



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

**CONSTRUCCIÓN DE UN DESALINIZADOR DE AGUAS
SALOBRES PARA POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN USO
AGRÍCOLA**

TESIS

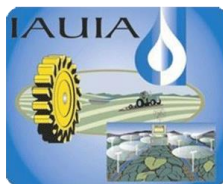
**Que como requisito parcial para
obtener el grado de:**

**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

Presenta:

JESÚS ANTONIO GARCÍA MARTÍNEZ

Bajo la supervisión de: SALVADOR VALLE GUADARRAMA, DR.



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2024

CONSTRUCCIÓN DE UN DESALINIZADOR DE AGUAS SALOBRES PARA POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN USO AGRÍCOLA

Tesis realizada por **JESÚS ANTONIO GARCÍA MARTÍNEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

DIRECTOR:



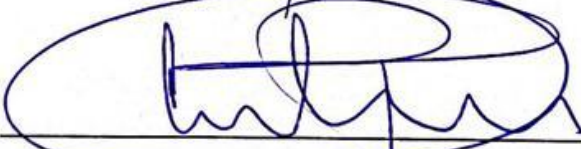
DR. SALVADOR VALLE GUADARRAMA

ASESOR:



DR. MAURICIO CARRILLO GARCÍA

ASESOR:



DR. CARLOS ALBERTO VILLASEÑOR PEREA

LECTOR EXTERNO:



DR. FERMIN MARTINEZ SOLIS

Chapingo, México, noviembre de 2024

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2	Revisión de literatura	7
2.3.	Gestión y consumo de energía	11
2.4.	Clasificación del HDH en función del sistema de calefacción	12
2.5.	Tratamiento del agua en los huertos domésticos	14
2.6.	Discusión	18
2.7.	Conclusión	19
2.8.	Referencias	20
3	ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DEL SISTEMA DE DESALINIZACIÓN POR HUMIDIFICACIÓN-DESHUMIDIFICACIÓN: TENDENCIAS Y OPORTUNIDADES.	23
3.1	Introducción	25
3.2	Metodología	27
3.2.1	Estrategia d búsqueda bibliográfica	28
3.2.2	Preparación de datos	30
3.2.3	Análisis bibliométrico	31
3.3	Resultados y discusión	32
3.3.1	Tipos de documentos e idiomas	32
3.3.2	Tendencias de publicación	32
3.3.3	Temas de tendencia	34

3.3.4	Publicación por País y Colaboraciones Internacionales.....	35
3.3.5	Palabras clave de investigación emergentes HDH	38
3.3.6	Análisis de red de palabras clave y colaboración entre autores...40	
3.3.7	Principales revistas y contribución de autores	45
3.3.8	Análisis de red	48
3.3.9	Implicaciones y limitaciones	49
3.3.10	Oportunidades de investigación futuras en HDH	50
3.4	Conclusión.....	51
3.5	Bibliografía	53
4.	CARACTERIZACIÓN DE UN DESALINADOR DE AGUAS SALOBRES PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA DULCE	59
4.1.	Resumen.....	59
3.1.	Introducción.....	61
3.2.	Materiales y métodos.....	62
3.3.	Resultados y discusión	83
3.4.	Conclusiones	94
3.5.	Literatura citada.....	96
5	CONCLUSIONES GENERALES	100
	Anexos	101

LISTA DE CUADROS

CAPITULO 2

Cuadro 1. Equipos de desalinización que muestran el GOR, la productividad y la configuración del sistema que se utiliza en varios países.9

Cuadro 2. Comparación del tamaño y la energía de los sistemas modernos de desalinización16

CAPITULO 3

Cuadro 1 Criterios de inclusión y exclusión según metodología PRISMA28

Cuadro 2 Combinaciones de palabras clave empleadas y los resultados obtenidos en cada etapa de filtrado, de acuerdo con la consulta realizada en Scopus (consultado el 19 de julio de 2023).29

Tabla 3 Las cinco revistas principales con documentos publicados.45

Tabla 4 Características principales de los autores más activos en la investigación sobre HDH.46

Tabla 5 Fuerza total de enlace de las 10 palabras clave con mayor frecuencia de aparición.47

CAPITULO 4

Cuadro 1 Velocidades del aire (m/s) en distintos puntos del dispositivo HDH en función de la frecuencia del ventilador.67

Cuadro 2 Rutina de cálculo de las propiedades psicrométricas del aire húmedo.73

Cuadro 3 Matriz de Diseño Experimental con Variables Normalizadas para las Condiciones Operativas del Sistema HDH.....82

Cuadro 4 Rutinas de operación del sistema HDH.85

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 2

Figura 1. Configuración HDH: A = CAOW, B = OACW, C = OAOW, D = CACW, 1 = Humidificador, 2 = Deshumidificador, 3 = Soplador de aire, 4 = Flujo de aire, 5 = Intercambio de calor, 6 = Salida de flujo de refrigerante, 7 = Entrada de flujo de refrigerante, 8 = Salida de destilado, 9 = Tanque de agua destilada, 10 = Aguas residuales, 11 = Salida de salmuera, 12 = Calentador, 13 = Soplador de aire, 14 = Tanque de agua de mar, 15 = Bomba de agua, 16 = Válvula, 17 = Medidor de caudal, 18 = Entrada de aire, 19 = Salida de aire	11
Figura 2. Sistema HDH con bomba de calor para edificio urbano.	15
Figura 3. Tratamiento del agua mediante ósmosis inversa	17

CAPITULO 3

Figura 1 <i>Diagrama de flujo del proceso metodológico para el análisis bibliométrico sobre desalinización por HDH</i>	30
Figura 2 Publicaciones anuales y citas sobre desalinización HDH.....	34
Figura 3 Temas de tendencia en la investigación de HDH en los últimos años	35
Figura 4 Comparación de la tendencia de crecimiento de la investigación de los principales países.	38
Figura 5 Frecuencia de las palabras a lo largo del tiempo	39
Figura 6 Diagrama de visualización de las palabras co-keyword de mayor incidencia en la base de datos (n=163)	42
Figura 7 Diagrama de análisis de red basado en palabras clave indexadas	43
Figura 8 Diagrama de análisis de red basado en la colaboración de los autores.	44

Figura 9 Análisis de red de citas, autores y palabras clave en la investigación de humidificación-deshumidificación (HDH).....	49
--	----

CAPITULO 4

Figura 1 Diagrama del sistema de humidificación-deshumidificación.....	64
--	----

Figura 2 Apariencia externa del dispositivo HDH. S1: sistema de calentamiento del aire; S2: contenedor inicial de agua salobre; S3: torre de humidificación; S4: torre de deshumidificación; S5: sistema de enfriamiento de agua.....	65
---	----

Figura 3 Variación de la velocidad del aire en función de la frecuencia del ventilador.	69
--	----

Figura 4 Diagrama psicrométrico correspondiente a la presión atmosférica de la región de Chapingo, México (77,993 Pa).....	74
--	----

Figura 5 Diagrama Psicrométrico del Patrón de Medición de Humedad y Temperatura en el Sistema HDH.	87
---	----

Figura 6 Gráfico de Pareto de efectos estandarizados para flujo de agua evaporada (Fae).	90
---	----

Figura 7 Superficies de respuesta del flujo de agua evaporada (Fae) en función de la temperatura del aire, flujo de agua nebulizada y frecuencia del ventilador.	91
---	----

Figura 8 Gráfico de Pareto de efectos estandarizados para flujo de agua evaporada (Fae).	93
---	----

Figura 9 Superficies de respuesta del flujo de agua condensada (Fac) en función de (a) temperatura del aire y flujo de agua nebulizada, y (b) temperatura del aire y frecuencia del ventilador	94
--	----

LISTA DE ANEXOS

Anexo A Mediciones psicométricas obtenidas en las pruebas de los sistemas HDH, en relación con el número de sistema	101
Anexo B: Parametrización del Calentamiento del aire	103
Anexo C: Parametrización del Calentamiento de Agua Salobre	104
Anexo D: Datos de Flujo Másico, Carga Térmica y Eficiencia en los Subsistemas de Evaporación y Condensación del Sistema HDH	105
Anexo E: Código para el Análisis de Regresión, Modelos de Primer Orden y Gráfico de Pareto.....	106
Anexo F: Código para el Análisis de Superficie de Respuesta.....	108
Anexo G: Congresos	112
Anexo H: Artículos	113

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el invaluable apoyo financiero otorgado para la realización de mis estudios de posgrado.

A la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP) por su constante compromiso con el avance científico, brindándonos apoyo financiero para la construcción del prototipo.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) por brindarme la oportunidad de llevar a cabo mis estudios de posgrado.

Al Dr. Federico Felix Hahn Schlam (†) por su incansable apoyo y su gran conocimiento, que permitieron dar forma y consolidar de manera adecuada el presente documento. Que en paz descanse.

A mis asesores, por su valioso tiempo en la revisión del proyecto.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Jesus Antonio García Martínez

Fecha de nacimiento: 7 de abril de 1993

Lugar de nacimiento: Minatitlán, Veracruz

CURP: GAMJ930407HVZRRS08

Profesión: Ingeniero Mecánico

Cedula Profesional: 10927280



ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-7697-6590>

Desarrollo académico

Maestría 2017-2019:

Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo, Mexico.

Licenciaturas:

Ingeniería Mecánica. Universidad Veracruzana. 2011-2017, Coatzacoalcos, Veracruz.

Ingeniería en sistemas de producción agropecuarios, Universidad Veracruzana, 2013-2017, Acayucan, Veracruz.

Bachillerato: COBAEV Plantel 08, 2008-2011 Cosoleacaque

RESUMEN GENERAL

Construcción de un desalinizador de aguas salobres para potabilización del agua en uso agrícola

Este trabajo aborda la construcción y evaluación de un sistema de desalinización de agua salobre mediante la tecnología de humidificación-deshumidificación (HDH), que representa una alternativa viable para la producción de agua dulce en comunidades rurales. En el primer capítulo, se realiza una revisión exhaustiva de la literatura sobre los principios termodinámicos y psicrométricos que sustentan la operación de los sistemas HDH, destacando su capacidad para operar con fuentes de energía renovable, como la solar, y su potencial de implementación a pequeña escala. Posteriormente, se realizó un análisis bibliométrico que evalúa la investigación en tecnología HDH entre 2000 y 2023. Empleando la metodología PRISMA, se identificaron tendencias, autores y enfoques en eficiencia energética y producción de agua destilada, señalando el crecimiento de este campo. En una cuarta fase, se llevó a cabo el modelado del sistema HDH utilizando principios de psicrometría, lo que permite parametrizar un dispositivo físico y evaluar su desempeño en función de la producción de agua dulce y la eficiencia energética. Los principales componentes del sistema, como humidificadores y deshumidificadores, son analizados y optimizados para mejorar la eficiencia del ciclo, proponiendo el uso de bombas de calor para maximizar la recuperación de agua. El sistema HDH presenta un alto potencial para su implementación en zonas rurales, aunque se identifican áreas de mejora para incrementar su eficiencia y reducir los costos operativos.

Palabras clave: Desalinización, humidificación-deshumidificación (HDH), agua salobre, eficiencia energética y psicrometría

GENERAL ABSTRACT

Construction of a brackish water desalination system for agricultural water purification

This work deals with the construction and evaluation of a brackish water desalination system using humidification-dehumidification (HDH) technology, which represents a viable alternative for freshwater production in rural communities. In the first chapter, a comprehensive literature review is conducted on the thermodynamic and psychrometric principles underlying the operation of HDH systems, highlighting their ability to operate with renewable energy sources, such as solar, and their potential for small-scale implementation. Subsequently, the HDH system is modelled using principles of psychrometrics, allowing a physical device to be parameterized and its performance to be assessed in terms of freshwater production and energy efficiency. The main components of the system, such as humidifiers and dehumidifiers, are analyzed and optimized to improve the efficiency of the cycle, proposing the use of heat pumps to maximize water recovery. The HDH system has a high potential for implementation in rural areas, although areas for improvement are identified to increase efficiency and reduce operating costs.

Key words: Desalination, humidification-dehumidification (HDH), brackish water, energy efficiency and psychrometry.

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La desalinización es un proceso utilizado para obtener agua dulce a partir de agua salada, como agua salobre o agua de mar. Desde su evolución en la década de 1950, su viabilidad técnica y económica ha mejorado considerablemente. Comúnmente se usan procesos de membrana, térmicos o emergentes, siendo la ósmosis inversa de membrana la que se usa en el 69% de las instalaciones globales. Una preocupación ambiental importante surge del gran volumen de salmuera producida en el proceso de desalinización, que requiere una gestión especial y aumenta los costos de energía. El manejo de la salmuera es costoso financiera y técnicamente difícil, por lo que la mayoría de las plantas de desalinización vierten salmuera sin tratar directamente al medio ambiente. Las regiones de Medio Oriente y el norte de África producen el mayor volumen de salmuera (99.4 m³/d), seguidas de las regiones de Pacífico y Asia Oriental (14.9 m³/d), Europa Occidental (8.4 m³/d) y Norteamérica (5.4 m³/d). Por otro lado, en el ámbito local, los sectores con mayor problema de producción de salmuera son el municipal (106.5 m³/d), industrial (27.4 m³/d) y de regadío (1.1 m³/d) (Jones et al., 2019).

La tecnología de humidificación-deshumidificación (HDH) se ha convertido en una alternativa viable para la desalación a pequeña escala (Garcia et al., 2023). Esta tecnología imita el ciclo natural del agua, donde este fluido se evapora, dejando atrás las sales y otros contaminantes, para luego condensarse y formar agua dulce (Khraisheh et al., 2022). Este proceso consta de dos etapas fundamentales, la humidificación, en la que el agua salobre se evapora mediante

Doctoral Thesis. Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua,
Universidad Autónoma Chapingo.

Author: M.C. Jesús Antonio García Martínez.

Thesis Director: Dr. Salvador Valle Guadarrama.

la adición de aire caliente, y la deshumidificación, donde el vapor de agua se enfría y se condensa para formar agua dulce.

El sistema HDH se basa en procesos térmicos simples que pueden operar a bajas temperaturas, lo que lo hace adecuado para regiones con limitaciones energéticas y alta radiación solar. Este tipo de energía se ha visto como una opción viable y sostenible en comparación con otras tecnologías de desalación más costosas y demandantes de energía (Soomro et al., 2021; Tiwari & Kumar, 2023). Asimismo, el HDH es ideal para sistemas pequeños y descentralizados, lo que permite su implementación en comunidades rurales con poca infraestructura (Nabil et al., 2023; Soomro et al., 2021). En términos de eficiencia, los sistemas HDH están siendo mejorados mediante precalentamiento simultáneo de aire y agua, lo que incrementa la capacidad de producción de agua dulce y optimiza el uso de la energía disponible. Además, es factible el uso de fuentes híbridas de energía o el uso de sistemas cíclicos cerrados, lo que permite aumentar el rendimiento del sistema al reducir el consumo de energía y aumentar la recuperación del agua (Nabil et al., 2023; Soomro et al., 2021). Por otro lado, uno de los mayores beneficios de la tecnología HDH es su bajo impacto ambiental, ya que puede utilizar energías renovables y producir un residuo mínimo de salmuera, en comparación con otros métodos de desalación, lo que convierte al método en una opción sostenible y respetuosa con el medio ambiente, particularmente en un contexto de creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de abordar tecnologías de baja emisión de carbono (Tiwari & Kumar, 2023).

