

# Estudio de la obtención de agua a partir de la humedad atmosférica monitoreada bajo condiciones ambientales en Baja California

Reina Vianey Quevedo Robles<sup>a</sup>, Rubén César Villareal Sánchez<sup>a</sup>, Fernando Andres Barrios Navarro<sup>a</sup>, Priscy Alfredo Luque Morales<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México

\*Corresponding author: [pluque@uabc.edu.mx](mailto:pluque@uabc.edu.mx)

**Abstract**— In this work, a prototype design was performed with the capacity to capture water, and this consists of coils systems, without and with contact with ambient conditions, it captures the water in humidity, then, air temperature is decreased for water condensation. The study revealed that the changes in the relative humidity influence the time to obtain the condensation of water; additionally, if the system was in contact directly with ambient conditions, the time of obtaining 50 mL of water was diminished. Finally, a mathematical model was developed to explain the influence of humidity and temperature on the water condensation flow; from simulations of this model, it was observed that the higher the humidity in the environment and the lower the condensation plate temperature, the water condensation flow was increased, for example, at 84% relative humidity a condensation flow between 1.3 and 2.6 L/h is expected.

**Keywords**— Water scarcity, water production, atmospheric condensation of water, environmental conditions.

**Resumen**— En este trabajo se realizó el diseño de un prototipo de captación de agua, el cual consistió en un sistema de serpentines, abierto y cerrado a condiciones ambientales, los cuales captan la humedad del aire, posteriormente, se disminuye la temperatura del aire para la condensación del agua. En el estudio se observó que cambios en la humedad relativa afectan en el tiempo de condensación de agua, así como también, si el sistema se encuentra abierto o cerrado, reduciendo los tiempos de obtención de 50 mL de agua. Finalmente, se realizó un modelo matemático que explica la influencia de la humedad y la temperatura en la condensación de agua, a partir de simulaciones se observó que, a mayor humedad en el ambiente y menor temperatura de la placa de condensación, aumenta el flujo de condensación de agua, es decir, a un 84% de humedad relativa se espera un flujo de condensación entre 1.3 y 2.6 L/h.

**Palabras Claves**— Escasez de agua, obtención de agua, condensación atmosférica de agua, condiciones ambientales.

## I. INTRODUCCIÓN

En el siglo XXI, la escasez de agua es uno de los principales desafíos que enfrenta la humanidad. Se calcula que en el mundo existen alrededor de 1400 millones de kilómetros cúbicos de agua, de los cuales solo el 2.5% corresponde al agua dulce [1]. A pesar de ello, las principales fuentes hídricas se encuentran en lugares de difícil acceso como en el subsuelo o en estado de agregación sólida, por lo que únicamente 1% del agua dulce se encuentra disponible. Sin embargo, debido al incremento de la población mundial la demanda de agua es mayor por lo que las reservas de agua han disminuido, esto sumado al desarrollo industrial en donde se utiliza grandes cantidades de agua, promoviendo la escasez de este vital líquido [2]. Según el Banco Mundial, se

estima que para el 2030 existirá un déficit del 40% agua entre la demanda prevista y su suministro [3]. En este sentido, la ONU establece “El agua está en el epicentro del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo socioeconómico, la energía y la producción de alimentos, los ecosistemas saludables y para la supervivencia misma de los seres humanos”, por lo que es un vínculo esencial entre el desarrollo de la humanidad y el medio ambiente [4].

La ciencia y la tecnología, ha desarrollado varios métodos con la finalidad de contribuir con el problema de la escasez del agua, entre ellos se encuentra la desalinización del agua, que consiste en eliminar las sales e impurezas presentes en el agua, sin embargo, los costos de producción y gasto energético son altos, paralelamente durante el proceso, se genera aguas con mayor salinidad e incrementos de temperatura [5]. Actualmente, una de las formas de

