

Diseño conceptual y de detalle de un evaporador para un generador atmosférico de agua

J. Gabriel Sandoval¹, Pedro García², Mario Alvarez³, Miguel González⁴ y Isa Pereyra⁴

Posgrado CIATEQ A.C.¹, Instituto Tecnológico de San Luis Potosí², Secihti-Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ)^{3,4}.

CIATEQ¹, ITSLP², CIATEQ³, CIATEQ⁴

San Luis Potosí, S.L.P.^{1,2,4}, Querétaro³ México

dismecyan@gmail.com, isabel.pereyra@ciateq.mx.

Abstract— This work consists of the validation, through numerical simulation, of the conceptual design of an evaporator for an atmospheric water generator, suitable for integration into a hydroponic greenhouse. The validation is based on a theoretical model sustained in principles of heat transfer, mass transfer, and psychrometry, developed from a specialized literature review. The results obtained are compared with those values reported in the literature to evaluate the feasibility of the design and its consistency with typical operation ranges in AWG systems. This analysis allows the identification of critical design parameters and the establishment of techniques for future geometric and energy optimizations of these systems.

Keyword— AWG, evaporator, condensation, numerical simulation, heat and mass transfer.

Resumen— El presente trabajo aborda la validación, mediante simulación numérica, del diseño conceptual de un evaporador para un generador atmosférico de agua, factible de integrar a un invernadero tipo hidropónico. La validación se basa en un modelo teórico sustentado en principios de transferencia de calor, transferencia de masa y psicrometría, desarrollado a partir de una revisión bibliográfica especializada. Los resultados obtenidos se comparan con los valores reportados en la literatura para evaluar la factibilidad del diseño y su coherencia con rangos típicos de operación en sistemas AWG. Este análisis permite identificar parámetros críticos de diseño y establecer técnicas para futuras optimizaciones geométricas y energéticas de estos sistemas.

Palabras claves— AWG, evaporador, condensación, simulación numérica, transferencia de calor y masa.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la escasez del agua es uno de los problemas más críticos a nivel global, con impactos en la agricultura, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental (FAO, 2023). Factores como el cambio climático, el crecimiento demográfico, la sobreexplotación de los recursos hídricos y la deforestación han intensificado esta problemática afectando a regiones semiáridas como las que se pueden encontrar en México, donde las sequías severas han reducido la disponibilidad de agua para el sector agrícola (Wu et al., 2008).

En particular en el estado de San Luis Potosí, se encuentra dentro de las entidades de México con mayor afectación. Durante los años 2023 y 2024, diversos municipios fueron clasificados bajo condiciones de sequía extrema y excepcional, evidenciando una tendencia creciente y una expansión territorial del fenómeno desde 2011. Esta situación representa una amenaza directa para el desarrollo agrícola regional, particularmente para los cultivos hortícolas que dependen de sistemas de riego controlado, como los invernaderos hidropónicos.

Ante este escenario los generadores atmosféricos de agua (AWG, por sus siglas en inglés), han surgido como una alternativa tecnológica con alto potencial, al permitir la captura de humedad presente en el aire y su transformación en agua líquida mediante procesos de condensación. En estos sistemas, el evaporador constituye el componente clave responsable de la transferencia de calor y de la eficiencia del proceso de condensación.

En este contexto, se presenta el diseño conceptual y de detalle de un evaporador para un generador atmosférico de agua basado en condensación mecánica, factible de integrar a un invernadero hidropónico de tipo básico. El diseño propuesto permite evaluar su viabilidad técnica bajo las condiciones climáticas características del estado de San Luis Potosí, y regiones similares en México, contribuyendo así a la optimización del riego, la mitigación de los efectos de la sequía y promover prácticas de agricultura más sostenibles.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

En la literatura técnica se han desarrollados diversos trabajos relacionados con los AWG, que trabajan bajo el principio de condensación mecánica mediante ciclos de refrigeración por compresión. Estos estudios constituyen antecedentes relevantes para el presente trabajo, al establecer bases conceptuales, técnicas y experimentales sobre el funcionamiento y diseño de este tipo de sistemas.

Veiga (2025) presenta un generador de agua potable basado en la condensación del vapor de agua contenido en el aire, utilizando un sistema de refrigeración por compresión. En su trabajo describe de manera clara el ciclo frigorífico, así como los componentes principales del sistema (compresor, evaporador y condensador), proporcionando un enfoque conceptual accesible que permite comprender el principio de operación de los AWG por condensación. Este estudio resulta relevante como fundamento teórico para la identificación de los elementos clave del sistema y su interacción térmica.