En tal contexto, el presente trabajo se realizó con los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general:

Construir un dispositivo para la obtención de agua dulce a partir de agua salobre mediante el uso de una tecnología de humidificación-deshumidificación, para favorecer el desarrollo de regiones rurales.

1.2. Objetivos específicos:

- Modelar la operación de un sistema desalinador de agua salobre para la obtención de agua dulce, a través de principios de la termodinámica, para optimizar el funcionamiento del dispositivo.
- Evaluar la eficiencia de producción de agua dulce a partir de agua salobre en un equipo basado en una tecnología de humidificación-deshumidificación, para valorar la pertinencia del dispositivo.

Asimismo, se plantearon las siguientes:

1.3. Hipótesis:

- La tecnología de humidificación-deshumidificación permite obtener agua dulce a partir de agua salobre.
- La aplicación de principios de psicrometría permite la modelación de un sistema de humidificación-deshumidificación para la obtención de agua dulce a partir de agua salobre.

1.4. Organización de la tesis:

El presente trabajo está desarrollado en Capítulos. El primero de ellos corresponde a una revisión de la literatura relacionada con la operación de un sistema de desalinización de agua salobre para la producción de agua dulce. El capítulo 3 aborda un análisis bibliométrico donde se describen las tendencias de la investigación de equipos HDH. El capítulo 4 muestra el modelado de un sistema HDH basado en principios de la psicrometría y parametriza un dispositivo físico que opera bajo este método.

1.5. Literatura citada:

Ahmed, H. A., Ismail, I. M., Saleh, W. F., & Ahmed, M. (2017). Experimental investigation of humidification-dehumidification desalination system with corrugated packing in the humidifier. *Desalination*, 410, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.036>

- Choukai, O., & Zejli, D. (2021). Modeling of seawater greenhouse by a block diagram environment program and an equations solver program and simulations on different moroccan locations. *Desalination and Water Treatment*, 240, 203–209. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27703>
- Eder, E., Cordin, M., Pham, T., Brüggemann, D., & Preißinger, M. (2023). An experimental study of oily wastewater treatment in a humidification–dehumidification system with bubble column humidifier. *Thermal Science and Engineering Progress*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101578>
- Fares, M. N., Al-Mayyahi, M. A., Rida, M. M., & Najim, S. E. (2019). Water Desalination Using a New Humidification-Dehumidification (HDH) Technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1279(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1279/1/012052>
- Felder, R. M., Rousseau, R. W., & Bullard, L. G. (2020). *Elementary principles of chemical processes*. John Wiley & Sons.
- Garcia, J., Hahn, F., Valle, S., & Carillo, M. (2023). Residual and desalination water treatments using HDH process- a review for potential use in mome gardens. *Advances in Robotics & Mechanical Engineering*, 4(1), 492–498. <https://doi.org/10.32474/ARME.2023.04.000177>
- Green, D. W. (2008). *Perry's chemical engineers'. Handbook–seventh Edition*.
- Guler, E., Ozakdag, D., & Arda, M. (2010). Effect of temperature on seawater desalination-water quality analyses for desalinated seawater for its use as drinking and irrigation water. *Environ Geochem Health*, 32, 335–339. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9294-x>
- He, W. F., Xu, L. N., & Han, D. (2016). Parametric analysis of an air-heated humidification-dehumidification (HDH) desalination system with waste heat recovery. *Desalination*, 398, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.07.016>
- Jones, E., Qadir, M., Vliet, M. T. H. Van, Smakhtin, V., & Kang, S. (2019). Science of the Total Environment The state of desalination and brine production : A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343–1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>

- Kabeel, A. E., & El-Said, E. M. S. (2014). A hybrid solar desalination system of air humidification, dehumidification and water flashing evaporation: Part II. Experimental investigation. *Desalination*, 341(1), 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.035>
- Khairat Dawood, M. M., Amer, A., Teamah, M. A., Aref, A., & Mansour, T. (2021). Experimental investigation of two-stage humidification-dehumidification desalination system integrated with an innovative oxy-hydrogen (HHO) system. *International Journal of Energy Research*, 45(6), 9116–9140. <https://doi.org/10.1002/er.6442>
- Khraisheh, M., Inamdar, M., Almomani, F., & Adham, S. (2022). Humidification–Dehumidification (HDH) Desalination and Other Volume Reduction Techniques for Produced Water Treatment. *Water (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/w14010060>
- Lawal, D., Antar, M., Khalifa, A., Zubair, S., & Al-Sulaiman, F. (2018). Humidification-dehumidification desalination system operated by a heat pump. *Energy Conversion and Management*, 161(September 2017), 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.067>
- Lu, Y., He, W., Zhou, X., An, H., Chen, J., & Han, D. (2022). Design Analysis of a Solar-Powered Water Desalination System Using Humidification Dehumidification for Continuous Water Production. *Sustainability (Switzerland)*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/su14116860>
- McGovern, R. K., Thiel, G. P., Narayan, G. P., Zubair, S. M., & V, J. H. L. (2013). Performance limits of zero and single extraction humidification-dehumidification desalination systems. *Applied Energy*, 102, 1081–1090. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.025>
- Mora, J. L., Herrero, J., & Weindorf, D. C. (2017). Multivariate analysis of soil salination-desalination in a semi-arid irrigated district of Spain. *Geoderma*, 291, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.12.018>
- Nabil, I., Abdalla, A. M., Mansour, T. M., Shehata, A. I., & Dawood, M. M. K. (2023). Salinity impacts on humidification dehumidification (HDH) desalination systems: review. *Environmental Science and Pollution*

- Research*, 31(2), 1907–1925. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31327-5>
- Narayan, G. P., Sharqawy, M. H., Summers, E. K., Lienhard, J. H., Zubair, S. M., & Antar, M. A. (2010). The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1187–1201. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.014>
- Rajaseenivasan, T., Shanmugam, R. K., Hareesh, V. M., & Srithar, K. (2016). Combined probation of bubble column humidification dehumidification desalination system using solar collectors. *Energy*, 116, 459–469. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.127>
- Roslan, S. N. A. B., Alias, N. H., Othman, N. H., Aziz, M. H. A., Marpani, F., Mat-Shayuti, M. S., Shahrudin, M. Z., & Djokokusworo, T. (2022). Application of response surface methodology for modelling of direct contact membrane distillation system: a review. *Desalination and Water Treatment*, 257(September 2021), 169–184. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.28015>
- Singh, D., Tangellapalli, S., & Kukreja, R. (2023). Performance Investigation of the Ejector Humidification Dehumidification (EHD) Cycle for Fresh Water and Cooling Generation. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 285, 357–367. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5077-3_29
- Soomro, S. H., Santosh, R., Bak, C.-U., Kim, W.-S., & Kim, Y.-D. (2021). Humidification-dehumidification desalination system powered by simultaneous air-water solar heater. *Sustainability*, 13(23), 13491. <https://doi.org/10.3390/su132313491>
- Thiel, G. P., Miller, J. A., Zubair, S. M., & Lienhard, J. H. (2013). Effect of mass extractions and injections on the performance of a fixed-size humidification-dehumidification desalination system. *Desalination*, 314, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.12.025>
- Tiwari, A., & Kumar, A. (2023). A comprehensive review on solar thermal desalination systems based on humidification-dehumidification approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(7), 2075–2097. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02517-z>

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Introducción a la tecnología HDH

La desalinización es un proceso utilizado para obtener agua dulce a partir de agua salina, como el agua salobre o el agua de mar. Desde su evolución en los años 50, su viabilidad técnica y económica ha mejorado considerablemente. Se suelen utilizar procesos de membrana, térmicos o emergentes, siendo la ósmosis inversa (OI) de membrana la utilizada en el 69% de las instalaciones mundiales (Jones et al., 2019). Uno de los principales problemas medioambientales es el gran volumen de salmuera que se produce en el proceso de desalinización, que requiere una gestión especial y aumenta los costes energéticos. La manipulación de la salmuera es costosa desde el punto de vista económico y difícil desde el punto de vista técnico, por lo que la mayoría de las plantas desalinizadoras vierten la salmuera sin tratar directamente al medio ambiente. Oriente Medio y Norte de África representan el mayor volumen de producción de salmuera (99.4 m³/día), seguidos de Asia Oriental y Pacífico (14.9 m³/día), Europa Occidental (8.4 m³/día) y Norteamérica (5.4 m³/día). representan la gran mayoría en el resto de la participación mundial. Por otro lado, los sectores con mayor problema de producción de salmuera son el municipal (106.5 m³/día), el industrial (27.4 m³/día) y el de riego (1.1 m³/día) (Jones et al., 2019). Cuanto mayor sea la eficiencia volumétrica del proceso de desalinización, menor será la proporción de salmuera producida en relación con el volumen de agua desalada producida. La tecnología de humidificación-deshumidificación (HDH) se ha convertido en una alternativa viable para la desalinización a pequeña escala. Esta tecnología, basada en el principio del ciclo del vapor, condensa el vapor de agua para obtener agua dulce. El aire entra en la unidad HDH y se condensa en el evaporador para producir vapor de agua. Este vapor pasa por el condensador y el agua recogida se almacena para su uso posterior (Khraisheh et al., 2022). La tecnología de

humidificación-deshumidificación ha demostrado ser una alternativa eficaz a la desalinización tradicional debido a su bajo coste, simplicidad y eficiencia energética. Los principales componentes del sistema HDH son el humidificador y el deshumidificador. En el humidificador, el proceso de evaporación aumenta la humedad del aire, al mantener el contacto entre las gotas de agua atomizadas y el aire no saturado. Esta humidificación es el resultado de la diferencia entre el contenido de humedad del aire y el de la interfaz aire-agua (Santosh et al., 2023). la humedad del aire suministrado al humidificador tiene un gran impacto en el rendimiento del sistema (Mahmoud et al., 2018). Para aumentar el contenido de humedad del aire, los sistemas HDH utilizan dispositivos como torres de pulverización (Wu et al., 2017), columnas de burbujas (Abdelkader et al., 2020) y cámaras de lecho compacto (Garg et al., 2022). El diseño del balance de masas es importante en cada equipo; por ejemplo, la relación diámetro-longitud de la torre es un parámetro estratégico, para mezclar el aire y el aerosol de forma óptima. Los desecadores o condensadores son los principales equipos de deshumidificación de HDH, que condensan el aire húmedo para producir agua dulce (Khraisheh et al., 2022). En los sistemas de desalinización de agua de mar basadas en técnicas de HDH, los desecadores influyen más que los humidificadores en el volumen de agua dulce obtenido. Los desecadores indirectos ofrecen una mayor recuperación de calor que los directos, ya que el aire caliente y húmedo del desecador indirecto se utiliza para precalentar el agua de mar (Rostamzadeh et al., 2019). Los sistemas HDH pueden clasificarse en dos grandes grupos: Gestión y consumo de energía, incluyendo el tipo de calentamiento HDH y la configuración del ciclo dentro del proceso HDH. Se han definido algunos parámetros de rendimiento importantes, como la relación ganancia-rendimiento (GOR). El GOR es la relación entre el calor latente de evaporación del agua destilada producida y el calor total aportado por la fuente de calor (Mohamed et al., 2021). En el Cuadro 1, los sistemas de desalinización con productividades que tienen la unidad de L/m²día o L/m²h representan plantas dependientes del área del destilador solar, tubos o concentrador solares. Los sistemas de concentrador solar tienden a producir grandes cantidades de

agua al día, como muestra la planta de Arabia Saudí (Lawal et al., 2018; Mahmoud et al., 2019; Aref et al., 2021; Lawal et al., 2020; Rahimi-Ahar et al., 2018; Dayem & AlZahrani, 2022).

Cuadro 1. Equipos de desalinización que muestran el GOR, la productividad y la configuración del sistema que se utiliza en varios países.

País	Planta	Ciclo de configuración	GOR	Productividad	Costo \$/L	Autor
Arabia Saudita	HDH+HP	CAOW	3.7-10.4	-	0.008-0.03	Lawal et al., 2018
Egipto	SS+HDH	CACW	-	11L/(m ² .day)	-	Mahmoud et al., 2019
Iran	CLPHP+HDH+HP	CACW	0.81	8.7L(m ² .day)	0.012	Aref et al., 2021
Arabia Saudita	HDH + HP	CACW	4.07	287.8L/day	0.011-0.02	Lawal et al., 2020
Iran	HDH + SCV	CAOW	3.43	1.07L/m ² .h	0.0041	Rahimi-Ahar et al., 2018
Saudí Arabia	HDH + SC	OAOW	4.23	125L/m ² .day	-	Dayem & AlZahrani, 2022
Egipto	HDH+Agua de recirculación	OACW CACW	0.53 0.84	4.98L/h 6.16L/h	0.015 0.012	Mohamed et al., 2021
Egipto	HDH+HR+SC	OAOW	0.30	123.7 L/h	0.099	Fouda et al., 2020

*GOR= Ratio de rendimiento ganado; CS= Sistema de refrigeración; HP= Bomba de calor; SS= Destilador solar; SC= Concentrador solar; SH= Calefacción solar; SR= Recuperación solar; PV= Fotovoltaico; HR= Recuperación de calor; CLPHP= Tubo de calor pulsante de circuito cerrado; SCV= Colector solar de vacío.

2.2. Configuración del ciclo dentro del proceso HDH

Los sistemas de desalinización HDH se clasifican en función de la configuración o de los ciclos de funcionamiento (Mistry & Zubair, 2010). En la Figura 2 se muestran los diferentes ciclos de configuración. 1. En ambos, Figura 2. 1a y 2.1c, el agua residual que sale del humidificador se devuelve al mar. En el primer ciclo (Closed Air Open Water-CAOW), el aire se recircula dentro del sistema y el agua se desecha al final de su ciclo, aunque no sea extremadamente pura, Figura 1.1A.

El aire se mezcla con el agua salada en un intercambiador de calor y se separa para condensar posteriormente la humedad en agua dulce en el deshumidificador. En el segundo ciclo (Open Air Closed Water-OACW), se introduce aire en el sistema, mientras que el agua recircula, Figura 1.1B. El agua aumenta su salinidad a medida que se le extrae humedad. En el Cuadro 1, el caudal de agua recirculante a 70°C del sistema de desalinización es de 4 kg min⁻¹ (Fouda et al., 2020). El sistema funciona con energía solar y un calentador eléctrico de 9:00 a 17:00 h, proporcionando casi 40 litros/día; Esta producción puede triplicarse si el calentador eléctrico funciona continuamente. En el tercer ciclo (Open Air Open Water-OAOW), el agua y el aire que entran en el sistema HDH serán siempre sustituidos, Figura 1.1C. El agua producida en Egipto (Lawal et al., 2018) con este tipo de planta supone 123 Lh⁻¹, utilizando hasta 150 m² de colector solar. En el cuarto ciclo (Aire Cerrado Agua Cerrada-CACW) el agua y el aire se recirculan hasta que el proceso de desalinización alcanza su consigna de producción, Figura 1.1D. La eficiencia del HDH puede mejorarse aún más mediante el calentamiento del agua, del aire o de ambos. Cuatro de los sistemas HDH seleccionados utilizan este tipo de CACW (Cuadro 1). En el sistema de HDH de Arabia Saudí (Lawal et al., 2020), el agua recirculante a 40°C y el caudal de aire son de 2 Lmin⁻¹ y 0.055 kg s⁻¹, respectivamente, Cuadro 1. A medida que aumenta el caudal de agua, se obtiene una mayor producción de agua.