obtención del agua más explotadas es la obtención del agua a partir de la humedad en el aire, considerando una fuente potencial y disponible, que según Kumar *et al.* [6] encontró que el agua obtenida de la atmósfera era limpia, reuniendo los principales requisitos para su consumo. Se estima que, la atmósfera de la tierra contiene  $12.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$  de agua renovable, esto es más que toda el agua dulce en pantanos, ríos y lagunas. La obtención del agua atmosférica ha surgido como un proceso innovador, el cual consiste en un sistema de captación de vapor de agua, el cual pasa por un proceso de condensación, simulando el punto de rocío que ocurre de manera natural, obtenido como producto agua líquida. Por lo que, la obtención de agua a partir de la humedad ha sido de gran interés para los científicos en los últimos años, encontrado que, dependiendo de las características climáticas del lugar, como la temperatura del aire y la humedad relativa, se puede extraer alrededor de  $1000 \text{ m}^3$  de agua por día utilizando procesos de extracción como EWA [7]. Haciendo este proceso una estrategia que puede abordar el problema de escasez del agua, especialmente, en áreas con infraestructura limitada.

A finales de la década de 60's, en las islas canarias se reportó un proceso de riego que permite la obtención de agua a partir de la humedad atmosférica, el cual consistió en colocar una planta de vid cubierta por una gravilla volcánica, donde por efecto de enfriamiento al alcanzar la temperatura de rocío, la humedad en el ambiente condensa permitiendo el regado de la planta [8]. La Universidad Central (Colombia) en conjunto con la Superintendencia de la industria y desarrollo (SIC), crearon el sistema autosostenible de producción de alimento y agua. Este equipo cuenta de 10 celdas solares para suministrar energía eléctrica a los tres subsistemas que conforman el equipo (el de producción de líquido, la producción de alimentos basada en proteína de insectos y plántulas, y un sistema de interacción con la comunidad). El subsistema de obtención de agua a partir de la humedad, consiste en el principio eléctrico "celdas peltier", cuyo fundamento es realizar un cambio de polaridad de un metal, utilizando energía eléctrica en este caso suministrado por las celdas solares, así al estar en contacto con el aire, provoca la condensación obteniendo agua como producto final [9]. Por otro lado, la empresa NUBE Ss30, tiene a la venta el equipo para la obtención de 8 galones/día de agua potable. Las gotas de agua son recolectadas en un contenedor interior en donde son condensadas. El NUBE Ss30 lleva a cabo una etapa de filtración utilizando procesos de UV, zeolita, carbón activado y vidrio activado, realizando un proceso de purificación. Dando como resultado agua limpia y lista para su consumo [10].

En 2007 se aprobó la patente WO 2007/063208 A1 "Máquina de producción de agua a partir de energía eólica, la cual es el principio de funcionamiento de Eole water [12]. Eole Water, presenta un principio similar, este capta el vapor de agua atmosférico y esta es condensada por un sistema de enfriamiento, sin embargo, una de las características que enriquecen esta tecnología es que cuenta con un

aerogenerador que utiliza una potencia de 30KW/h, como fuente de energía sostenible, permitiendo la obtención de 500-800 litros de agua. El agua obtenida es captada en tanques de acero inoxidable donde se filtra y purifica [11].

Por todo lo anterior, en este trabajo se llevó a cabo el diseño y fabricación prototipo que permita obtener agua a partir de la humedad del aire, optimizando los recursos para la obtención de sistemas costo-accesibles, y evitar en su mayoría emisiones ambientales donde no se comprometa el equilibrio con los ecosistemas. Se evaluó el efecto de las condiciones ambientales, como la humedad relativa (%), la temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la temperatura del condensador ( $^{\circ}\text{C}$ ), llamado serpentín, en el tiempo de condensación de 50 ml de agua a partir de la humedad ambiental.

## II. METODOLOGÍA

### A. Diseño de equipo

El sistema consiste de una serie de serpentines que proporcionarán el área de transferencia de calor necesaria para condensar el agua presente en el aire del medio ambiente y recolectarla en un depósito. Por el interior de los serpentines circula un refrigerante, el cual realiza en un ciclo de compresión y expansión accionado por un compresor, para mantener la superficie del exterior del serpentín a una temperatura baja con el fin de provocar la condensación del agua.