Por su parte, Invar et al (2020) aborda la implementación de un AWG en un entorno urbano, describiendo con mayor detalle el ciclo completo de refrigeración, desde la entrada del aire húmedo hasta la recolección, purificación y almacenamiento del agua generada. El trabajo destaca, tanto los aspectos de diseño del sistema, como la calidad del agua producida, ofreciendo una referencia técnica integral sobre la aplicación práctica de los AWG y su integración con sistemas de tratamiento del agua.

Finalmente, Al-Shahrani (2023) presenta el diseño y fabricación de un generador atmosférico de agua basado en el ciclo de refrigeración por compresión, combinando el análisis teórico con la construcción y evaluación experimental de un prototipo funcional. Este trabajo aporta criterios de selección de componentes, parámetros de diseño y resultados de desempeño operativo, proporcionando valores de referencia útiles para el dimensionamiento de sistemas AWG, y particularmente, para el diseño del evaporador como elemento crítico del proceso de condensación.

En conjunto, estos trabajos evidencian la viabilidad técnica de los AWG por condensación mecánica y destacan, la importancia del diseño del evaporador en la eficiencia del sistema, lo cual justifica el enfoque del presente artículo, hacia el desarrollo conceptual y de detalle de este componente y su aplicación en invernaderos hidropónicos.

III. PROCEDIMIENTO

La etapa inicial consiste en el análisis de las principales variables climatológicas que influyen en el desempeño de un AWG, particularmente la temperatura del aire y la humedad relativa, considerando como zona de estudio la capital de San Luis Potosí, México. Esta región presenta predominantemente un clima seco templado, con una franja al sureste de clima semi-seco templado.

La temperatura media y humedad relativa media por mes durante el año 2002 se puede observar en la tabla I, la cual resume los valores promedios mensuales de temperatura y humedad relativa. La temperatura media anual es de aproximadamente 19 °C, mientras que la humedad relativa media anual es de 59.7 %, alcanzando su valor máximo en el mes de septiembre (70 %) y el mínimo en abril (48 %).

Tabla I. Climas de San Luis Potosí (INEGI, 2002).

Mes	Temperatura Media (°C)	Humedad relativa media (%)
Enero	13.6	60 – 65
Febrero	15 – 16	55 – 60
Marzo	18 – 19	50 – 55
Abril	21 – 22	48 – 50
Mayo	24 – 25	50 – 55
Junio	23 – 24	55 – 60
Julio	21 – 22	60 – 65
Agosto	21 – 22	60 – 65
Septiembre	20 – 21	65 – 70
Octubre	18 – 19	60 – 65
Noviembre	16 – 17	60 – 65
Diciembre	12.2	65 – 70

Estas condiciones permiten identificar un intervalo de operación representativo para el análisis y diseño del evaporador del AWG, ya que las variables ambientales influyen directamente en la capacidad de condensar el agua contenida en el aire y en la demanda energética del sistema.

A. Propuesta de diseño conceptual.

Para avanzar hacia la validación del sistema, se plantea una propuesta conceptual centrada en el componente más crítico del ciclo de refrigeración de un AWG: el evaporador.

Diversos autores coinciden en que este componente determina la tasa de condensación y el consumo energético del equipo, siendo el elemento con mayor impacto en la eficiencia global del generador atmosférico:

- Incropora et al. (2011) establece que la geometría del evaporador influye directamente en el gradiente térmico y en el área efectiva disponible para la condensación.
- Khalaf et al. (2024) demuestra que al mejorar las condiciones en la superficie de contacto aire–refrigerante se puede incrementar hasta en un 18 % la producción de agua por hora.

Estas referencias justifican la importancia de analizar cuidadosamente la geometría y las propiedades del evaporador durante la etapa inicial de diseño.

En la figura 1, se muestra la geometría del evaporador propuesta para la realización de los cálculos de diseño, con el fin de validar su desempeño y su capacidad de condensación dentro del sistema AWG.