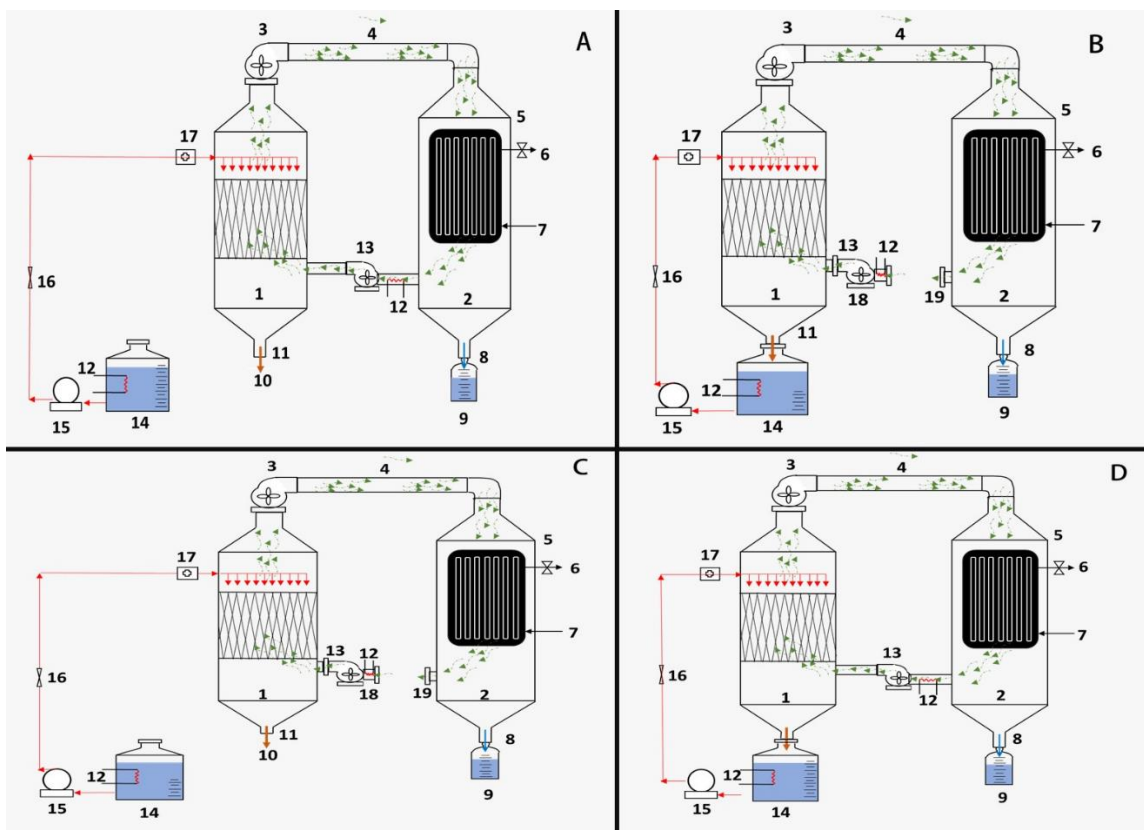


Figura 1. Configuración HDH: A = CAOW, B = OACW, C = OAOW, D = CACW, 1 = Humidificador, 2 = Deshumidificador, 3 = Soplador de aire, 4 = Flujo de aire, 5 = Intercambio de calor, 6 = Salida de flujo de refrigerante, 7 = Entrada de flujo de refrigerante, 8 = Salida de destilado, 9 = Tanque de agua destilada, 10 = Aguas residuales, 11 = Salida de salmuera, 12 = Calentador, 13 = Soplador de aire, 14 = Tanque de agua de mar, 15 = Bomba de agua, 16 = Válvula, 17 = Medidor de caudal, 18 = Entrada de aire, 19 = Salida de aire

2.3. Gestión y consumo de energía

Los sistemas HDH pueden producir agua pura con energía renovable (Garg et al., 2018). La energía que necesita el sistema de desalinización para calentar el aire y/o el agua debe ser respetuosa con el medio ambiente (Mohamed et al., 2021). Sin embargo, la energía térmica puede obtenerse quemando combustibles fósiles o energía nuclear (Hsu et al., 2015). La energía utilizada por los sistemas de desalinización HDH puede clasificarse como térmica, solar y/o híbrida. La energía híbrida combina más de una fuente de energía para maximizar el rendimiento del sistema y minimizar el coste (Mahmoud et al., 2018, Wu et al.,

2017). La energía solar puede utilizar paneles fotovoltaicos, colectores o estanques solares. El colector solar es el elemento principal del sistema de desalinización solar que proporciona un intercambiador de calor especial y puede incluir el colector de tubos de vacío (ETC) (Khalil et al., 2015), el colector parabólico compuesto (CPC) (Xuening et al., 2015) y el colector de placa plana (FPC) (Tabrizi et al., 2016). Entre las subcategorías de energía solar se incluyen la energía fotovoltaica/térmica de residuos (Anand & Murugavelh, 2022), los refrigeradores solares y las bombas de calor (Anand et al., 2023) y las centrales térmicas (Nezhad et al., 2022). Con las tecnologías solares, la productividad del agua se ve afectada por la intensidad solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento. La cantidad de agua producida aumenta con el tiempo de exposición a la energía solar, siendo máxima alrededor del mediodía solar (Tabrizi et al., 2016).

2.4. Clasificación del HDH en función del sistema de calefacción

Los HDH pueden clasificarse en tres grupos principales en función del tipo de sistema de calefacción utilizado: el sistema de calefacción por aire, el sistema de calefacción por agua y el sistema de calefacción dual. Para mejorar la productividad de los sistemas HDH, el aire, el agua o ambos se calientan antes de entrar en el humidificador. Se utilizan diversas fuentes de energía (convencionales o renovables) para calentar el aire o el agua en los sistemas de desalinización HDH. Una vez que el aire se calienta, la temperatura del aire aumenta mientras que la humedad relativa disminuye. La capacidad de transportar más vapor de agua aumenta, produciendo una mayor cantidad de agua pura. El sistema de calentamiento del agua se utiliza para elevar la temperatura del agua, aumentando la cantidad de vapor durante el proceso de humidificación y produciendo una mayor cantidad de agua pura. El sistema de calentamiento dual combina los sistemas de calentamiento de aire y agua, lo que aumenta la cantidad de vapor de agua generada en el humidificador, mejorando así la productividad del sistema. En realidad, como la versatilidad de las fuentes de energía es mayor, estos sistemas de calefacción tienen mejor productividad

de agua dulce que los sistemas de calefacción individuales. Los requisitos energéticos y los costes económicos varían en función del tipo de agua de alimentación, la configuración utilizada, las temperaturas del sistema y el caudal másico de agua. Las tecnologías de tipo CACW requieren un menor calentamiento del fluido, ya que la recirculación permite ahorrar calor y energía. El proceso aumenta la productividad del 20 al 88%, junto con unos costes de inversión más bajos (Faizan et al., 2022). Se ha investigado poco sobre los ciclos de doble calentamiento, en los que el aire y el agua se calientan al mismo tiempo. Se produce el máximo de agua con la misma eficiencia de calentamiento cuando existe una relación óptima entre el caudal másico de agua y el de aire (Lawal et al., 2021). Los caudales másicos de aire y agua deben optimizarse para mejorar la productividad del agua (Hermosillo et al., 2012). La mejora de la productividad del sistema HDH puede analizarse mediante la generación de entropía específica dentro de cada componente del ciclo. La irreversibilidad dentro del humidificador es relativamente baja y se aproxima a cero (Lawal et al., 2021), por lo que su eficacia oscila entre el 72-100%. Así pues, las mejoras se centran en el deshumidificador, el calentador de aire y el calentador de agua. Por lo tanto, para mejorar el rendimiento global del sistema, la eficacia del deshumidificador es realmente importante (Lawal et al., 2021). Un estudio experimental realizado por Alrbai et al. (2022) probó la técnica de boquillas de nebulización siendo evaluada positivamente al reducir la destrucción de exergía del proceso de desalinización. Se obtuvo un valor máximo de GOR de 3.4 y una generación mínima de entropía específica de 0.235 a una relación de velocidad de flujo másico de 0.78. El uso de la boquilla de nebulización aumenta la energía recuperada de la salida de agua dulce del humidificador. Una planta común utiliza varias bombas en el proceso (Zhang et al., 2018). Se utilizan dos bombas centrífugas (0.8 kW) en el bucle de agua de refrigeración y en el bucle de agua fría. Otra bomba magnética de plástico (0.55 kW) transporta agua de mar a las toberas. Un ventilador más pequeño de 0.15 kW impulsa el flujo de aire dentro del sistema, y un controlador de temperatura PID enciende una barra calefactora eléctrica de 3 kW para calentar el flujo de aire hasta un valor deseado. La temperatura del agua de mar

a la entrada del deshumidificador de la primera etapa (TW1) también se controla mediante un controlador de temperatura PID. Con un aumento de TW1, la productividad del agua dulce después de la primera etapa disminuye ligeramente. Con el primer deshumidificador se obtiene un total de 5.1 kg/h, y con dos deshumidificadores se puede obtener un total de 20 kg/h.

2.5. Tratamiento del agua en los huertos domésticos

Los huertos familiares rurales incluyen árboles, cultivos y animales que viven cerca de la familia; los animales ocupan pequeños espacios y se ubican en las inmediaciones de las viviendas (Cano Contreras, 2015). La superficie de las parcelas rurales varía entre 100 m² y media hectárea, siendo las necesidades de agua de 1000 Lt día⁻¹ (Díaz Heyser, 2020). En la Figura 2 se muestra una bomba de calor para la eliminación de sales en el agua. Este sistema puede utilizarse en comunidades cercanas al mar o en ciudades municipales donde las aguas residuales pueden ser tratadas (Díaz Heyser, 2020). El sistema de bomba de calor consta de un compresor, un condensador, un evaporador y una válvula de expansión, que se incluyen en la ventana verde de la Figura 2.

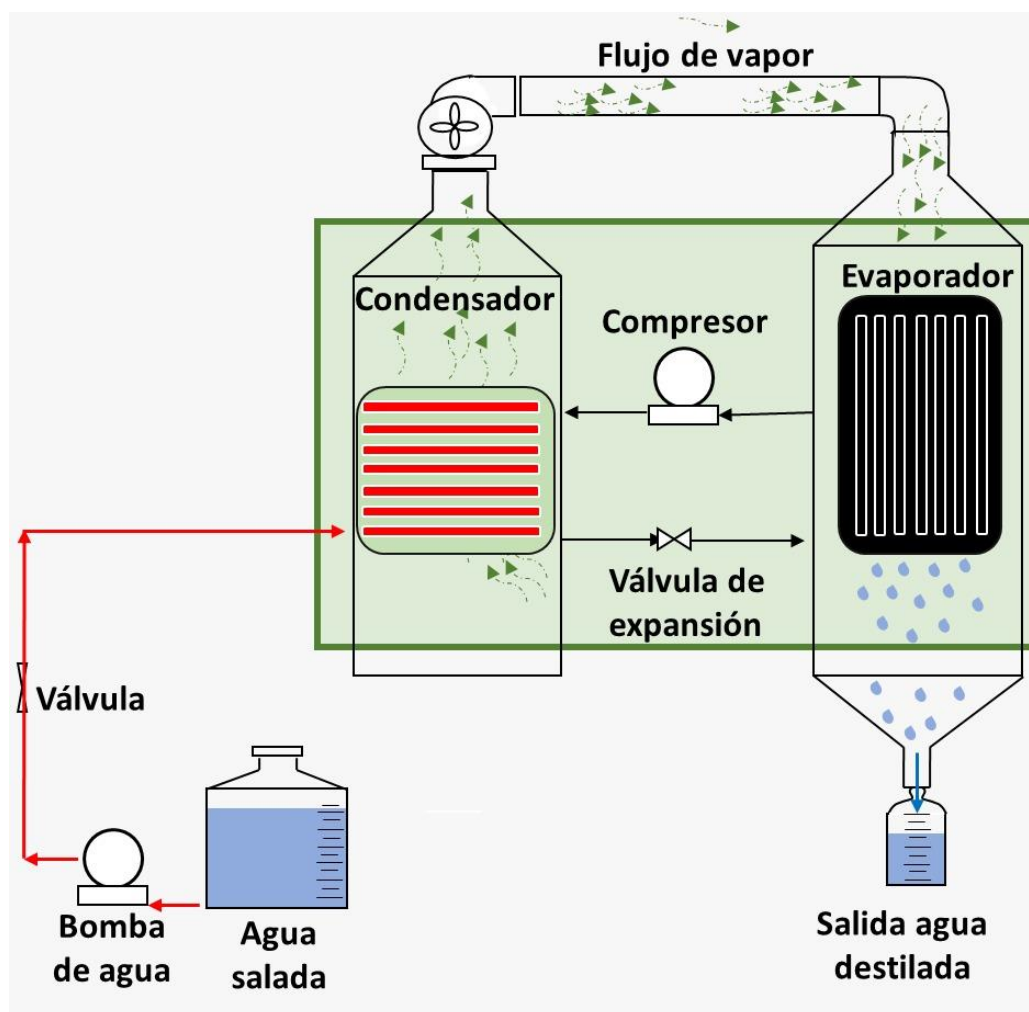


Figura 2. Sistema HDH con bomba de calor para edificio urbano.

La fuente de calor de la bomba solar es el vapor de condensación del refrigerante R134A y alcanza los 90°C. El sistema de desalinización del agua consta de un humidificador, un deshumidificador, bombas y un ventilador. El proceso comienza con la alimentación de agua de mar al condensador de la bomba de calor, donde se calienta el agua entrante y se genera vapor. El vapor de agua se recoge y se condensa, liberando agua dulce como producto final (Díaz Heyser, 2020). El agua destilada se descarga en un recipiente y las sales se descargan de la bomba de calor para completar el ciclo de desalinización. El proceso de desalinización por ósmosis inversa comienza con un depósito de agua salada, Figura 3. El agua salada se bombea a través de una serie de filtros que eliminan las partículas grandes y los contaminantes para garantizar la calidad del agua. A continuación,

el agua filtrada se bombea a través de una membrana de separación, que separa el agua salada (salmuera) del agua dulce. La salmuera se recoge en un depósito receptor de salmuera, mientras que el agua dulce se bombea a un depósito de almacenamiento de agua dulce. Esta agua dulce puede utilizarse para diversos usos, como el riego, la producción de alimentos, el suministro de agua potable, etc. La energía para hacer funcionar esta planta es solar, lo que la hace más eficiente y respetuosa con el medio ambiente. La energía solar se recoge mediante paneles solares, que luego se almacenan en baterías para su uso posterior. Estas baterías suministran electricidad a los sistemas de bombeo y filtrado, necesarios para el funcionamiento de la desaladora. La filtración por ósmosis inversa puede ser una opción para las zonas rurales, ya que hay más espacio para instalar 28 m² de paneles solares fotovoltaicos (Cuadro 2). Los huertos urbanos en terrazas se instalan en la parte superior de la casa y su superficie media es de 50 m² y, como el espacio es reducido, resulta más práctica una bomba de calor, Figura 2. En los huertos urbanos se utiliza agua residual reciclada como agua de entrada. El agua se limpia y se utiliza para las necesidades humanas, mientras que las aguas residuales pueden aplicarse a las hortalizas (Cano Contreras, 2015).