### B. Mediciones ambientales

Para realizar el estudio bajo condiciones ambientales, se utilizaron las siguientes variables: humedad relativa (%), temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ), la temperatura del serpentín ( $^{\circ}\text{C}$ ) y el tiempo (min) en obtener 50 mL agua a partir de la humedad del aire. El estudio se realizó en Ensenada, Baja California, en el mes de junio, durante tres días consecutivos las variables descritas anteriormente fueron medidas en diferentes horas del día (10:00 am, 12:00 pm, 4:00 pm y 8:00 pm).

El objetivo principal de estudiar las mediciones ambientales, es el de encontrar su relación e influencia con el prototipo (sistema abierto y cerrado), es decir, si la humedad y la temperatura del entorno, así como la temperatura del sistema de serpentines son responsables de tener una mayor o menor influencia en el proceso de condensación de agua presente en el aire que entra al sistema.

### C. Modelo matemático

Considerando la humedad relativa, la temperatura ambiente y la temperatura del serpentín se realizó un modelo matemático que simula el flujo de condensación ambiental, su desarrollo se muestra a continuación:

La presión de saturación  $P_{sat}$  a la temperatura ambiental  $T$  es calculada mediante la ecuación de *Antoine*:

$$\ln P_{sat} = A - \frac{B}{C + T} \quad (1)$$

Donde  $A$ ,  $B$  y  $C$  son los parámetros para el agua. A partir de la definición de % de humedad (%  $H$ ) se calcula la presión de vapor  $P_{vap}$  a la temperatura  $T$ :

$$P_{vap} = (\%H)(P_{sat}) \quad (2)$$

Si esta presión corresponde a la presión de rocío  $P_r$  se puede calcular la temperatura de rocío  $T_r$  mediante la ecuación de *Antoine*:

$$T_r = B(A - \ln(P_r))^{-1} - C \quad (3)$$

Si se define la temperatura de película  $T_f$  como:

$$T_f = \frac{T_r + T_w}{2} \quad (4)$$

donde  $T_w$  es la temperatura de la placa. A esta temperatura  $T_f$  se evalúan las propiedades de agua para estimar el coeficiente de transferencia de calor  $h$  [12]:

$$h = 0.943 \left[ \frac{\rho_f(\rho_f - \rho_g)gh_{fg}k_f^3}{L\mu_f(T_r - T_w)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

Debido a la diferencia en la densidad del agua líquida y el vapor de agua, es posible aproximar:

$$\rho_f(\rho_f - \rho_g) \approx \rho_f^2 \quad (6)$$

De esta forma se puede evaluar el flujo de calor  $q$ :

$$q = hA_r(T_r - T_w) \quad (7)$$

En donde  $A_r$  representa el área de transferencia de calor para formar una película de agua uniforme. El flujo másico  $\omega$  es calculado como:

$$\omega = \frac{q}{h_{fg}} \quad (8)$$

donde  $h_{fg}$  representa el calor de condensación evaluado a la temperatura de rocío. El flujo volumétrico ( $Q$ ) es calculado utilizando la densidad del fluido evaluada a la temperatura de rocío:

$$Q = \frac{\omega}{\rho} \quad (9)$$

La influencia de la pérdida de transferencia de calor debida a la incrustación de la superficie de condensación, es modelada mediante la incorporación de un coeficiente de incrustación  $f$  definido de la siguiente forma [13]:

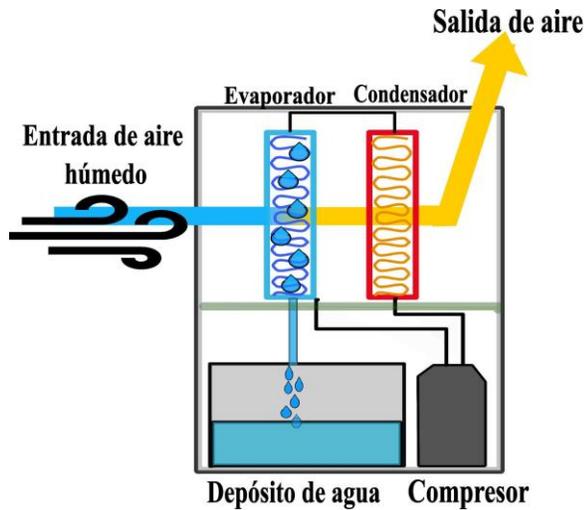
$$f = \frac{1}{h_{incrustación}} - \frac{1}{h_{limpio}} \quad (10)$$

donde  $h_{incrustación}$  representa el coeficiente de transferencia de calor en condiciones en donde existe una capa de material incrustado sobre la superficie de condensación, y  $h_{limpio}$  representa el coeficiente de transferencia de calor en condiciones sin incrustación.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### A. Diseño de equipo

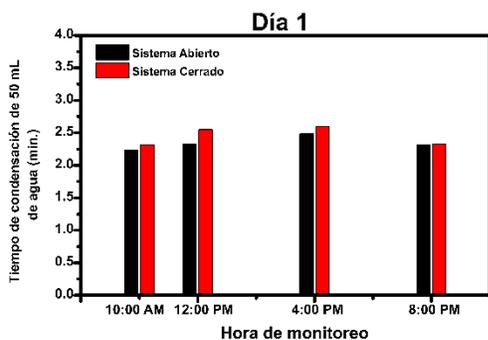
En la Fig. 1 se presenta un diseño general del prototipo de captación y condensación de agua, el cual tiene la capacidad de recolectar el vapor de agua presente en la humedad atmosférica, por lo que, a mayor humedad en el medio, se espera mayor cantidad de agua condensada. Durante el funcionamiento del prototipo, de manera general, el vapor de agua que compone el aire del medio pasa por el primer serpentín, el cual disminuye la temperatura del aire, logrando que el vapor de agua pase por un proceso de condensación y forme gotas de agua que después se acumulan en un depósito para su uso posterior, el aire una vez haya pasado por el evaporador, pasará por el segundo serpentín el cual tiene como función principal la de elevar la temperatura del aire, esto con la finalidad de que el aire que salga del prototipo, tenga una temperatura similar a la del entorno. Este dispositivo fue evaluado bajo condiciones ambientales de humedad relativa, temperatura ambiente, temperatura del serpentín y evaluando el tiempo que tarda el prototipo en condensar 50 ml de agua, los resultados se muestran en la sub-sección B.



**Fig. 1.** Diseño general de las partes principales del prototipo y proceso de obtención del agua presente en la humedad del aire.

### B. Mediciones ambientales

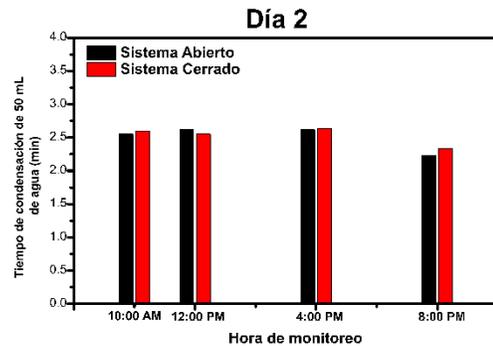
El diseño de los serpentines, tal como se describió en la sesión experimental, cuenta con un sistema cerrado y un sistema abierto bajo condiciones ambientales. Durante el día 1 de monitoreo, los datos de humedad relativa, temperatura ambiente y temperatura del sistema están descritos en la tabla 1, se observó que el sistema abierto presenta un menor tiempo de condensación de 50 ml de agua que el sistema cerrado en todas las horas de monitoreo Fig. 2, independientemente de las condiciones ambientales. Adicionalmente, se encontró que a las 10:00 am y 8:00 pm horas los tiempos de condensación son similares, esto se atribuye a que en esta hora del día la humedad relativa era muy similar. Sin embargo, en los monitoreos intermedios (12:00 pm y 4:00 pm) el tiempo de obtención de agua incrementó ligeramente.