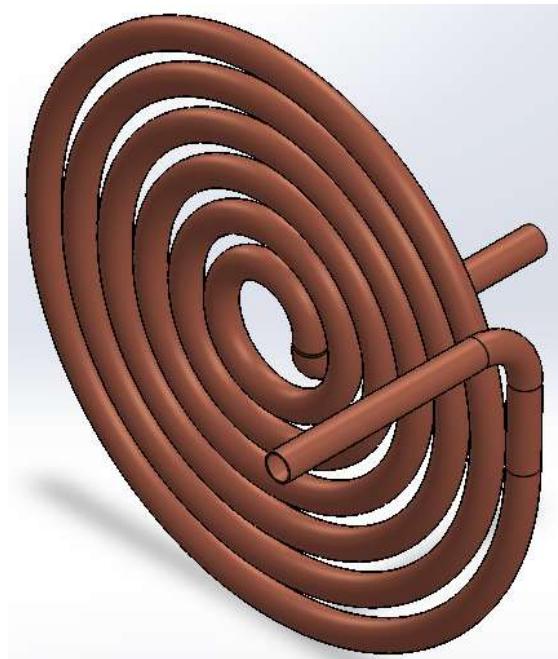


Fig. 1. Evaporador en forma de espiral plana.

Esta geometría fue seleccionada considerando su facilidad de fabricación, alta conductividad térmica y adecuada exposición al flujo del aire para favorecer la transferencia de calor. Esta propuesta consiste en una espiral plana con flujo de aire perpendicular a la superficie del serpentín cuya geometría maximiza el área de intercambio termodinámico, entre el aire y el refrigerante, sin incrementar excesivamente la pérdida de carga. El material es tubular de cobre de 8 mm de diámetro exterior con un espesor de 0.6 mm.

B. Metodología de cálculo de diseño del evaporador.

El diseño del evaporador constituye la etapa más crítica en el desarrollo de un AWG, ya que su geometría, material y condiciones de operación determinan la eficiencia con la que el aire húmedo puede ser enfriado por debajo del punto de rocío para producir la condensación. La metodología utilizada se fundamenta en principios termodinámicos, psicrométricos y fluidodinámicos establecidos en literatura técnica ((Thimmaiah et al., 2017; Alrwashdeh et al., 2022; Bergman et al., 2015) y adaptados al evaporador tubular de cobre con la forma geométrica de espiral plana.

El procedimiento de cálculo para evaluar el desempeño del evaporador propuesto consta de diez etapas principales, ampliamente utilizadas en estudios de condensación en sistemas HVAC (Calefacción, ventilación y aire acondicionado) y AWG (Thimmaiah et al., 2017; Du et al., 2022):

1. Determinación de condiciones ambientales
2. Cálculos psicrométricos
3. Evaluación del potencial de condensación
4. Determinación del área geométrica
5. Obtención de números adimensionales
6. Cálculo del coeficiente de transferencia de masa
7. Determinación del flujo superficial de condensación

8. Cálculo de la producción total de agua
9. Balance de energía
10. Energía mínima teórica por litro

Estas etapas permiten obtener una estimación sólida de la producción de agua y de la carga térmica del evaporador, y establecen la base para una posterior validación mediante CFD (Ahmad et al., 2022; Aurangzaib et al., 2023).

C. Etapas de desarrollo

- Etapa 1: Condiciones ambientales

Las variables ambientales iniciales determinan el contenido de vapor disponible para condensación, tal como destaca Bahrami et al. (2017) en su análisis experimental de sistemas AWG. La temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del flujo determinan la humedad absoluta y el comportamiento fluidodinámico del sistema.

- Etapa 2: Cálculos psicrométricos

El cálculo de propiedades psicrométricas se basa en correlaciones de presión de saturación y relaciones de humedad ampliamente descritas en ASHRAE y en textos de transferencia de calor y masa (Bergman et al., 2015).

a. Presión de saturación del vapor de agua

$$P_{sat}(T) = e^{(23.1964 - \frac{3816.44}{T+273.15})} \quad (1)$$

b. Humedad absoluta del aire

$$\omega = 0.622 \frac{RH \ P_{sat}}{P - RH \ P_{sat}} \quad (2)$$

c. Concentración de vapor en el aire

$$C_{air} = \frac{\omega \ \rho_{air}}{1 + \omega} \quad (3)$$

d. Concentración de vapor en la superficie fría

$$C_{surf} = \frac{P_{sat}(T_{surf})}{R_v(T + 273.15)} \quad (4)$$

Estos valores permiten calcular la fuerza impulsora del proceso de condensación (Ahmad et al., 2022).

- Etapa 3: Potencial de condensación

El potencial de condensación ΔC es la fuerza impulsora principal del proceso:

$$\Delta C = C_{air} - C_{surf} \quad (5)$$

- Etapa 4: Área proyectada de la superficie frontal del evaporador

El área superficial determina directamente la cantidad de agua que puede ser producida (Aurangzaib et al., 2023).