Cuadro 2. Comparación del tamaño y la energía de los sistemas modernos de desalinización

	Ósmosis Inversa	Bomba de calor
Energía	10 kWh	11 kW
Paneles solares	28 m ²	
Longitud	1 m	1 m
Ancho	1 m	0,5 m
Altura	1 m	1 m

Los huertos familiares rurales incluyen árboles, cultivos y animales que viven cerca de la familia; los animales ocupan espacios pequeños y se sitúan en las proximidades de las casas (Cano Contreras, 2015). La superficie de las parcelas rurales varía entre 100 m² y media hectárea. Las necesidades de agua se consideran de 1000 L d⁻¹ (Díaz Heyser, 2020). Los huertos urbanos en terrazas se instalan en la parte superior de la casa y su superficie media es de 50 m² y

como el espacio es pequeño resulta más práctica una bomba de calor, Figura 2. En los huertos urbanos se utilizan aguas negras recicladas como agua de entrada. El agua se limpia y se utiliza para las necesidades humanas, mientras que las aguas residuales pueden aplicarse a las hortalizas (Cano Contreras, 2015). El uso de agua de riego salina durante el crecimiento de la lechuga en Corea del Sur aumentó el nivel de salinidad en el suelo, afectando al crecimiento y rendimiento de la lechuga. La desalinización se presenta como una alternativa a la escasez de agua en determinadas zonas. El uso de agua desalinizada en el riego y la fertirrigación son esenciales para la producción agrícola y han demostrado que la fertirrigación tiene numerosos beneficios en comparación con la aplicación de fertilizantes y agua por separado (Díaz Heyser, 2020). La filtración por ósmosis inversa puede ser una opción para las zonas rurales, ya que hay más espacio para instalar 28 m² de PV solar, Cuadro 2 y Figura 3.

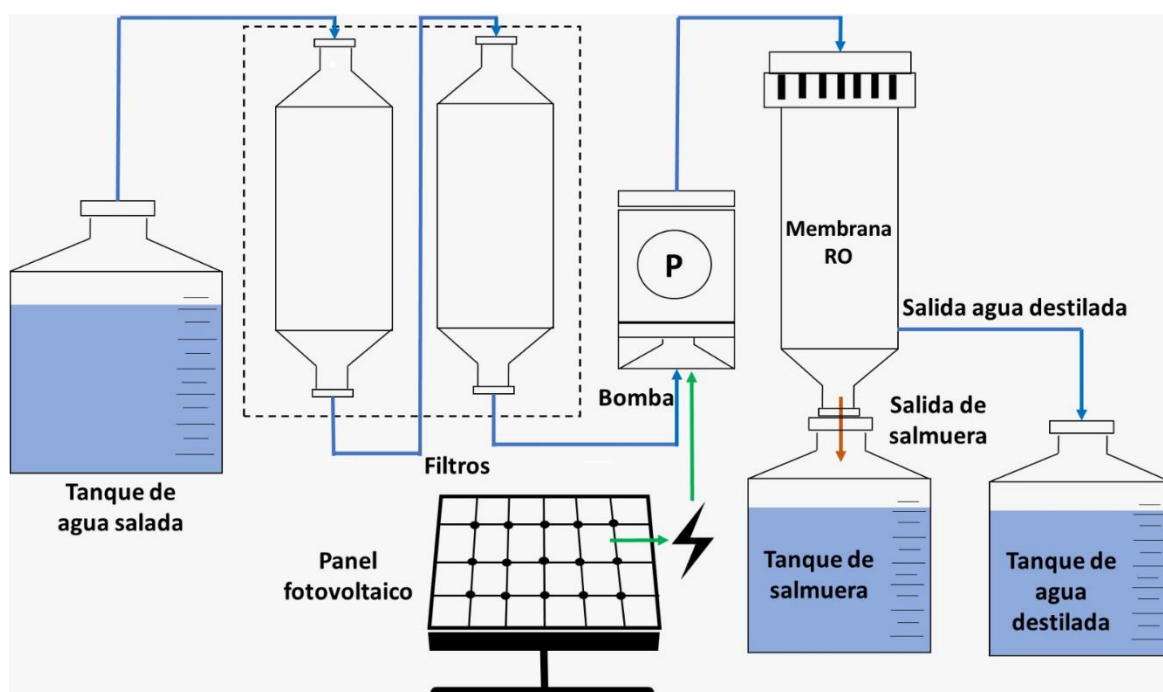


Figura 3. Tratamiento del agua mediante ósmosis inversa

2.6. Discusión

El estrés hídrico de la Ciudad de México aumenta debido a la rápida urbanización y al efecto de fenómenos meteorológicos extremos. El suministro de agua depende de las aguas subterráneas y de fuentes externas (Chen, 2022). Un estudio realizado en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México mostró que el aluminio, el amoníaco, el hierro y el manganeso excedían los estándares normales, mientras que el arsénico, el boro y el cromo se encontraron en algunas áreas (Mazari-Hiriart et al., 2019). En la ciudad el agua utilizada para las necesidades humanas y la producción de hortalizas será la que se recicle de las aguas residuales domiciliarias. El uso de agua de riego salina durante el crecimiento de la lechuga en Corea del Sur aumentó el nivel de salinidad en el suelo afectando al crecimiento y rendimiento de la lechuga (Awaad et al., 2020). La desalinización se presenta como una alternativa a la escasez de agua en determinadas zonas. El uso de agua desalinizada en el riego y la fertirrigación son esenciales para la producción agrícola demostrando que la fertirrigación tiene numerosos beneficios en comparación con la aplicación de fertilizantes y agua por separado (Awaad et al., 2020; Toze, 2006). En la Cuadro 2 se comparan la ósmosis inversa y la HDH con bomba de calor comprobando su tamaño para un consumo energético similar. Esto es importante ya que la diferencia entre ambas es el tipo de energía utilizada. Se necesita agua muy limpia para el consumo humano y animal, pero los filtros pueden ayudar a eliminar algunas sales especiales y peligrosas. Otras sales pueden utilizarse dentro del huerto en terraza, donde el suelo actúa como tampón filtrando algunas sales y evitando la contaminación vegetal. Los sensores aplicados al suelo y a los vegetales medirán el pH, la CE, el Cu, el Ca y el Mg. Un estudio ha demostrado que el aumento de los niveles de tratamiento de las aguas residuales, como la descontaminación, la desinfección y el tratamiento biológico, tiene una correlación directa con la disminución de los riesgos para el medio ambiente y la salud humana (Vo et al., 2014).

2.7. Conclusión

Esta revisión concluye que los huertos familiares pueden obtener el agua tratada que necesitan diariamente y empezar a producir sus propios alimentos. El agua puede utilizarse para sus necesidades e incluso el agua reutilizada puede aplicarse como abono para el crecimiento de mejores cultivos. Las bombas de calor son muy interesantes, ya que pueden funcionar todo el día y no requieren demasiado espacio. Aunque la ósmosis inversa es cada vez más barata, el sistema requiere más mantenimiento, ya que las sales obstruyen los filtros.

2.8. Referencias

- Abdelkader, B. A., Khan, M., Antar, M. A., & Khalifa, A. E. (2020). Performance of bubble column humidification-dehumidification (HDH) desalination system. *Desalination and Water Treatment*, 181, 101–112.
- Abdelkader, B. A., Khan, M., Antar, M. A., & Khalifa, A. E. (2020). Performance of bubble column humidification-dehumidification (HDH) desalination system. *Desalination and Water Treatment*, 181, 101–112.
- Alrbai, M., Enizat, J., Hayajneh, H., Qawasmeh, B., & Al-Dahidi, S. (2022). Energy and exergy analysis of a novel humidification-dehumidification desalination system with fogging technique. *Desalination*, 522, 115421.
- Anand, B., & Murugavelh, S. (2022). A hybrid system for power, desalination, and cooling using concentrated photovoltaic/thermal collector. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(1), 1416–1436.
- Anand, B., Shankar, R., Jiménez-García, J. C., & Rivera, W. (2023). A dual-mode system for water purification and cooling using a thermal desalination technique coupled to a heat pump unit. *Applied Thermal Engineering*, 224, 120096.
- Aref, L., Fallahzadeh, R., & Avargani, V. M. (2021). An experimental investigation on a portable bubble basin humidification/dehumidification desalination unit utilizing a closed-loop pulsating heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 228, 113694.
- Awaad, H. A., Mansour, E., Akrami, M., Fath, H. E., Javadi, A. A., & Negm, A. (2020). Availability and feasibility of water desalination as a non-conventional resource for agricultural irrigation in the MENA region: A review. *Sustainability*, 12(18), 7592.
- Cano Contreras, E. J. (2015). Huertos familiares: un camino hacia la soberanía alimentaria. *Revista Pueblos y Fronteras Digital*, 10(20), 70–91.
- Chen, Y. (2022). Water sustainability challenges, peri-urbanization, and community-based water systems: A reflective commentary on the metropolitan area of Mexico City. *Frontiers in Sustainable Cities*, 51.
- Dayem, A. A., & AlZahrani, A. (2022). Psychometric study and performance investigation of an efficient evaporative solar HDH water desalination system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102030.
- Díaz Heyser, L. L. (2020). Conceptual design of a seawater desalination system using a heat pump. *Ciencia y Tecnología de Buques*, 13(26), 29–38.
- Faizan, M., Toor, Z., & Antar, M. A. (2022). Optimization of two-stage modified air heated HDH desalination systems. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(12), 16451–16473.
- Fouda, A., Nada, S. A., Bin Mahfouz, A. S., Al-Zahrani, A., & Elattar, H. F. (2020). Augmentation of solar-assisted humidification-dehumidification water desalination system using heat recovery and thermal energy storage system. *International Journal of Energy Research*, 44(8), 6631–6650.
- Fouda, A., Nada, S. A., Bin Mahfouz, A. S., Al-Zahrani, A., & Elattar, H. F. (2020). Augmentation of solar-assisted humidification-dehumidification water

- desalination system using heat recovery and thermal energy storage system. *International Journal of Energy Research*, 44(8), 6631–6650.
- Garg, K., Das, S. K., & Tyagi, H. (2022). Thermal design of a humidification-dehumidification desalination cycle consisting of packed-bed humidifier and finned-tube dehumidifier. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 183, 122153.
- Garg, K., Khullar, V., Das, S. K., & Tyagi, H. (2018, November). Numerical study of nanofluid-based solar collector for humidification-dehumidification (HDH) desalination. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 52088, p. V06BT08A032). American Society of Mechanical Engineers.
- Hermosillo, J. J., Arancibia-Bulnes, C. A., & Estrada, C. A. (2012). Water desalination by air humidification: Mathematical model and experimental study. *Solar Energy*, 86(4), 1070–1076.
- Hsu, S. H., Ho, Y. H., Ho, M. X., Wang, J. C., & Pan, C. (2015). On the formation of vapor film during quenching in de-ionized water and elimination of film boiling during quenching in natural sea water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 65–71.
- Jones, E., Qadir, M., Van Vliet, M. T., Smakhtin, V., & Kang, S. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343–1356.
- Jones, E., Qadir, M., Van Vliet, M. T., Smakhtin, V., & Kang, S. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343–1356.
- Khalil, A., El-Agouz, S. A., El-Samadony, Y. A. F., & Abdo, A. (2015). Solar water desalination using an air bubble column humidifier. *Desalination*, 372, 7–16.
- Khraisheh, M., Inamdar, M., AlMomani, F., & Adham, S. (2022). Humidification–dehumidification (HDH) desalination and other volume reduction techniques for produced water treatment. *Water*, 14(1), 60.
- Lawal, D., Abdul, J. S., Sharqawy, M. H., & Antar, M. A. (2021). Energy and entropy analyses of a pilot-scale dual heating HDH desalination system. *Entropy*, 23(10), 1282.
- Lawal, D., Antar, M., Khalifa, A., Zubair, S., & Al-Sulaiman, F. (2018). Humidification-dehumidification desalination system operated by a heat pump. *Energy Conversion and Management*, 161, 128–140.
- Mahmoud, A., Fath, H., & Ahmed, M. (2018). Enhancing the performance of a solar driven hybrid solar still/humidification-dehumidification desalination system integrated with solar concentrator and photovoltaic panels. *Desalination*, 430, 165–179.
- Mahmoud, A., Fath, H., Ookwara, S., & Ahmed, M. (2019). Influence of partial solar energy storage and solar concentration ratio on the productivity of integrated solar still/humidification-dehumidification desalination systems. *Desalination*, 467, 29–42.
- Mazari-Hiriart, M., Tapia-Palacios, M. A., Zarco-Arista, A. E., & Espinosa-García, A. C. (2019). Challenges and opportunities on urban water quality in Mexico City. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 169.

- Mistry, K. H., & Zubair, S. M. (2010). Effect of entropy generation on the performance of humidification-dehumidification desalination cycles. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(9), 1837–1847.
- Mohamed, A. S. A., Ahmed, M. S., Maghrabie, H. M., & Shahdy, A. G. (2021). Desalination process using humidification–dehumidification technique: A detailed review. *International Journal of Energy Research*, 45(3), 3698–3749.
- Mohamed, A. S. A., Shahdy, A. G., & Ahmed, M. S. (2021). A comparative study of open and closed-air cycles for desalination system using the humidification–dehumidification method. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 7(11), 2089–2105.
- Nezhad, Q. A., Jafarmadar, S., & Khalilarya, S. (2022). A novel solar-driven power/desalination system based on a liquid metal magnetohydrodynamic unit. *Thermal Science and Engineering Progress*, 28, 101043.
- Rahimi-Ahar, Z., Hatamipour, M. S., & Ghalavand, Y. (2018). Experimental investigation of a solar vacuum humidification-dehumidification (VHDH) desalination system. *Desalination*, 437, 73–80.
- Rostamzadeh, H., Namin, A. S., Nourani, P., Amidpour, M., & Ghaebi, H. (2019). Feasibility investigation of a humidification-dehumidification (HDH) desalination system with thermoelectric generator operated by a salinity-gradient solar pond. *Desalination*, 462, 1–18.
- Santosh, R., Lee, H. S., Ji, H., & Kim, Y. D. (2023). Effect of thermal characteristics on the chemical quality of real-brine treatment through hydrophilic fiber-based low-grade heat-powered humidification-dehumidification process. *Water Research*, 119771.
- Tabrizi, F. F., Khosravi, M., & Sani, I. S. (2016). Experimental study of a cascade solar still coupled with a humidification–dehumidification system. *Energy Conversion and Management*, 115, 80–88.
- Toze, S. (2006). Reuse of effluent water—benefits and risks. *Agricultural Water Management*, 80(1-3), 147–159.
- Vo, P. T., Ngo, H. H., Guo, W., Zhou, J. L., Nguyen, P. D., Listowski, A., & Wang, X. C. (2014). A mini-review on the impacts of climate change on wastewater reclamation and reuse. *Science of the Total Environment*, 494, 9–17.
- Wu, G., Kutlu, C., Zheng, H., Su, Y., & Cui, D. (2017). A study on the maximum gained output ratio of single-effect solar humidification-dehumidification desalination. *Solar Energy*, 157, 1–9.
- Xuening, F., Lei, C., Yuman, D., Min, J., & Jinping, F. (2015). CFD modeling and analysis of brine spray evaporation system integrated with solar collector. *Desalination*, 366, 139–145.
- Zhang, Y., Zhu, C., Zhang, H., Zheng, W., You, S., & Zhen, Y. (2018). Experimental study of a humidification-dehumidification desalination system with heat pump unit. *Desalination*, 442, 108–117.

3 ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DEL SISTEMA DE DESALINIZACIÓN POR HUMIDIFICACIÓN- DESHUMIDIFICACIÓN: TENDENCIAS Y OPORTUNIDADES.