**Fig. 2.** Tiempo de condensación de 50 ml de agua vs la hora de medición en el sistema abierto y el sistema cerrado, durante el día 1 de estudio.

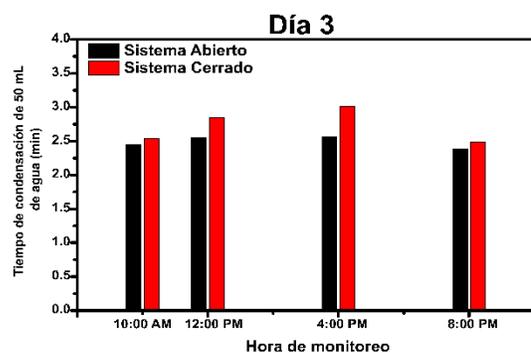
En la Fig. 3 se muestran la gráfica del monitoreo del día 2 en este caso la humedad relativa (promedio) disminuyó 5% con respecto al día 1, así también, se observó una disminución en la temperatura ambiente de 1 °C, mientras

que la temperatura del serpentín disminuyó 3 °C, en este contexto, se observó un incremento en el tiempo de condensación de 50 ml del agua tanto para el sistema abierto como para el sistema cerrado, esto puede atribuirse a la disminución de la humedad relativa que se considera un factor importante en el proceso de obtención de agua a partir del medio ambiente.



**Fig. 3.** Tiempo de condensación de 50 mL de agua vs la hora de medición en el sistema abierto y el sistema cerrado durante el día 2 de estudio.

En la Fig. 4 se muestra la gráfica del monitoreo del día 3, en este caso la humedad relativa fue idéntica al día 2, por lo que disminuyó 5% con respecto al día 1, la temperatura ambiente obtuvo un comportamiento similar al descrito para el día 2 (Tabla 1). Sin embargo, la temperatura del serpentín disminuyó 1 °C y 3 °C comparada con el día 2 y 1, respectivamente. Bajo estas condiciones, los tiempos de condensación del sistema abierto fueron muy similares a los del día 2, esto puede asociarse a la disminución de la temperatura del serpentín en donde al encontrarse expuesta al ambiente y con una temperatura más baja obtuvo un tiempo de condensación similar al día 1, sin embargo, en el sistema cerrado el tiempo de obtención de agua incrementó con respecto al sistema abierto, ya que este se encuentra en menor interacción a las condiciones ambientales. En este sentido, se encuentra una asociación entre el porcentaje de humedad relativa, la temperatura del serpentín y el tiempo que tarda en condensar 50 ml de agua.



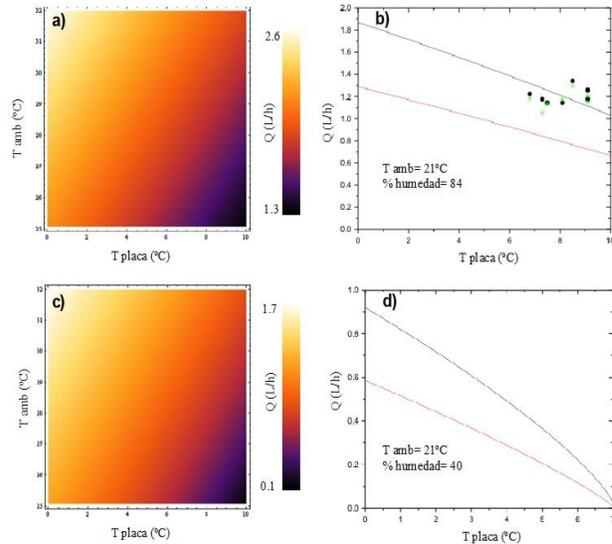
**Fig. 4.** Tiempo de condensación de 50 ml de agua vs la hora de medición en el sistema abierto y el sistema cerrado, durante el día 3 de estudio.