La geometría en espiral maximiza A en un volumen compacto, una estrategia común en intercambiadores (Bergman et al., 2015).

- Etapa 5: Números adimensionales

Los números adimensionales permiten evaluar el régimen de flujo y la eficiencia de transferencia. Reynolds (Bergman et al., 2015).

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (6)$$

Schmidt:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad (7)$$

Sherwood (correlaciones estándar para cilindros expuestos):

$$Sh = 0.0296(Re^{0.8})(Sc^{1/3}) \quad (8)$$

Estas correlaciones son las mismas aplicadas en análisis experimentales de AWG con condensación directa [9].

- Etapa 6: Coeficiente de transferencia de masa

$$k_m = \frac{Sh D_{AB}}{D_o} \quad (9)$$

- Etapa 7: Flujo de condensación superficial

$$j = k_m \Delta C \quad (10)$$

- Etapa 8: Producción total de agua

$$\dot{m}_{cond} = jA \quad (11)$$

La conversión final a litros por hora se realiza multiplicando por 3600.

- Etapa 9: Balance de energía – Carga térmica

$$\dot{Q} = \dot{m}_{cond} h_{fg} \quad (12)$$

- Etapa 10: Energía mínima teórica por litro

El límite termodinámico del proceso se obtiene dividiendo el calor latente entre 3600:

$$E_{min} = 0.67 - 0.75 \text{ kWh/L} \quad (13)$$

La metodología descrita permite obtener, a partir de condiciones climatológicas reales, las variables fundamentales para evaluar el desempeño térmico y productivo del evaporador propuesto. Los resultados derivados de este procedimiento constituyen la base para el análisis cuantitativo presentado en la siguiente sección, donde se evalúa la producción de agua y la carga térmica bajo distintas condiciones mensuales.

IV. RESULTADOS

La tabla II contiene los datos utilizados para llevar a cabo el análisis de diseño del evaporador.

Tabla II. Datos iniciales para el análisis de diseño.

Datos:	Valor	Unidades
Velocidad del aire (V)	4.1	m/s
Humedad Relativa (RH)	60	%
Temperatura del aire (Tin)	13.6	°C
Temperatura de la superf (Tsurf)	5	°C
Área proyectada (Ap)	0.0347004	m ²
Difusividad vapor aire (D _{A-B})	[7]	m ² /seg
Calor latente (h _{fg})	[16]	kJ/kg
Densidad del aire (ρ _{aire})	[17]	kg/m ³
Viscosidad dinámica aire (μ _{aire})	[17]	Pa·seg
Diámetro del tubo (L)	0.008	m
Concentración vapor sat (Csat _{vap})	[16]	g/m ³

Los valores que se mantuvieron constantes para estos cálculos son: la velocidad del aire, el área proyectada del evaporador y el diámetro del tubo. En lo que se refiere a la difusividad del vapor-aire, calor latente, densidad del aire, viscosidad dinámica del aire y la concentración de vapor saturado, que dependen directamente de la temperatura del aire, se obtienen de tablas de propiedades termodinámicas del aire.

Los datos obtenidos para la producción de agua mensual y la carga térmica por día, aplicando la metodología propuesta para el diseño del evaporador, se muestran en la tabla III.

Tabla III. Cantidad de agua y carga térmica generados

Mes	Temperatura media (°c)	Humedad relativa media (%)	Cantidad de agua (lts/mes)	Carga térmica (kwh/dia)
Enero	13.6	60	2.3505	0.05374
	13.6	65	6.6606	0.15228
Febrero	15	55	2.0788401	0.0474649
	15	60	7.2399	0.1653
	16	55	5.9949	0.13674
	16	60	11.4789	0.26184
Marzo	18	50	6.756	0.15382
	18	55	12.2265	0.27836
	19	50	9.8421	0.22386
	19	55	15.5886	0.35456
Abril	21	48	14.2269	0.32297
	21	50	16.7772	0.38086
	22	48	17.9235	0.40649
	22	50	20.6142	0.46752
Mayo	24	50	28.1226	0.63658
	24	55	35.5353	0.80437
	25	50	31.7943	0.71899
	25	55	39.5415	0.89418
Junio	23	55	31.4682	0.713
	23	60	38.5407	0.87324
	24	55	35.5353	0.80437
	24	60	42.9477	0.97215
Julio	21	60	29.5278	0.67032
	21	65	35.9031	0.81504
	22	60	34.0671	0.77263
	22	65	40.7937	0.92518
Agosto	21	60	29.5278	0.67032
	21	65	35.9031	0.81504
	22	60	34.0671	0.77263
	22	65	40.7937	0.92518
Septiembre	20	65	30.9405	0.70307
	20	70	36.9591	0.83983
	21	65	35.9031	0.81504
	21	70	42.2784	0.95977
Octubre	18	60	17.697	0.4029
	18	65	23.1672	0.52745
	19	60	21.3351	0.48527
	19	65	27.0816	0.61597
Noviembre	16	60	10.2672	0.2342
	16	65	15.1722	0.34609
	17	60	14.0196	0.31949
	17	65	19.2141	0.43786
Diciembre	12.2	65	2.1465	0.04914
	12.2	70	6.1446	0.14067