Resumen

La creciente escasez de agua, impulsada por el aumento poblacional y la industrialización, amenaza con afectar a dos tercios de la población mundial para 2030. La desalinización, es una solución que convierte el agua salina en agua potable, con un menor consumo energético y bajo impacto ambiental. Dentro de las tecnologías de desalinización, el sistema de humidificación deshumidificación (HDH) tiene un atractivo potencial en eficiencia y buena aplicabilidad en regiones con recursos hídricos limitados. El objetivo de este estudio fue realizar un análisis bibliométrico para mostrar el desarrollo y las tendencias de los artículos científicos publicados sobre sistemas HDH durante el período comprendido entre 2000 y 2023, donde se analizaron las tendencias, autores y temáticas investigadas. Se utilizó una metodología descriptiva de PRISMA. De ello, se observó un incremento significativo en la publicación de artículos, alcanzando su punto máximo en 2022, con una mayoría de artículos en áreas de ingeniería y ciencias ambientales. Además, se discuten las búsquedas de términos clave (air bubble, spray evaporation, exergy, y cooling, reflejando un interés creciente en mejorar la eficiencia energética y la capacidad de producción de agua destilada. Además, el análisis de colaboración dio un enfoque multidisciplinario e internacional. El estudio resalta las tendencias y oportunidades para investigaciones futuras en HDH, como la combinación de tecnologías avanzadas de optimización y el desarrollo de sistemas adaptables a condiciones específicas. La tecnología HDH es una herramienta para enfrentar la crisis global de agua, contribuyendo a los avances significativos hacia la sostenibilidad.

Palabras clave: Desalinización, Escasez de agua, Eficiencia energética, Humidificación-deshumidificación (HDH), Tecnología sostenible.

Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: M.C. Jesús Antonio García Martínez.

Director de tesis: Dr. Salvador Valle Guadarrama.

BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF THE HUMIDIFICATION- DEHUMIDIFICATION DESALINATION SYSTEM: TRENDS AND OPPORTUNITIES

Abstract

Growing water scarcity, driven by population growth and industrialisation, threatens to affect two-thirds of the world's population by 2030. Desalination is a solution that converts saline water into drinking water, with lower energy consumption and low environmental impact. Within desalination technologies, the dehumidification humidification system (HDH) has an attractive potential in efficiency and good applicability in regions with limited water resources. The objective of this study was to perform a bibliometric analysis to show the development and trends of scientific articles published on HDH systems during the period from 2000 to 2023, where trends, authors and research topics were analysed. A descriptive PRISMA methodology was used. From this, a significant increase in article publication was observed, peaking in 2022, with a majority of articles in the areas of engineering and environmental sciences. In addition, searches for key terms (air bubble, spray evaporation, exergy, and cooling) are discussed, reflecting a growing interest in improving energy efficiency and distilled water production capacity. In addition, the collaborative analysis gave a multidisciplinary and international focus. The study highlights trends and opportunities for future research in HDH, such as the combination of advanced optimisation technologies and the development of systems adaptable to specific conditions. HDH technology is a tool to address the global water crisis, contributing to significant advances towards sustainability.

Key words: Desalination, Water scarcity, Energy efficiency, Humidification-dehumidification (HDH), Sustainable technology.

Doctoral Thesis. Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua,
Universidad Autónoma Chapingo.

Author: M.C. Jesús Antonio García Martínez.

Thesis Director: Dr. Salvador Valle Guadarrama.

3.1 Introducción

La disponibilidad de agua dulce es cada vez más limitada debido al crecimiento poblacional y la distribución desigual de los recursos hídricos. A nivel mundial, se estima que para 2030 dos tercios de la población enfrentará escasez de agua. En México, esta situación es particularmente crítica, ya que el 70% del recurso hídrico se encuentra en el sur, mientras que las zonas norte y centro, donde vive la mayoría de la población, sufren una grave escasez (Luna & Grieger, 2015). Según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), cerca de 15 millones de mexicanos carecen de acceso a agua potable, y las proyecciones mostraron que la demanda podría superar la oferta en los próximos años sin una mejor gestión hídrica (Conagua, 2018). Por lo tanto, es imperativo abordar con urgencia los desafíos críticos relacionados con la escasez de agua para asegurar un desarrollo sostenible y estable, protegiendo tanto la salud humana como los ecosistemas, y promoviendo el progreso socioeconómico en los países. Ante esta crisis, la desalinización ofrece una solución viable para obtener agua potable de fuentes salinas, especialmente en regiones costeras y áridas (Martínez-Granados et al., 2022). La tecnología de humidificación-deshumidificación (HDH) destaca entre las opciones de desalinización por su capacidad de operar con energía renovable y adaptarse a distintas escalas, facilitando la extracción de agua potable del agua de mar de forma sostenible (Lu et al., 2022). Este enfoque puede ser clave para mejorar la seguridad hídrica en México y en otros países con alto riesgo de escasez.

Entre las diversas tecnologías de desalinización, el sistema HDH es una opción prometedora y sostenible debido a su eficiencia en el proceso de eliminación de sal del agua mediante transferencia de calor y masa (Ifras Zubair et al., 2020). A diferencia de las tecnologías de desalinización física, química o biológica, el sistema HDH es relativamente sencillo, de bajo costo y altamente adaptable a condiciones locales, lo cual lo hace ideal para su aplicación en áreas con limitaciones de recursos hídricos y económicos (Santosh et al., 2022). Los sistemas avanzados de HDH han demostrado tasas de recuperación de agua

superiores al 50% mediante innovadores métodos de reciclaje de salmuera (Capocelli et al., 2018). En términos de eficiencia energética, estudios sobre sistemas HDH integrados con refrigeración por absorción y energía solar muestran una eficiencia destacable, logrando producir agua a una tasa de 0.58 m³/h y refrigeración de 28 t/h. Este sistema alcanzó costos de producción competitivos de 2.88 USD /m³ de agua y 0.135 USD /ton de refrigeración en condiciones de alta radiación solar (Baniasad Askari & Shahsavari, 2022). Además, el agua obtenida mediante ósmosis inversa, aunque presenta un costo elevado de 0.2284 €/m³, sigue siendo una opción viable y rentable para la agricultura en comparación con otras fuentes. En la práctica, el agua de ósmosis inversa permite obtener un beneficio anual de 12,268 €, superando el beneficio obtenido con agua superficial (11,152 €) y significativamente mayor al logrado con agua salobre de pozos (3,634 €). Este beneficio se debe a la alta producción que posibilita el uso de agua de alta calidad, lo cual compensa el mayor gasto inicial, demostrando su valor en sistemas de producción agrícola intensiva (Zarzo et al., 2013). Aunque el agua obtenida mediante ósmosis inversa resulta ser una alternativa viable y rentable para la agricultura, especialmente en cultivos de alto valor, el elevado costo de producción limita su aplicación a largo plazo en regiones con restricciones presupuestarias. En este contexto, los sistemas de humidificación-deshumidificación (HDH) emergen como una alternativa prometedora para la producción de agua en áreas agrícolas. Estas características no solo promueven su implementación en comunidades rurales y áreas costeras, sino que también respaldan su integración con fuentes de energía renovable, haciendo del sistema HDH una alternativa eficiente, económica y sostenible en la producción de agua potable en entornos con recursos limitados (Elsafi, 2017).

Aunque existen numerosas revisiones sobre la tecnología HDH, se percibe una falta de comprensión integral sobre las tendencias de investigación y las colaboraciones en este campo (Elsaid et al., 2020; López-Serrano et al., 2020; Mancuso et al., 2019; Martínez-alvarez et al., 2016). Las revisiones anteriores han abordado aspectos técnicos de HDH, pero aún falta un análisis exhaustivo

de los patrones de publicación, las contribuciones geográficas y el impacto de la colaboración internacional. Los avances recientes se han centrado en optimizar la transferencia de calor y masa, un aspecto crítico que permite mejorar la baja eficiencia de los sistemas HDH tradicionales (He et al., 2018a). Además, la integración con tecnologías como la energía solar y los sistemas en varias etapas ha demostrado aumentar el rendimiento y reducir costos operativos (Ortega-delgado & Palenzuela, 2022). Si bien estas innovaciones prometen una mejora en la eficiencia y un menor impacto ambiental, la tecnología HDH aún enfrenta desafíos en la gestión de la salmuera y la optimización del consumo energético (Wu et al., 2019). Estos factores refuerzan la necesidad de un análisis bibliométrico que identifique las tendencias emergentes y las áreas de investigación en HDH que necesitan mayor desarrollo.

El objetivo de este trabajo fue realizar un análisis bibliométrico de la literatura científica sobre la desalinización de HDH a nivel mundial, con el fin de identificar la evolución de las publicaciones, las colaboraciones internacionales, así como las contribuciones científicas. Se analizó la evolución de las publicaciones por año, así como identificar patrones de las tendencias emergentes, los países que lideran las contribuciones a la investigación, los avances recientes y las principales brechas de conocimiento en la desalinización por HDH.

3.2 Metodología

La metodología aplicada es de tipo descriptivo con enfoque cualitativo. Se tomó de base el diseño metodológico sugerido por Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses – PRISMA (Liberati et al., 2009; Urrútia & Bonfill, 2010). El diseño metodológico utilizado tiene una metodología descriptiva con enfoque cualitativo de 5 etapas, la primera se basa en la recopilación bibliográfica, la segunda etapa en la búsqueda de palabras clave que más describan el objeto de estudio, la tercera etapa hace un filtrado de publicaciones que se encuentren en el área temática de interés, la cuarta etapa consta de un análisis bibliométrico y la última corresponde a la discusión de los datos encontrados. Para el procesamiento de la información se utilizó la librería

de bibliometrix, perteneciente al software RStudio (RStudio, 2022). La bibliometría ofrece un conjunto de métodos cuantitativos que permiten analizar la literatura científica y tecnológica de forma sistemática, facilitando la identificación de tendencias de investigación, así como las contribuciones de diferentes países, instituciones y académicos en el campo.

3.2.1 Estrategia d búsqueda bibliográfica

Como estrategia de búsqueda bibliográfica, se determinó Scopus como la base de datos más idónea. Esto en función de las fuentes de referencias académicas y citas más reconocidas y confiables para estudios revisados por pares. La selección de Scopus se debe a su amplia cobertura de publicaciones científicas de alto impacto, lo cual permitió examinar las tendencias actuales en desalinización HDH de forma detallada. Los criterios de inclusión y de exclusión de búsqueda, se plantearon de acuerdo con los establecidos por PRISMA. Estos criterios se pueden observar en la Cuadro 1.

Cuadro 1 Criterios de inclusión y exclusión según metodología PRISMA

Tipo	Criterio
Inclusión	Estudios académicos y comerciales enfocados en la desalinización mediante sistemas de humidificación-deshumidificación (HDH). Investigación que explore mejoras en eficiencia energética y sostenibilidad en sistemas HDH Artículos que incluyan términos como "desalinización", "HDH", "energía renovable" y "transferencia de calor y masa" Publicaciones desde la aparición de HDH hasta el 19 de julio del 2023. Estudios que analicen aplicaciones prácticas de HDH en zonas áridas y con escasez de agua.
Exclusión	Estudios centrados en técnicas de desalinización distintas de HDH (p. ej., osmosis inversa). Artículos que no aborden el impacto de HDH en la eficiencia energética, costo operativo o sostenibilidad. Publicaciones sin revisión por pares o que carezcan de rigor metodológico.

Con los criterios de inclusión y exclusión, se creó la ecuación de búsqueda la búsqueda incluyó palabras clave en los títulos, resúmenes y términos clave de los artículos, como se muestra en la Tabla 2, generando inicialmente 1778 publicaciones para el análisis. Sin embargo, tras aplicar filtros progresivos

basados en la relevancia temática, el análisis se centró en publicaciones que abordaban exclusivamente la desalinización mediante HDH, resultando en 632 artículos. Se aplicaron refinamientos adicionales que incluyeron términos específicos como "water filtration" y "spray evaporation", reduciendo la muestra a 163 publicaciones. Finalmente, al restringir la búsqueda a estudios enfocados en "generadores" y "salmuera", el conjunto final se limitó a 52 artículos que abordan de manera integral las aplicaciones actuales de HDH en la desalinización.

Cuadro 2 Combinaciones de palabras clave empleadas y los resultados obtenidos en cada etapa de filtrado, de acuerdo con la consulta realizada en Scopus (consultado el 19 de julio de 2023).

Grupo de palabras	combinación de Keyword	Resultados de la búsqueda
Desalination tratament	TITLE-ABS-KEY (desalination OR seawater) AND TITLE-ABS-KEY ("humidification dehumidification" OR bubble OR "Spray evaporation") AND NOT TITLE-ABS-KEY (soil OR membrane OR osmosis))	1778
Desalination HDH	(TITLE-ABS-KEY (desalination) AND TITLE-ABS-KEY ("humidification dehumidification") AND NOT TITLE-ABS-KEY (soil OR membrane OR osmosis))	632
Water filtration	(TITLE-ABS-KEY (desalination) AND TITLE-ABS-KEY ("humidification dehumidification") AND TITLE-ABS-KEY ("water filtration" OR "spray evaporation") AND NOT TITLE-ABS-KEY (soil OR membrane OR osmosis))	163
Brine Generator	(TITLE-ABS-KEY (desalination) AND TITLE-ABS-KEY ("humidification dehumidification") AND TITLE-ABS-KEY (brine OR generator) AND NOT TITLE-ABS-KEY (soil OR membrane OR osmosis))	52

El proceso metodológico seguido en este estudio se ilustra en la Figura 4, donde se describe cada etapa, desde la recopilación de datos en Scopus hasta el análisis de redes en R utilizando Bibliometrix. Este diagrama resume los pasos clave empleados para asegurar un análisis exhaustivo y coherente de las tendencias en desalinización mediante HDH.

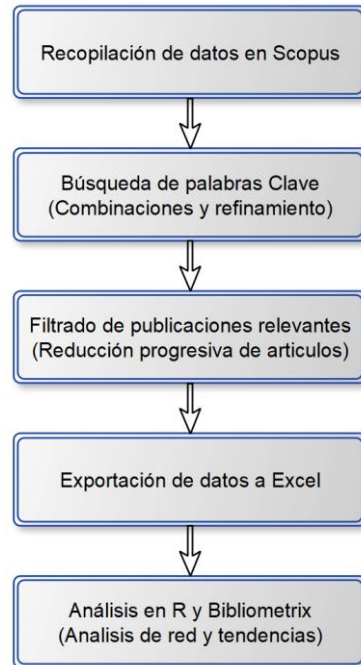


Figura 4 *Diagrama de flujo del proceso metodológico para el análisis bibliométrico sobre desalinización por HDH*

3.2.2 Preparación de datos

El propósito de esta actividad fue organizar los datos de manera que cumplieran con los requisitos del estudio, permitiendo su posterior procesamiento en la librería bibliometrix de RStudio. Para cumplir con los requisitos del estudio y facilitar el procesamiento en la librería bibliometrix de RStudio, se comenzó convirtiendo las bases de datos de las búsquedas a un formato compatible con RStudio. Esta herramienta proporciona métodos robustos para construir y visualizar redes bibliométricas, permitiendo un análisis exhaustivo de palabras clave, colaboraciones entre autores, y tendencias en la investigación de desalinización HDH. Los registros de SCOPUS, originalmente en formato .bib, se transformaron a .xlsx. Posteriormente, se eliminaron los registros duplicados presentes en ambas bases de datos, siguiendo las recomendaciones de la metodología PRISMA.