TABLA 1

MEDICIONES PROMEDIO DE HUMEDAD RELATIVA, TEMPERATURA AMBIENTE Y TEMPERATURA DEL SERPENTÍN, MONITOREO POR DÍA			
VARIABLES	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3
HUMEDAD RELATIVA (%)	89	84	84
TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	22	21	22
TEMPERATURA DEL SERPENTÍN (°C)	11	8	7
SISTEMA ABIERTO 1	2.33	2.5	2.43
SISTEMA CERRADO 2	2.45	2.52	2.71

### C. Cálculos teóricos

En la Fig. 5 se muestran los resultados del modelo utilizado para simular el flujo de condensación de humedad ambiental. En la Fig. 5b se muestra la simulación del flujo de condensación como función de la temperatura de placa para una condición sin incrustación sobre la superficie de condensación (línea negra), es decir, con un valor del coeficiente de incrustación  $f=0 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ , a una temperatura ambiente de  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  y una humedad del  $84 \%$ . En esta misma figura se muestran también las mediciones experimentales para esta misma condición de temperatura ambiente y una humedad promedio de  $84\%$  (puntos verdes y negros). La comparación del modelo con los datos experimentales permite obtener un área efectiva de transferencia de calor de  $0.014 \text{ m}^2$  para formar una película uniforme de agua sobre la superficie de condensación. En esta misma figura se muestra la influencia de incrustación salina en la superficie de condensación sobre el flujo ( $Q$ ) de agua. La línea roja representa la simulación del flujo de condensación como función de la temperatura de placa, con un coeficiente de incrustación  $f=0.00009 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$  (valor típico en ambientes salinos [13]). Esto permite cuantificar la pérdida de efectividad de la superficie de condensación para obtener un flujo de agua en un ambiente salino. En ambas gráficas se observa que mientras más baja sea la temperatura de la placa de condensación, mayor es el flujo de agua condensada del ambiente. En la figura 5a se muestra la simulación del flujo de condensación, mostrado en escala de colores, para diferentes condiciones de temperatura ambiente y de placa, para una humedad del  $84\%$ . En este rango de temperaturas, es posible obtener un flujo de condensación entre  $1.3$  y  $2.6 \text{ L/h}$ .



**Figura 5. a)** Simulación del flujo de condensación (escala de colores) como función de la temperatura de placa y ambiente, a una humedad del  $84 \%$ . **b)** Gráfico del modelo de flujo de condensación como función de la temperatura de placa, a una temperatura ambiente de  $21^\circ\text{C}$  y  $84 \%$  de humedad, en condiciones con incrustación y sin incrustación. **c)** Simulación del flujo de condensación (escala de colores) como función de la temperatura de placa y ambiente, a una humedad del  $40 \%$ . **d)** Gráfico del modelo de flujo de condensación como función de la temperatura de placa, a una temperatura ambiente de  $21^\circ\text{C}$  y  $84 \%$  de humedad, en condiciones con incrustación y sin incrustación.

En la Fig. 5c se muestra la simulación del flujo de condensación, mostrado en escala de colores, para diferentes condiciones de temperatura ambiente y de placa, para una humedad del  $40\%$ , condición también típica en la región. En este rango de temperaturas, es posible obtener un flujo de condensación entre  $0.1$  y  $1.7 \text{ L/h}$ . Esto muestra la influencia de la humedad ambiental sobre el flujo de condensación. En la Fig. 5d se muestra el flujo de condensación como función de la temperatura de placa para una temperatura ambiente de  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  y una humedad del  $40 \%$ . La línea negra representa el flujo de condensación para una condición sin incrustación, mientras que la línea roja representa la condición con incrustación ( $f=0.00009 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ). La comparación entre estas dos curvas permite cuantificar la pérdida de la efectividad del proceso de condensación con la incrustación de la superficie en un ambiente salino, ocasionando una pérdida de transferencia de calor.