Los datos correspondientes a la cantidad de agua y la carga térmica generados por mes, contenidos en la Tabla III, fueron obtenidos conjugando los valores máximos y mínimo de la temperatura y de la humedad relativa del aire (columna 1 y 2). Con estos valores, se obtiene el promedio mensual de la producción de agua por mes que se muestra en la Tabla IV, la cual permite conocer principalmente, el mes con mayor y menor producción de agua mensual.

Tabla IV. Promedio de agua por mensual.

Mes	Cantidad de agua promedio por mes (litros)
Enero	4.50555
Febrero	6.698135025
Marzo	11.1033
Abril	17.38545
Mayo	33.748425
Junio	37.122975
Julio	35.072925
Agosto	35.072925
Septiembre	36.520275
Octubre	22.320225
Noviembre	14.668275
Diciembre	4.14555

Para observar de una manera más clara la diferencia en la producción de agua calculada para la geometría del evaporador propuesta, se muestra la gráfica de la figura 2.

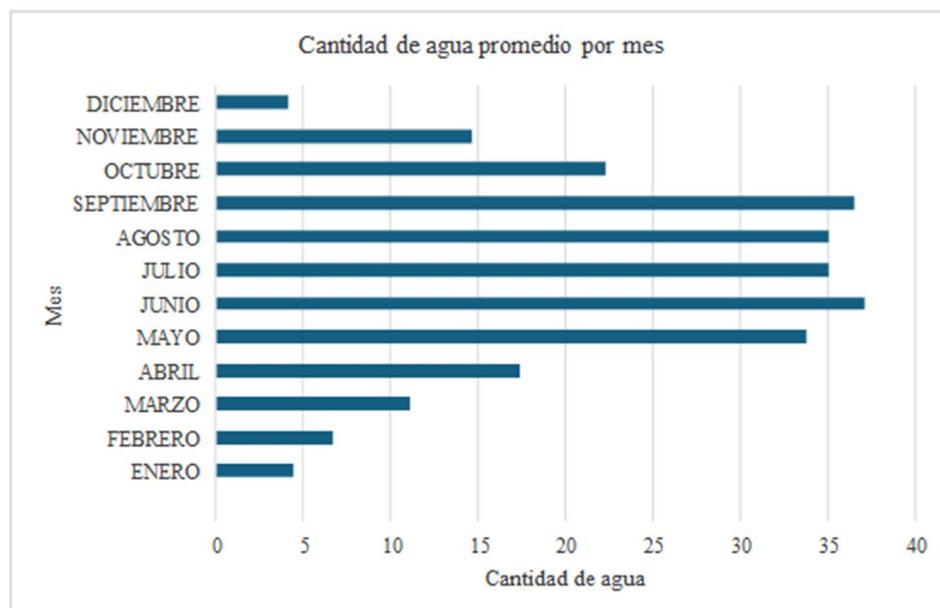


Fig. 2. Promedio de producción de agua mensual.

A. Interpretación de resultados.

Los resultados obtenidos del análisis mostrado permiten establecer las bases para un análisis más profundo de los factores que se involucran o intervienen para el diseño propuesto. Por ejemplo, en la tabla I, podemos observar una gran variación tanto en la temperatura como en la humedad relativa en cada mes. Lo que nos provoca variación significativa en la producción de agua mensual en el año.

El mes con la mayor producción de agua es el mes de junio, seguido por el mes de septiembre con 37 litros y 36.5 litros respectivamente. Y los meses con menor producción de agua son diciembre y enero, con una producción mensual de 4 y 4.5 litros respectivamente.