3.2.3 Análisis bibliométrico

En el análisis bibliométrico, se examinaron varios aspectos clave para entender la investigación sobre la desalinización mediante HDH. Utilizando la librería bibliometrix en RStudio, se analizaron varios aspectos de la literatura relacionada. En primer lugar, se clasificaron los documentos por tipo e idioma para identificar los formatos de publicación predominantes y el idioma en el que mayormente se publica. Se evaluaron también las tendencias de publicación anuales, lo cual permitió observar el crecimiento en el volumen de artículos sobre HDH a lo largo del tiempo. Para identificar los temas de tendencia, se analizaron las palabras clave de los artículos, destacando los términos con mayor frecuencia de uso en diferentes periodos, lo cual permitió detectar patrones en el desarrollo temático. A continuación, se examinó la producción científica por país y las colaboraciones internacionales, lo cual se realizó mediante el análisis de la afiliación de los autores, permitiendo identificar las principales contribuciones geográficas y los vínculos de coautoría entre países.

También se realizó un análisis de palabras clave emergentes, en el que se midió la frecuencia total de cada palabra clave en los artículos revisados, así como su aparición a lo largo del tiempo. Para analizar las relaciones temáticas, se generaron redes de palabras clave que visualizaron las conexiones entre términos, facilitando la identificación de núcleos temáticos. De manera similar, se realizó un análisis de la colaboración entre autores, representando las redes de coautoría para identificar a los investigadores y grupos más activos en el campo.

Asimismo, se identificaron las principales fuentes de publicación y la contribución de autores, ordenando las revistas y autores de acuerdo con la cantidad de publicaciones y el impacto de sus trabajos. Finalmente, se realizó un análisis de red para visualizar las relaciones entre palabras clave y colaboraciones, utilizando herramientas de visualización en RStudio que permitieron representar gráficamente estas interconexiones y obtener una visión estructurada de la investigación en HDH.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Tipos de documentos e idiomas

La distribución de los tipos de documentos en la investigación sobre desalinización mediante humidificación-deshumidificación (HDH) revela que la mayoría de las publicaciones corresponden a artículos científicos, representando una contribución significativa con 1448 documentos, lo que equivale al 81% del total. Este predominio de artículos es seguido por documentos de conferencias, que representan el 14% de las publicaciones con un total de 245 documentos. Otros tipos de publicaciones presentan contribuciones menores, entre los cuales se incluyen revisiones (34), capítulos de libros (26), notas (8), revisiones de conferencias (7), libros completos (4), cartas (4), encuestas breves (2), reportes de resúmenes (1) y editoriales (1). Dado el alto volumen de artículos científicos, estos se utilizaron como la principal fuente para el análisis posterior.

En cuanto al idioma de publicación, el inglés es claramente predominante, utilizado en 1683 documentos, lo que representa más del 94% del total de publicaciones. Otros idiomas tienen una participación considerablemente menor, siendo el chino el segundo idioma más utilizado con 59 publicaciones. Entre los demás idiomas, se publicaron documentos en japonés y ruso (7 cada uno), francés (6), alemán (3), coreano y portugués (2 cada uno), e italiano y turco (1 cada uno). Esta distribución sugiere que el inglés es el idioma principal de acceso en la literatura de HDH, facilitando la diseminación y accesibilidad de la investigación a nivel internacional.

3.3.2 Tendencias de publicación

El análisis de la productividad científica sobre desalinización mediante HDH muestra un crecimiento sostenido en la producción de artículos a partir del año 2000, con un aumento notable a partir de 2015, tendencia que es reportada por otros investigadores (AlMallahi et al., 2024). La Figura 5 está compuesta por dos subgráficos: el Figura 2 (a), que representa la "Average Citations per Year"

(promedio de citas por año), y el Figura 2 (b), que ilustra la "Annual Scientific Production" (producción científica anual).

En el *Figura 5(b)*, se observa que la cantidad de publicaciones pasó de un solo artículo en 1967 a un aumento significativo en 1994, con 18 publicaciones en ese año. A partir de 2000, el crecimiento en la producción científica es constante, con un incremento especialmente marcado desde 2015. Durante la última década, aproximadamente el 50% del total de publicaciones se concentró en los últimos cinco años, lo que indica un interés creciente en la tecnología HDH. Entre 2016 y 2020, el número de artículos aumentó un 84.28%, reflejando una tendencia al alza en la investigación de HDH, hasta alcanzar su punto máximo en 2022, con 165 publicaciones. Sin embargo, en 2021 se observó una disminución del 11.27%, posiblemente atribuible a las restricciones globales impuestas por la pandemia del SARS-CoV-2, que impactaron las actividades de investigación en muchas áreas.

Por otro lado, el *Figura 5 (a)* presenta el promedio de citas por año, el cual ofrece una perspectiva de la influencia y relevancia de los artículos publicados en cada período. Aunque se observan fluctuaciones en el promedio de citas a lo largo de los años, el interés en el tema se estabiliza con un promedio constante de 2 a 4 citas por artículo en los últimos años. Este comportamiento sugiere que, si bien la cantidad de publicaciones ha crecido significativamente, el impacto en términos de citas promedio no ha seguido un crecimiento lineal. Es posible que esto se deba a la naturaleza emergente de la investigación en HDH, que atrae un número creciente de nuevos estudios, pero cuyo impacto aún se está consolidando en la literatura científica.

Estos resultados revelan que la tecnología HDH es un área de investigación emergente y de creciente interés, considerada prometedora como método sostenible para la desalinización. El aumento en la producción científica reciente, acompañado de un promedio de citas moderado, refleja que esta tecnología ha ganado tracción y reconocimiento en el ámbito científico, aunque su influencia se encuentra en una etapa de crecimiento y consolidación.

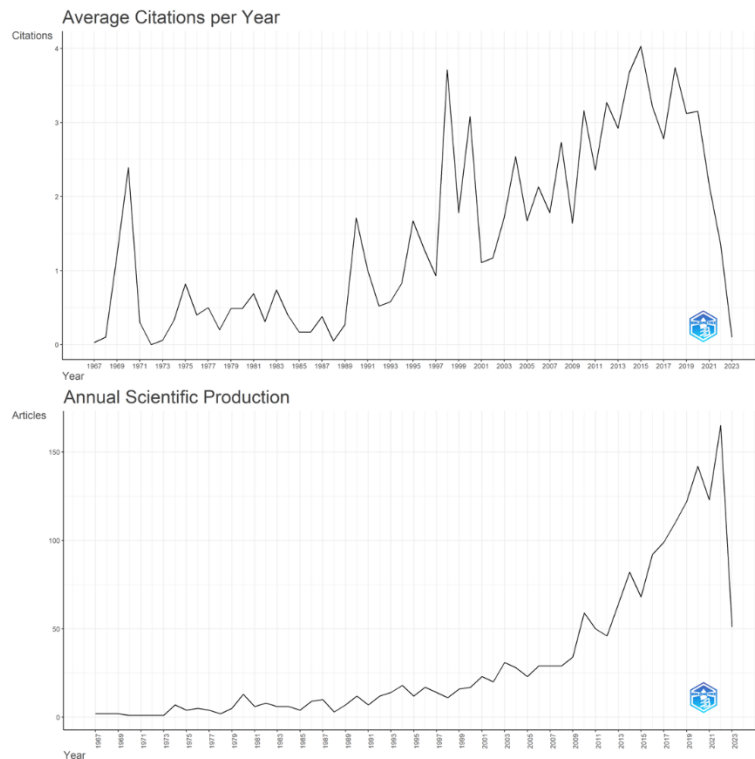


Figura 5 Publicaciones anuales y citas sobre desalinización HDH.

3.3.3 Temas de tendencia

La Figura 6 muestra el análisis de palabras clave emergentes en la investigación sobre desalinización mediante HDH desde el año 2000 hasta 2023. Este gráfico representa el uso progresivo de diferentes términos en la literatura científica sobre HDH desde el año 2000 hasta 2023. Cada término clave se ubica en el eje vertical, mientras que el eje horizontal muestra el tiempo en años. Las líneas horizontales muestran el período en el cual cada palabra clave comenzó a ganar relevancia, extendiéndose hasta el último año de uso frecuente. Los círculos superpuestos a estas líneas representan la frecuencia de ocurrencia de cada término en un año específico, con el tamaño de los círculos mostrando la intensidad de uso: cuanto mayor es el círculo, mayor es la frecuencia de ese término en la literatura de HDH en ese año.

Este análisis destaca el crecimiento temático en HDH, con un aumento en la aparición de términos como "fresh water," "system productivity," "packed beds,"

y "HDH system," que subraya el interés por optimizar la eficiencia de los sistemas HDH e integrar energías renovables, tal como se observa en términos relacionados con "solar power generation" y "solar collectors". Además, conceptos técnicos como "mass transfer," "heat transfer," y "evaporation" reflejan un enfoque en los principios de transferencia de calor y masa, esenciales para mejorar el rendimiento y reducir costos operativos, aspectos clave para la viabilidad comercial de HDH.

La tendencia también muestra un interés creciente en el uso de "mathematical models" y "computer simulation" para predecir y optimizar el comportamiento de los sistemas HDH, lo que sugiere una orientación hacia el diseño computacional para aumentar la eficiencia y adaptabilidad de estos sistemas en diferentes contextos operativos. Reflejando un esfuerzo en la investigación para hacer del HDH una tecnología de desalinización sostenible y avanzada.

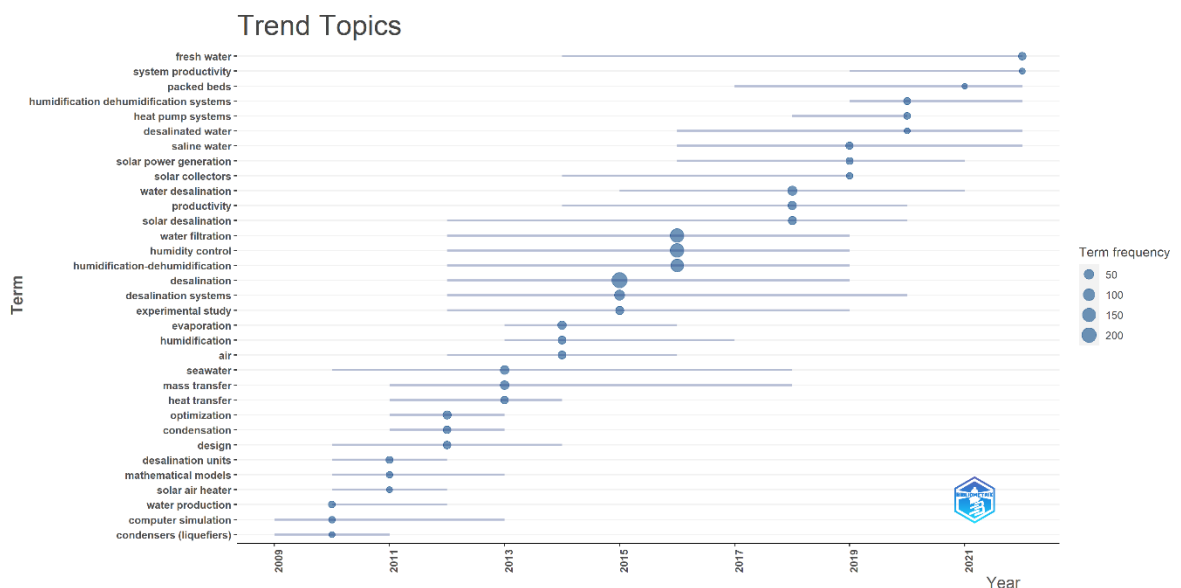


Figura 6 Temas de tendencia en la investigación de HDH en los últimos años

3.3.4 Publicación por País y Colaboraciones Internacionales

La Figura 7, muestra la distribución geográfica y el comportamiento temporal de las publicaciones sobre desalinización mediante humidificación-deshumidificación (HDH) en los países más activos en esta investigación. Esta

figura está compuesta por dos subgráficos: el *Figura 7(a)*, un mapa mundial que representa el número de documentos producidos por país, y el *Figura 4 (b)*, una gráfica de líneas que muestra el crecimiento acumulado de publicaciones en los cinco principales países desde 2007 hasta 2023.

El *Figura 7 (a)* revela que Egipto es el principal contribuyente en investigación de HDH, con un 22% del total de publicaciones, seguido de Estados Unidos (14%) e Irán (12%). La notable actividad en Egipto (Mahmoud et al., 2019; Mohamed et al., 2021) y otros países de climas áridos (Aref et al., 2021) o semiáridos como Arabia Saudita (D. Lawal et al., 2018) y China (He et al., 2018a) donde se refleja una necesidad urgente de tecnologías de desalinización sostenibles en estas regiones, donde la escasez de agua es un problema apremiante. El interés en HDH en estas áreas sugiere que esta tecnología puede ofrecer soluciones viables para mejorar el acceso al agua potable en condiciones de alta aridez (Zarei & Behyad, 2019).

El *Figura 7(b)* ilustra el comportamiento temporal del número de publicaciones en los cinco países líderes: China, Egipto, Irán, Arabia Saudita y Estados Unidos. La trayectoria de crecimiento acumulado muestra que, aunque Egipto y Estados Unidos fueron pioneros en la investigación de HDH, China ha experimentado un aumento notable en la producción científica desde 2007, alcanzando el liderazgo en los últimos años (Pereira & Jegatheesan, 2024). Esto puede estar vinculado a las políticas de China que fomentan la investigación y desarrollo en tecnologías de sostenibilidad, especialmente en áreas críticas como la seguridad hídrica. La tendencia en Irán y Arabia Saudita también muestra un crecimiento sostenido, lo cual es consistente con la importancia de esta tecnología en regiones que enfrentan desafíos hídricos (Alazaiza et al., 2024).

La *Figura 7* en su conjunto destaca, además, la expansión de las colaboraciones internacionales en la última década. La presencia de redes de coautoría entre los países líderes, especialmente entre Egipto, Estados Unidos, Arabia Saudita y China, indica que los esfuerzos de investigación en HDH son cada vez más colaborativos. Estas alianzas internacionales facilitan el intercambio de

conocimientos y recursos, permitiendo que los avances tecnológicos en HDH se adapten a distintas condiciones geográficas y socioeconómicas. La intensificación de estas colaboraciones es crucial para el desarrollo de soluciones globales, ya que permite la adaptación de la tecnología HDH a las necesidades específicas de cada región (Adrián et al., 2020).

Estos resultados sugieren que la tecnología HDH está adquiriendo una relevancia creciente a nivel mundial, no solo en términos de producción científica, sino también en la formación de redes de colaboración internacional que potencian el avance de la tecnología (Berana et al., 2024). La actividad investigativa en países vulnerables a la escasez de agua y la colaboración entre estos refuerzan el potencial de HDH para mitigar problemas de acceso al agua potable en contextos de estrés hídrico (Okasha et al., 2022).