## IV. CONCLUSIÓN

La escasez del agua es sin duda uno de los principales problemas que enfrentamos los seres humanos. En este trabajo se realizó el diseño de un sistema de serpentines abierto y cerrado en donde se puede obtener agua a partir de la humedad del aire utilizando estos dos sistemas. Los resultados obtenidos mostraron que existe una influencia en la utilización de un sistema abierto y un sistema cerrado, en

donde el sistema expuesto presenta un menor tiempo en la obtención de 50 ml de agua, mientras que el sistema cerrado tarda más tiempo en cumplir con el objetivo, esto independiente de las condiciones ambientales. Por otro lado, se observó que, si la humedad relativa disminuye, el tiempo de condensación se incrementa. Asimismo, se observó que si la humedad relativa disminuye simultáneamente con la temperatura del serpentín no se genera un efecto significativo en el tiempo de condensación del agua. En este sentido, el cálculo teórico confirma que existe una influencia de la humedad ambiental sobre el flujo de la condensación lo cual se verá reflejado en el tiempo. El sistema diseñado obtuvo buenos resultados en la obtención de agua, con un flujo obtenido dentro de los valores de la simulación realizada por el modelo matemático, para aumentar su rendimiento se puede incrementar el área de contacto del sistema de serpentines en el caso del diseño, y factores ambientales pueden aumentar su rendimiento un alto porcentaje de humedad en el entorno y la hora del día, por lo tanto, puede utilizarse como un método para la obtención de agua a partir de la humedad ambiental.

## V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto número 402/3391 de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

## REFERENCIAS

- [1] Badii, M. H., Landeros, J., & Cerna, E. "El recurso de agua y sustentabilidad". *Revista Daena (International Journal of Good Conscience)*, vol.3, no.1. 2008.
- [2] Theerthagiri, J., Chandrasekaran, S., Salla, S., Elakkiya, V., Senthil, R. A., Nithyadharseni, P., ... & Kim, H. S., "Recent developments of metal oxide based heterostructures for photocatalytic applications towards environmental remediation". *Journal of Solid-State Chemistry*, 267, pp.35-52, 2018.
- [3] World Bank, "Gestión de Recursos Hídricos: panorama general" (2022). [Online]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/topic/waterresourcesmanagement#1>.
- [4] Organización de las Naciones Unidas, (2022). "Los desafíos del agua" [Online]. Disponible en: <https://www.un.org/es/global-issues/water>.
- [5] Alawad, S. M., Mansour, R. B., Al-Sulaiman, F. A., & Rehman, S., "Renewable energy systems for water desalination applications: A comprehensive review". *Energy Conversion and Management*, vol. 286, pp.117035, 2023.
- [6] Kumar, D., Tiwari, A., Agarwal, V., & Srivastava, K., "Investigation of atmospheric water vapour condensation and characteristic analysis as potable water." *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol.20, no.5, pp. 4905-4918, 2023.
- [7] E, Bar, "Extraction of water from air — an alternative solution for water supply", *Desalination*, vol. 165, pp. 335, 2004.
- [8] Román, R, "Obtención de agua potable por métodos no tradicionales." *Ciencia al Día Internacional. Tecnología y Ciencias de la Tierra*. 1999.
- [9] Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, (2019). "Sistema autosostenible de producción de alimento y agua recibe patente de invención por parte de la SIC." [Online]. Disponible en: <https://www.utadeo.edu.co/es/noticia/destacadas/expeditio/264566/sistema-autosostenible-de-produccion-de-alimento-y-agua-recibe-patente-de-invencion-por-parte-de-la>
- [10] "NUBE SS30: Generador de agua atmosférica (30 lts/día) 110V." [Online]. Disponible en: [https://www.innovaqua.shop/products/nube?logged\\_in\\_customer\\_id=&lang=es](https://www.innovaqua.shop/products/nube?logged_in_customer_id=&lang=es).
- [11] Eole Water, (2012). "Generador eólico que extrae agua del aire", [Online]. Disponible en: <https://www.aryse.org/eole-water-generador-eolico-que-extrae-agua-del-aire/>
- [12] M.H. Parent, "Machine de la production d'eau a partir d'energie eolienne", *European patent office EP1960606A1*, Jun, 07, 2007.
- [13] Holman J.P. "Heat Transfer", McGraw-Hill, 1996.