambas áreas la producción total de condensado corresponde a:

$$\text{Área}_1, WT_c = 17,6 \text{ g} \quad \text{Área}_2, WT_c = 21,0 \text{ g}$$

Por la disposición del cobertor (lámina), forma piramidal invertida de base rectangular, se tienen cuatro áreas triangulares que transformadas en áreas similares, corresponden a dos áreas de 733,9 cm² y dos áreas de 825,5 cm². En consecuencia, la producción total de condensado es igual a: $2(17,6) + 2(21,0) = 77,2 \text{ g}$.

Además el volumen promedio 73 cm³; obtenido para el evaporador ($A_{fn} = 2665 \text{ cm}^2$, $h_p = 15 \text{ cm}$, $H_w = 3 \text{ cm}$), en masa respecto a la temperatura del colector $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, es:

$$73 \text{ cm}^3. (\rho = 1,004069 - 3,62 \times 10^{-4} T = 0,9950 \text{ g.cm}^{-3}) = 72,6 \text{ g}$$

Evaluando este valor másico experimental respecto al valor másico asumido como teórico 77,2g, el error experimental corresponde al seis por ciento.

En consecuencia, El modelo de diferencias finitas para determinar el efecto convectivo hacia el medio exterior, y el análisis Nusselt para determinar el flujo másico de condensado en placas inclinadas, aplicados como recursos teóricos que expliquen el comportamiento experimental de la lámina de polietileno como colector y transportador de agua condensada, es el conveniente y permite efectuar las siguientes puntualizaciones:

- Al disponer el polietileno laminar en forma de cobertor piramidal de base rectangular invertida, se manifiesta una zona donde la condensación es insignificante (44,4 por ciento del área total del cobertor), zona muy cercana al punto central que determina la profundidad de éste y donde la temperatura diferencial tiende a cero (temperatura del borde sometido a convección $T_1 \approx T_{n, n+0,5}$ casi igual a la del otro borde de temperatura constante).
- El restante 55,6 por ciento de área del cobertor, si presenta condensación, siendo ésta, mucho mayor en los extremos superiores del cobertor, sector, donde el agrupamiento de las finísimas gotitas iniciales, conforman gotas de mayor diámetro alrededor de (0,4 cm) que resbalan por la cara interior del cobertor y caen finalmente al colector de agua condensada (recipiente central, ver figura 3).

- La disipación de calor en el cobertor (lámina), se manifiesta por convección, efecto que permite a éste, bajar su temperatura diferencial a expensas del medio exterior y condensar fracciones de vapor constantes (producción horaria de condensado). En consecuencia la lámina de polietileno opera como un intercambiador de calor diferencial, restringido por la temperatura del medio exterior (aire que circula sobre la cara externa de la lámina de polietileno).

- Por otra parte y en función al registro térmico, la disipación de calor en el cobertor es independiente de la temperatura que alcanza éste por su contacto con la fuente de calor del ambiente interno (periodo de calentamiento e inercia térmica). Estableciéndose nueve intervalos de distancia donde la deferencia de temperatura varía desde $5,00 \times 10^{-9} \text{ a } 1,41 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$, similares para todas las temperaturas alcanzadas en las condiciones experimentales.

CONCLUSIONES

Aplicando una metodología sistémica (salida: volumen de agua condensada, entradas: variables de construcción y registro térmico promedio) al estudio experimental efectuado, se ha obtenido información, relacionada con el comportamiento del sistema cerrado: Evaporador solar y lámina variable en profundidad de polietileno transparente como colector - transportador de agua condensada.

Destacando lo siguiente:

1) Variables de diseño observadas: profundidad (altura) respecto al punto central del colector h_p y volumen de agua inicial en el recipiente del evaporador, expresado como H_w altura de agua. Se ha demostrado que al aumentar h_p y H_w , con relación al área de fondo negro, el volumen colectado de agua condensada también aumenta. Con $h_p = 15 \text{ cm}$, el área del cobertor se incrementó en un 17 por ciento, respecto al área de fondo negro: $E_4 (2665 \text{ cm}^2)$.

2) Registro térmico: El seguimiento térmico de todo el proceso (calentamiento e inercia térmica), ha identificado un modelo parabólico con un punto máximo que corresponde a la máxima temperatura que alcanzan tanto el agua del recipiente inicial como el medio interno. Asumiendo que toda la energía solar absorbida por el fondo negro es transferida hacia el agua en forma de calor, y ésta se distribuye para calentar el agua y efectuar trabajo para el cambio de fase, se determinó la producción de vapor en el sistema (303g), de los cuales solamente se recupera aproximadamente el 24 por ciento (72,6g) en forma de agua condensada. Observándose que una muy importante fracción de este vapor vuelve a la fuente hídrica, condensada en la paredes laterales; ineficiencia propia del sistema, al no poder prescindir de estas paredes para el soporte del cobertor.

3) El cobertor (lámina), frente a la disipación de calor: Resaltando la baja conductividad térmica del polietileno y su capacidad para concentrar el calor. Una observación importante al respecto, fue poder explicar cómo esta lámina disipa el calor para establecer diferencias de temperatura adecuadas que favorezcan la condensación. Aplicando como recurso teórico un modelo de diferencias finitas en una cavidad rectangular (entre un borde sometido a convección y otro sometido a temperatura constante para el intervalo de tiempo de observación), los resultados, mostraron una sectorialización de diferencias, que se acentúa más allá del 44,4 por ciento (área total del cobertor) y muy próximas a los extremos de éste.