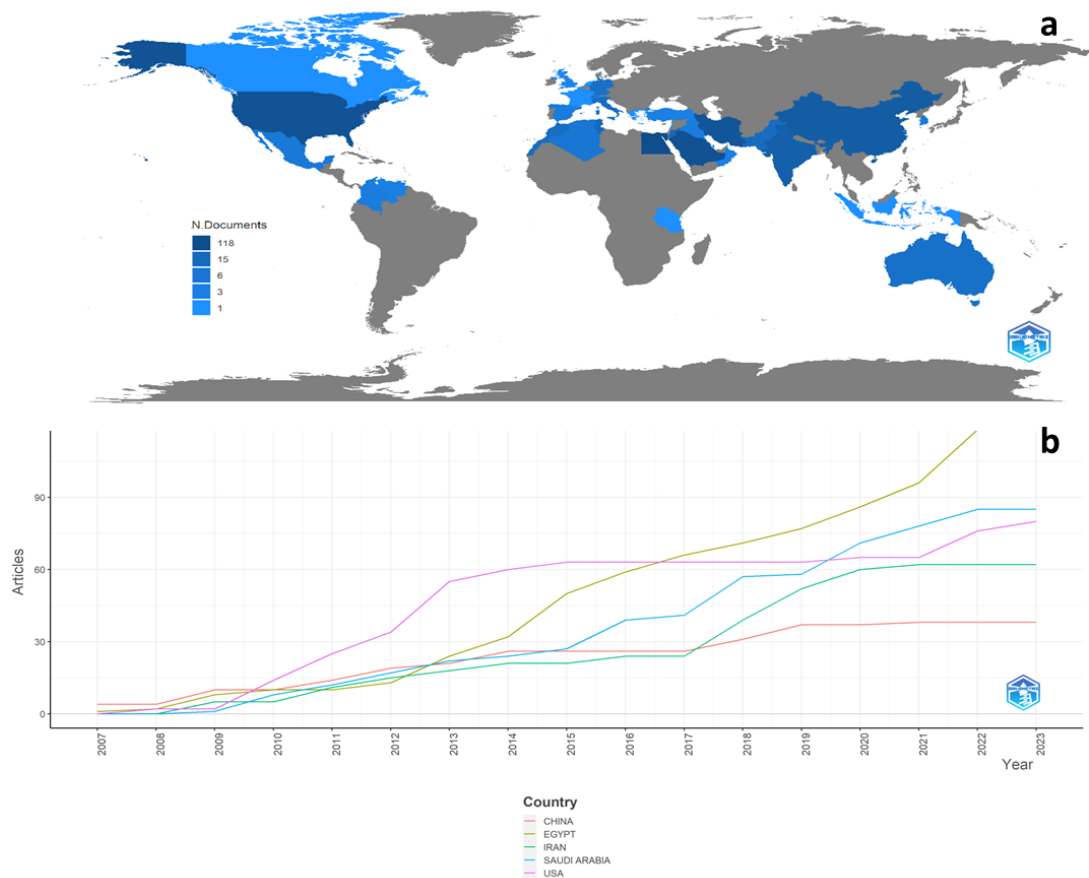


Figura 7 Comparación de la tendencia de crecimiento de la investigación de los principales países.

3.3.5 Palabras clave de investigación emergentes HDH

La Figura 8 presenta un análisis detallado de la frecuencia acumulada de palabras clave en el campo de la desalinización mediante HDH desde el año 2007 hasta 2023. Aquí se permite identificar las tendencias emergentes y la evolución temática en la literatura científica. Cada línea en la gráfica representa la frecuencia acumulada de un término específico a lo largo del tiempo, permitiendo observar la aparición de nuevos temas en el campo, además de la intensidad y persistencia de estos.

En este trabajo se identificaron 1391 palabras clave, de las cuales "desalination" y "water filtration" destacan como las más frecuentes, mostrando su centralidad en la investigación de HDH. Estas palabras clave dominantes son representadas

por las líneas superiores en la gráfica, lo cual sugiere que la desalinización en general y los sistemas de filtración de agua son componentes fundamentales en este campo. La frecuencia acumulada de estos términos ha crecido de manera constante, dándonos una idea de su relevancia sostenida a lo largo de los años. Además, términos como "Humidity control" y "Humidification-Dehumidification" han mostrado un aumento considerable en frecuencia en los últimos años, lo cual señala un enfoque emergente en los aspectos técnicos de control de humedad y eficiencia de los sistemas HDH. Este enfoque está alineado con el interés por optimizar el rendimiento del proceso de desalinización, especialmente en lo que respecta a la reducción del consumo energético y la mejora de la eficiencia de los sistemas (Huang et al., 2019; Teixeira et al., 2008). El gráfico también revela un interés creciente en temas relacionados con los procesos físicos involucrados en HDH, como "mass transfer" y "heat transfer" (Sharqawy et al., 2014). La presencia de estos términos en la literatura, aunque en menor frecuencia que las palabras clave dominantes, mostrando un esfuerzo por profundizar en los principios fundamentales de transferencia de masa y calor, que son cruciales para mejorar el rendimiento de los sistemas HDH y hacerlos más sostenibles (Agyekum et al., 2024).

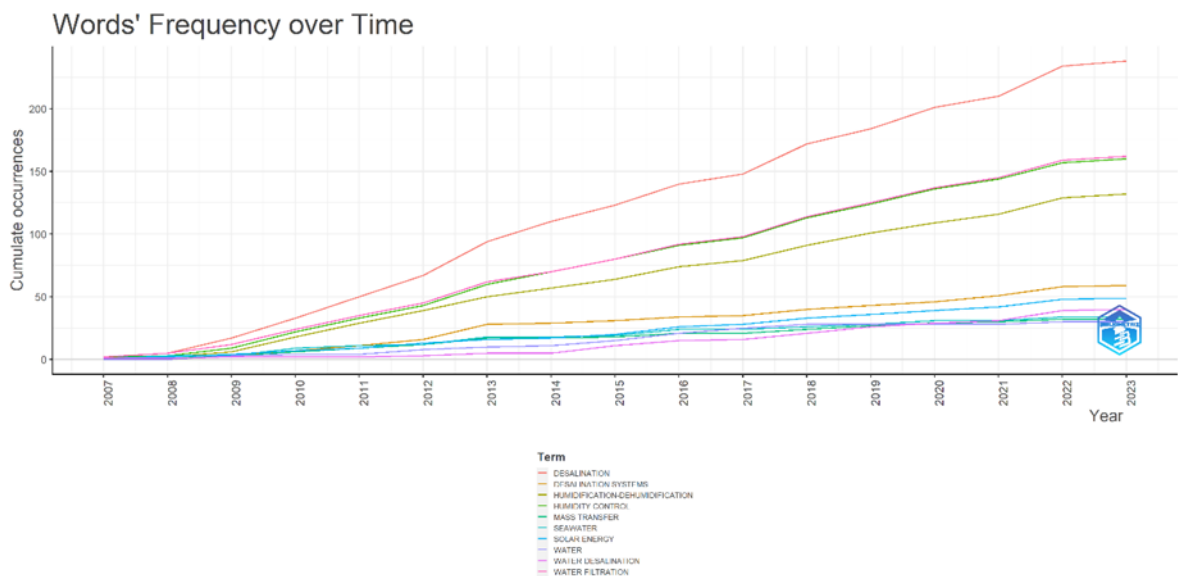


Figura 8 Frecuencia de las palabras a lo largo del tiempo

3.3.6 Análisis de red de palabras clave y colaboración entre autores

La Figura 9 se muestra un análisis visual de las palabras clave más recurrentes en los artículos y sus interrelaciones en la investigación sobre HDH. Se identifican temas centrales y las áreas interconectadas en la literatura, lo que resulta esencial para comprender el enfoque y las prioridades en el desarrollo de esta tecnología. En la red, términos como "desalination," "water filtration," y "humidity control" ocupan posiciones prominentes, reflejando su rol crucial en la tecnología HDH. Con un 15% de frecuencia para "desalination," seguido de "water filtration" y "humidity control" (ambos con un 10%), estos términos se enfocan principalmente en asegurar la producción de agua potable mediante procesos de filtración y manejo de humedad, que son pilares fundamentales en desalinización sostenible.

Los temas técnicos relacionados con la optimización del sistema están dados con términos como "mass transfer," "evaporation," y "heat transfer" formando interrelaciones. Esto indica que la investigación en HDH se ha orientado hacia la mejora de los mecanismos de transferencia de calor y masa, aspectos esenciales para incrementar la eficiencia del sistema (Xuening et al., 2015). La optimización de estos procesos permite mejorar el aprovechamiento de los recursos energéticos, reduciendo así los costos operativos y aumentando la cantidad de agua dulce producida, lo que es fundamental para la viabilidad comercial de la tecnología HDH (He & Han, 2017; Mahdizade & Ameri, 2018).

La figura muestra un interés creciente en la integración de energías renovables, evidenciado por términos como "solar energy," "solar power," y "solar desalination." Esto revela que los investigadores han estado explorando el uso de fuentes de energía sostenibles para reducir el impacto ambiental y hacer que la tecnología HDH sea más económica y aplicable en regiones con alta irradiación solar. La incorporación de energía solar en los sistemas HDH representa una alternativa para mejorar la sustentabilidad del proceso, especialmente en áreas remotas y áridas (Faizan et al., 2022).

En el gráfico se observa la presencia de términos asociados con el diseño y la experimentación, como "optimization," "experimental study," y "numerical model." Esto indica también una tendencia hacia la modelización y el análisis experimental, con el objetivo de optimizar las condiciones de operación de los sistemas HDH antes de su implementación (Juwad et al., 2023). El desarrollo de modelos numéricos permite prever el comportamiento del sistema bajo distintas configuraciones, facilitando el diseño de instalaciones más eficientes y ajustadas a las necesidades locales (El-Ghetany & Khattab, 2016; Saldivia et al., 2021; Zhani et al., 2011). Por otro lado, términos como "productivity," "condensation," y "cooling" subrayan los esfuerzos por incrementar la productividad y eficiencia del sistema HDH (Elattar et al., 2020; Zhang et al., 2018). Con el objetivo de maximizar la cantidad de agua dulce generada, mientras que se da énfasis en tecnologías de enfriamiento y condensación (D. U. Lawal & Qasem, 2020).

Esto indica que la HDH no se limita únicamente a la desalinización, sino que se expande hacia áreas técnicas y de diseño que buscan optimizar la eficiencia y sostenibilidad del proceso (Breckle, 2009). La red de palabras clave refleja una estructura compleja en la que convergen múltiples aspectos técnicos y ambientales, orientando el desarrollo futuro de esta tecnología hacia un enfoque integral y sostenible (Abdelmoez et al., 2019).



Figura 9 Diagrama de visualización de las palabras co-keyword de mayor incidencia en la base de datos (n=163)

En cuanto a la colaboración entre autores, la Figura 10 muestra los patrones de colaboración entre diferentes investigadores en el campo de la HDH. Este análisis de red evidencia conexiones de colaboración, en las que autores destacados como Zubair, Lienhard, y Antar emergen como figuras centrales, liderando el desarrollo y la disseminación de conocimientos en esta área. Su posicionamiento en la red sugeriría que han desempeñado un papel fundamental en la conexión de distintos grupos de investigación, actuando como enlaces entre diversas subredes de coautoría.

La estructura de la red refleja un enfoque colaborativo y multidisciplinario, donde la existencia de conexiones internacionales sugiere que el desarrollo de soluciones HDH no se limita a un solo grupo o región, sino que se nutre del intercambio global de conocimientos y perspectivas. Los vínculos entre autores,

representados por las líneas en el diagrama, muestran que la investigación en HDH es un esfuerzo colectivo que integra diversas disciplinas y enfoques metodológicos. Esta colaboración amplia y diversa ha permitido la innovación en el campo, al combinar los recursos y experiencias de investigadores de diferentes instituciones y países.

La presencia de clusters distintos en la red también apunta a áreas de especialización dentro de la tecnología HDH, con grupos de investigación centrados en temas específicos como la eficiencia energética (He et al., 2018b), el diseño de sistemas (Elhashimi et al., 2022) y la integración de energías renovables (Abdelmoez et al., 2019). La formación de estos clusters colaborativos sugiere que, aunque la investigación en HDH es ampliamente colaborativa, existen subáreas especializadas que avanzan en paralelo.

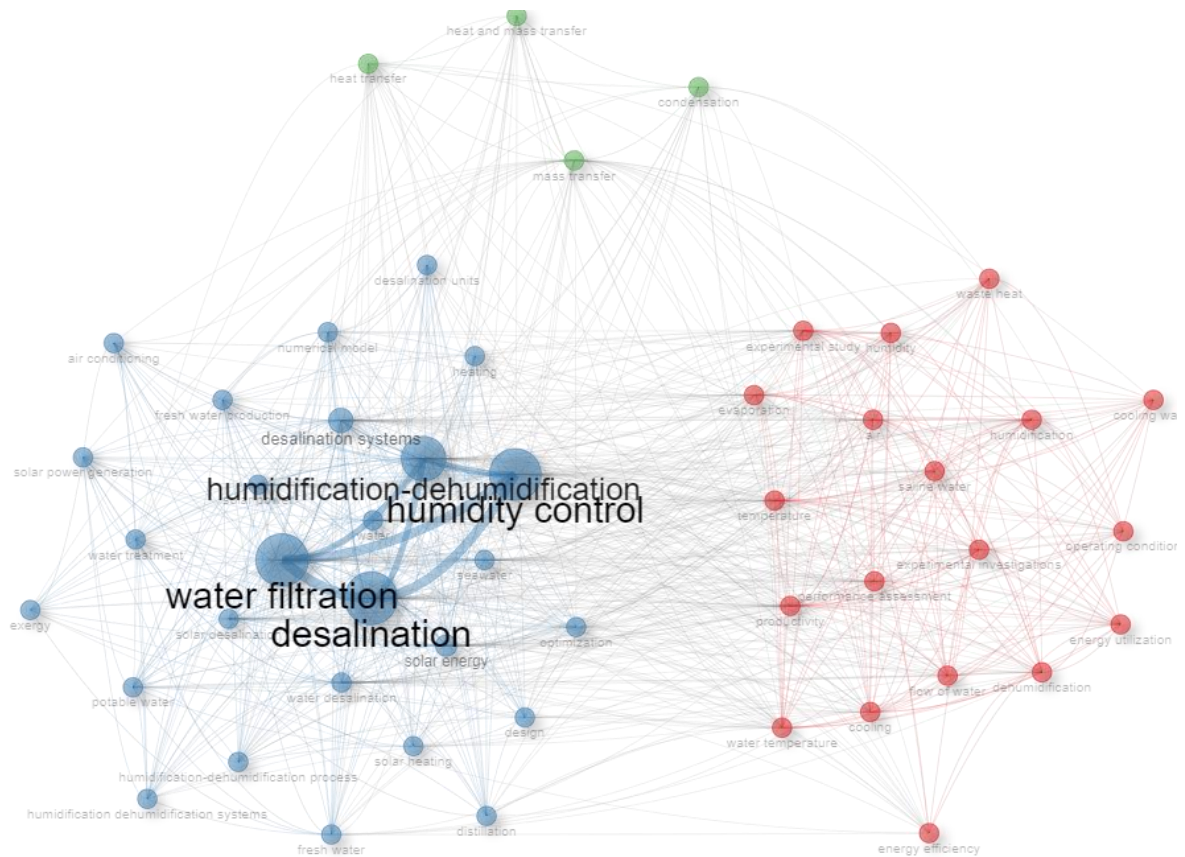


Figura 10 Diagrama de análisis de red basado en palabras clave indexadas

Figura 11 Diagrama de análisis de red basado en la colaboración de los autores.