Lo que nos muestra una gran diferencia entre el mes de mayor producción, junio, con el mes de menor producción, diciembre, con un aproximado de 33 litros.

El objetivo que se busca en la generación de agua es de 30 litros por mes como mínimo, por lo que se deberán buscar otras opciones de evaluación que nos permitan lograr este objetivo.

B. Evaluación de opciones.

Existen diferentes opciones a evaluar de operación y diseño si los resultados no son los requeridos de acuerdo con el objetivo establecido. Entre estas posibilidades destacan:

- *Validación de condiciones de operación.* Simular distintas velocidades de flujo.
- *Cambios en la geometría del evaporador.* Modificar dimensiones como diámetro del tubo, espesor del cobre o paso de la hélice.

RECONOCIMIENTOS

Agradezco muy profundamente a mi asesora la Doctora Isabel Pereyra Laguna, del Centro de Tecnología Avanzada, A.C., CIATEQ, por su gran apoyo y motivación en la realización de este proyecto. De igual manera, agradezco el apoyo otorgado por la SECIHTI para realizar mi maestría en Manufactura Avanzada.

REFERENCIAS

- Ahmad, N., Khan, S., Ehsan, M., Rehman, F. U., & Al-Shuhail, A. (2022). Estimating the total volume of running water bodies using geographic information system (GIS): A case study of Peshawar Basin (Pakistan). *Sustainability*, 14(7), 3754. <https://doi.org/10.3390/su14073754>
- Alrwashdeh, S. S., Ammari, H., Madanat, M. A., & Al-Falahat, A. M. (2022). The effect of heat exchanger design on heat transfer rate and temperature distribution. *Emerging Science Journal*, 6(1), 128–137. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2022-06-01-010>
- Al-Shahrani, S. (2023). Design and fabrication of an atmospheric water generator based on vapor compression refrigeration cycle (Paper No. IMECE2022-94117). In *Proceedings of the ASME 2022 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2022-94117>
- ASHRAE. (2021). ASHRAE handbook—Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Aurangzaib, M., Iqbal, T., Hussain, F., Hussain, S., ul Haq, Z., Usman, M., Ameen Ul Zaman, M., Ubaid Ur Rehman, A., Abu Saad, A., Ameer Hamza, & Shafqat Ullah, M. (2023). Suitability of atmospheric water harvesting (AWH) techniques for the climatic conditions of Pakistan: A case study. *Pure and Applied Biology*, 12(3), 1490–1500. <https://doi.org/10.19045/bspab.2023.120150>

- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2015). Fundamentals of heat and mass transfer (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2019). Heat and mass transfer: Fundamentals & applications (6th ed.). McGraw-Hill.
- Du, S., Li, Q., Cao, X., & Song, Q. (2022). Investigation on heat transfer and pressure drop correlations of R600a air-cooled finned tube evaporator for fridge. *International Journal of Refrigeration*, 144, 103012. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.07.012>
- FAO. (2023). Water scarcity means less water for agriculture production, threatening food security and nutrition. <https://www.fao.org/newsroom/detail/water-scarcity-means-less-water-for-agriculture-production-which-in-turn-means-less-food-available-threatening-food-security-and-nutrition/es> (Consultado el 10 de septiembre de 2024)
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Inbar, O., Gozlan, I., Ratner, S., Aviv, Y., Sirota, R., & Avisar, D. (2020). Producing safe drinking water using an atmospheric water generator (AWG) in an urban environment. *Water*, 12, 2940. <https://doi.org/10.3390/w12102940>
- Khalaf, B. T., Lopez Ferber, N., Martins, M., Chiesa, M., & Calvet, N. (2024). Long-term performance evaluation of VCRS-based atmospheric water generation in arid climates. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100855. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100855>
- Manrique, J. A., & Cárdenas, R. S. (1976). Termodinámica. Harla, Harper & Row Latinoamericana.
- Parent, M. (2010). Agua a partir del aire: La innovación que cambiará nuestras vidas. Canadá.
- Thimmaiah, P. C., Sharafian, A., Rouhani, M., Huttema, W., & Bahrami, M. (2017). Evaluation of low-pressure flooded evaporator performance for adsorption chillers.
- Veiga, E. (2005). Generador de agua potable por condensación del vapor del aire (Patente). Oficina Española de Patentes y Marcas.
- Wu, S., Bates, B., Kundzewicz, Z. W., & Palutikof, J. (2008). Climate change and water. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).