4) Producción horaria de condensado: Se aplicó el análisis de Nusselt para la condensación sobre placas inclinadas, estableciéndose que la producción de condensado permanece constante durante los cambios de temperatura registrados, mientras se manifiesta el proceso (calentamiento e inercia térmica). Sobre este soporte teórico, se evaluó el volumen promedio de agua que transporta el cobertor hacia el colector (recipiente central del sistema). Explicación efectuada en: discusión de resultados.

5) Restricciones útiles de diseño: Así, el incremento obtenido en el área del cobertor para $h_p = 15\text{cm}$, respecto al área del fondo negro participa solamente con el nueve por ciento (252 cm^2) en el sector de condensación efectiva.

6) Restricciones fisicoquímicas: Siendo un sistema que opera en condiciones naturales, el efecto convectivo de disipación de calor depende exclusivamente de la temperatura del medio externo; variable cambiante y difícil de controlar, que limita la producción de agua condensada durante el calentamiento y principalmente durante la inercia térmica.

No obstante, frente a estas limitantes propias del sistema, se manifiestan dos condiciones experimentalmente demostradas de considerable beneficio: facilidad de construcción y disponibilidad para obtener agua destilada, a partir de fuentes hídricas salobres o muy contaminadas por sustancias en suspensión y/o solución.

Referencias bibliográficas:

- [1] González, B. F., 1972, Monografía nº 8, Introducción a la geoquímica, capítulo 16 Geoquímica de la atmósfera, p: 95, Ed. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico OEA, Washington D.C.-USA,
- [2] Kiely, G., 1999, Ingeniería ambiental, capítulo 8, Contaminación atmosférica, vapor de agua, p: 487, Ed. Mac Graw-Hill, México,
- [3] Rabockai, T., 1979, monografía nº 20, Físico - Química de superficies, capítulo 1 Superficies, interfaces e interfases, pp: 3-4, Ed. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico OEA, Washington D.C.-USA,
- [4] Barrow, G., 1979, Physical Chemistry, capítulo 10, Phase equilibria liquid vapour systems, pp: 333-327, Ed. Mac Graw-Hill fourth edition, New York-USA,
- [5] Sienko, J. M., Plane, A. R., 1986, Química, principios y aplicaciones, capítulo 10 Líquidos, sólidos y cambios de estado, pp: 220-225, Ed. Mac Graw-Hill, México,
- [6] Vian, A., Ocón, J., 1979, Elementos de ingeniería química, capítulo 5, intercambiadores de calor-destiladores, pp: 178-179, Ed. Aguilar quinta edición, Madrid-España,
- [7] Ibáñez, P.M., Rosell, P. JR., Rosell, V. J. I., 2005, Tecnología solar, capítulo 4, Destiladores solares, p: 485, Ed. Mundi Prensa libros, Madrid-España,
- [8] Kirk-Othmer, 1986, Enciclopedia de Tecnología química, Tomo cinco Energía solar, p: 931, Ed. Prentice Hall, México,
- [9] <https://rehydrogeno.blogspot.com/2012/12/destilador-de-agua-casero.html>, (Consulta: 06/03/2021),
- [10] <http://kellerambiental.com.br/destiladores-solares-tratamiento-residuos/>, (Consulta: 06/03/2021),
- [11] Kirk-Othmer, op.cit., p.932,
- [12] Ibáñez, P.M., Rosell, P. JR., Rosell, V. J. I., op. cit., p: 490

- [13] [www.ii.unam.mx > Paginas > Destiladoresolarparaagua_Destilador_solar_para_agua_-_UNAM](http://www.ii.unam.mx/Paginas/ Destiladoresolarparaagua_Destilador_solar_para_agua_-_UNAM), (Consulta: 16/04/2021),
- [14] <https://ecoinventos.com/destilador-solar-portatil/> (Consulta: 28/06/2021),
- [15] Gerez, V., Grijalva, M., 1976, El enfoque de sistemas, capítulo 5 Sistemas de análisis para ingeniería y administración, Ed. Limusa, México,
- [16] Gil, S., Rodríguez, E., 2001, Física Re-creativa Experimentos de física usando nuevas tecnologías, Módulo V experimentos de termometría y termodinámica, Ed. Prentice Hall, Buenos Aires - Argentina,
- [17] Holman, J. P., 2010, Heat Transfer, capítulo state stationary conduction, multiple dimension, numeric analysis method, p: 92, Ed. Higher education, Boston - USA,
- [18] Özigk, N. M., 1986, Transferencia de calor, capítulo 5 métodos numéricos, pp: 121-140, Tablas propiedades físicas del agua p: 480 Ed. Mac Graw-Hill, México,
- [19] Özigk, N. M., op.cit., capítulo 14 Transferencia de calor cuando hay cambio de estado, condensación sobre placas inclinadas p: 385,
- [20] Özigk, N. M., op.cit., Tabla propiedades físicas del agua p: 480,
- [21] Chapman, J. A., 1974, Heat Transfer, capítulo 10 heat transfer in condensing and boiling, film condensation on vertical or inclined plates, pp: 336-337, Table A.3 - SI Properties of saturated water, p: 548, Table A.5 - SI properties of steam, Ed. Macmillan fourth edition, New York - USA.
- [22] Chapman, J. A., op. cit., Table A.3 - SI Properties of saturated water, p: 548, Table A.5 - SI properties of steam.

(*), Químico Industrial,
Consultor Productividad, Calidad e Innovación Tecnológica,
Diplomado Investigación Operativa,
Editor Revista Tecnológica,
Facultad de Tecnología - UMSA.