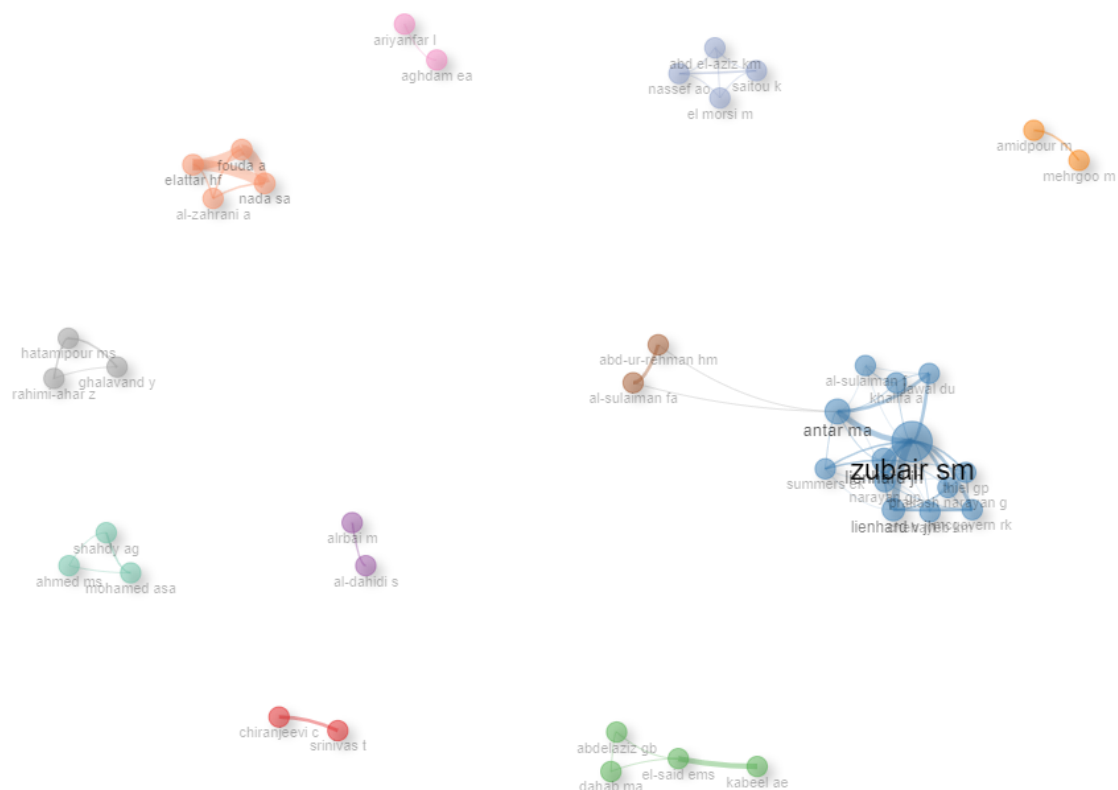


Figura 11 Diagrama de análisis de red basado en la colaboración de los autores.

Este análisis muestra cómo los esfuerzos compartidos y la especialización simultánea en temas como la eficiencia energética, el control de humedad y el desarrollo de nuevos materiales fortalecen el campo de la desalinización, apoyando tanto la innovación específica como el desarrollo de soluciones aplicables a distintos contextos.

3.3.7 Principales revistas y contribución de autores

La investigación sobre HDH se ha difundido a través de un conjunto amplio de revistas, totalizando 71 publicaciones en diversos campos de estudio. La revista *Desalination* se destaca como la principal fuente de publicaciones en esta área, representando el 29.4% del total de artículos y acumulando el 48.9% de las citas, lo que consolida su rol como el medio más influyente para la difusión de investigaciones sobre HDH. La **Tabla 3** muestra que *Desalination* ha publicado 47 artículos desde 2009, con un factor SJR de 1.632 y una media de 18.72 citas por artículo, evidenciando su importancia en el campo. La segunda revista más influyente, *Applied Thermal Engineering*, cuenta con 9 artículos y una media de 25.66 citas por artículo, siendo de relevancia en el ámbito de la ingeniería térmica aplicada al HDH.

Tabla 3 Las cinco revistas principales con documentos publicados.

Revista	Artículos	SJR ¹	Citas	Cita media ³	1er Artículo	Ultimo Artículo
<i>Desalination</i>	47	1.632	880	18.72	2009	2023
<i>Applied Thermal Engineering</i>	9	1.584	231	25.66	2011	2022
<i>Energy Conversion And Management</i>	7	2.829	271	38.71	2014	2019
<i>Energy</i>	5	2.041	314	62.8	2010	2014
<i>International Journal Of Energy Research</i>	4	0.811	53	13.25	2020	2021
<i>International Journal Of Heat And Mass Transfer</i>	4	1.461	185	46.25	2012	2014
<i>International Journal Of Thermal Sciences</i>	4	1.132	273	68.25	2010	2014
<i>Renewable Energy</i>	4	1.877	115	28.75	2010	2023
<i>Solar Energy</i>	4	1.418	181	45.25	2012	2022
<i>Energy Procedia</i>	3	0.533	40	13.33	2015	2017
<i>Energy Procedia</i>	3	0.533	40	13.33	2015	2017

¹Scimago Journal Rank 2021, ² Número total de citas divididas por el número total de artículos.

Otras revistas, como Energy Conversion and Management y Energy, también han contribuido significativamente, publicando investigaciones que exploran la eficiencia energética y el diseño de sistemas de HDH, áreas clave para el desarrollo sostenible de esta tecnología. Estas publicaciones, aunque en menor volumen, presentan una media de citas elevada, teniendo un impacto considerable en el campo. Este patrón de publicación en revistas de alto impacto subraya la multidisciplinariedad de la tecnología HDH, que abarca temas de ingeniería, ciencia de materiales y energías renovables.

En cuanto a la contribución de autores, la **Tabla 4** destaca a los investigadores más activos y citados en el campo de HDH, entre los que se encuentran Syed M. Zubair, de la King Fahd University of Petroleum and Minerals en Arabia Saudita, y John H. Lienhard V, del Massachusetts Institute of Technology en Estados Unidos. Zubair, con 17 artículos y un total de 1219 citas, se posiciona como el autor con mayor influencia, seguido por Lienhard, quien acumula un promedio de 81.3 citas por artículo, lo que indica la alta calidad y relevancia de su investigación. Este grupo de autores no solo contribuye con la producción académica, sino que también lidera redes de colaboración internacional, promoviendo un enfoque global y multidisciplinario en el desarrollo de soluciones para desalinización mediante HDH.

Tabla 4 Características principales de los autores más activos en la investigación sobre HDH.

Autor	Artículos	Citas	Promedio de citas ¹	H index ²	Ciudad	Afiliación ³	1er Artículo	Ultimo articulo	ORCID
Zubair, Syed M.	17	1219	71.7	14	Saudi Arabia	King Fahd University of Petroleum and Minerals,	2010	2021	https://orcid.org/0000-0001-6994-0242
Lienhard John H	V, 11	894	81.3	10	United States	Massachusetts Institute of Technology	2010	2014	https://orcid.org/0000-0002-2901-0638
Antar, Mohamed A.	10	665	66.5	8	Saudi Arabia	King Fahd University of Petroleum and Minerals	2010	2020	https://orcid.org/0000-0003-1000-3662

Kabeel, A. E.	10	495	49.5	9	Egypt	Tanta University	2013	2022	-
El-Said, Emad M.S.	7	325	46.5	7	Egypt	Faculty of Engineering, Damietta	2013	2022	https://orcid.org/0000-0002-4247-5763
Elattar, Hassan Fawzy	7	360	51.5	6	Egypt	Faculty of Engineering in Shubra, Cairo	2015	2020	-
Fouda, A.	7	360	51.5	6	Egypt	Mansoura University, Mansoura	2015	2020	-
Nada, Sameh A.	7	360	51.5	6	Egypt	Benha University	2015	2020	https://orcid.org/0000-0002-1975-7543
Amidpour M	6	225	37.5	6	Iran	K. N. Toosi University of Technology	2009	2013	https://orcid.org/0000-0003-2073-6106

Además de estos autores, la colaboración entre instituciones de diferentes países, particularmente entre Arabia Saudita, Egipto, y Estados Unidos, refleja la naturaleza internacional de la investigación en HDH. Los investigadores activos no solo publican en revistas influyentes, sino que también contribuyen al avance del campo mediante la exploración de temas emergentes, como se observa en la frecuencia de palabras clave discutida en la **Tabla 5**. Este enfoque colaborativo y el intercambio de conocimientos entre disciplinas sugieren un progreso sostenido en la tecnología HDH, adaptándola a los desafíos contemporáneos de sostenibilidad y eficiencia.

Tabla 5 Fuerza total de enlace de las 10 palabras clave con mayor frecuencia de aparición.

Lugar	Palabra Clave	Ocurrencias
1	Desalination	238
2	Water filtration	162
3	Humidity control	160
4	Humidification dehumidification	132
5	Desalination system	59
6	Solar energy	49
7	Wáter desalination	40
8	Mass transfer	32
9	Evaporation	28
10	Solar desalination	24

3.3.8 Análisis de red

La Figura 12 proporciona un análisis detallado de la red de citas (CR), autores (AU), y palabras clave (DE) en la investigación de HDH, mostrando la interconexión entre estudios y temáticas en este campo. En el panel izquierdo, la columna de citas (CR) revela cuáles estudios son los más referenciados, mostrando la influencia de ciertas investigaciones en el desarrollo teórico y práctico de la tecnología HDH. Los trabajos de autores destacados como Syed M. Zubair y Mohamed A. Antar figuran con alta frecuencia, reflejando su posición central en la literatura de HDH. Estos autores, visibles en la columna central (AU), son reconocidos por sus contribuciones en áreas clave como la optimización térmica y el diseño de sistemas de HDH, lo que subraya su rol como referentes en este campo.

La columna de palabras clave (DE) en el lado derecho ilustra los términos más recurrentes en la investigación de HDH, destacándose "desalination," "humidification-dehumidification," y "solar desalination" como términos predominantes. Este enfoque en palabras clave específicas sugiere que los investigadores están orientados hacia mejorar la eficiencia de desalinización mediante procesos de HDH, con un énfasis particular en el aprovechamiento de energías renovables como la energía solar. La interrelación entre autores y palabras clave resalta la naturaleza multidisciplinaria y colaborativa de esta investigación, con investigadores que comparten objetivos comunes en términos de sostenibilidad y eficiencia energética. Se puede observar cómo destacan los temas de optimización y sostenibilidad de los sistemas con un enfoque compartido y consolidado en la mejora de la tecnología HDH para abordar problemas de acceso al agua potable en áreas con escasez de recursos.

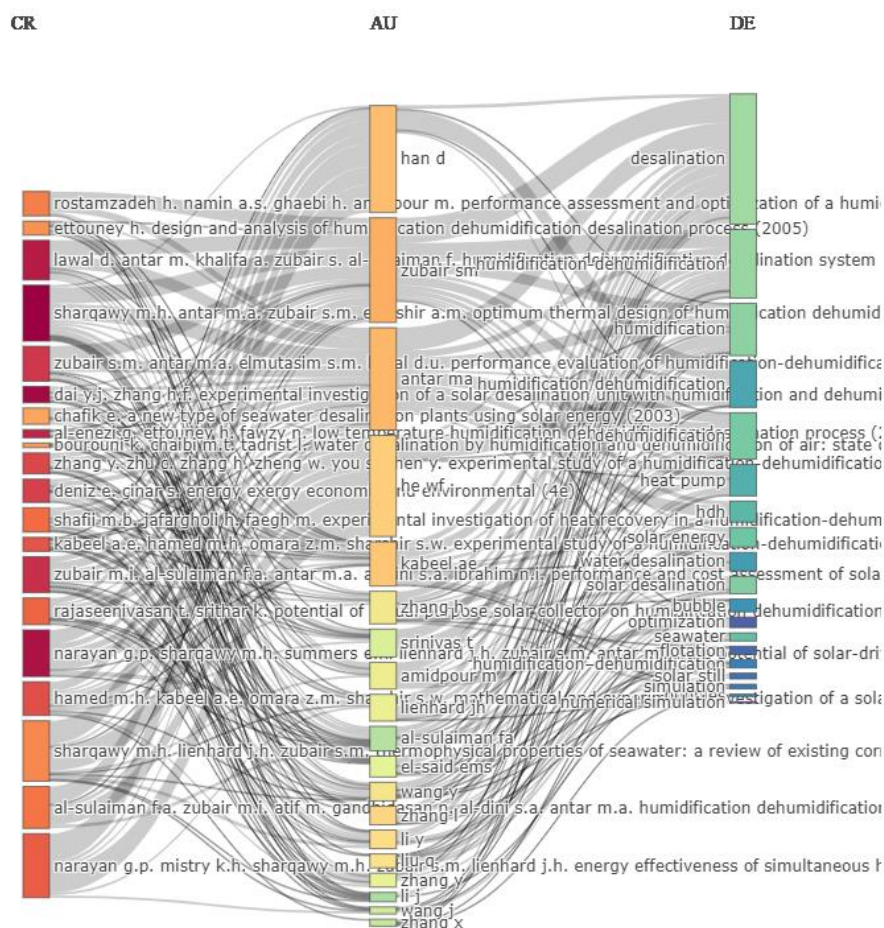


Figura 12 Análisis de red de citas, autores y palabras clave en la investigación de humidificación-deshumidificación (HDH)

3.3.9 Implicaciones y limitaciones

El análisis bibliométrico de la tecnología de desalinización mediante HDH realizado en este estudio ofrece una perspectiva importante sobre las tendencias actuales y futuras del campo. A diferencia de la investigación sobre tecnologías de desalinización más consolidadas, como la ósmosis inversa, el estudio revela que la investigación en HDH es aún limitada, lo que destaca un potencial significativo de expansión. Esta escasez de investigaciones representa una oportunidad para que futuros estudios profundicen en aspectos específicos de

HDH, como la eficiencia energética, la integración con fuentes de energía renovable y la optimización de procesos. Además, los patrones de colaboración entre autores e instituciones observados en el análisis sugieren que el progreso en HDH puede beneficiarse enormemente de redes de investigación más robustas y multidisciplinarias, facilitando el intercambio de conocimientos y la innovación en el campo.

Los hallazgos de este estudio subrayan la necesidad de mejoras en el manejo y la eficiencia de la tecnología HDH. Las tendencias de investigación emergentes, especialmente en términos de control de humedad, transferencia de masa y energía solar, podrían guiar el desarrollo de sistemas HDH más sostenibles y adaptados a contextos específicos, como regiones con escasez de agua. Las instituciones y los investigadores pueden utilizar esta información para dirigir sus esfuerzos hacia áreas de alta relevancia y potencial impacto, optimizando el uso de recursos y maximizando los beneficios sociales y ambientales.

Sin embargo, este estudio presenta limitaciones. La dependencia de una única base de datos, Scopus, implica que los resultados podrían no capturar completamente el panorama de la investigación en HDH, excluyendo potencialmente artículos relevantes indexados en otras fuentes. Además, debido a la naturaleza dinámica de la tecnología HDH, ciertos artículos podrían estar desactualizados, afectando la representatividad de algunos temas en el análisis. Estudios futuros podrían beneficiarse de una mayor variedad de fuentes y una actualización constante de la base de datos para reflejar el progreso continuo en la tecnología HDH.

3.3.10 Oportunidades de investigación futuras en HDH

El análisis bibliométrico de la tecnología HDH revela varias áreas prometedoras para futuras investigaciones que pueden fortalecer su aplicación en la desalinización sostenible. En primer lugar, aunque el HDH demuestra eficiencia y adaptabilidad, se identifican vacíos específicos que requieren mayor investigación. La integración de tecnologías avanzadas de transferencia de calor

y masa, como la recuperación de energía y el uso de materiales innovadores, aparece como una prioridad para mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos de los sistemas HDH.

Además, los estudios comparativos que evalúan el desempeño del HDH frente a otras técnicas de desalinización, como la ósmosis inversa y la destilación por membranas, se sugieren como una vía para establecer las condiciones en las que el HDH ofrece ventajas significativas. Esta comparación podría clarificar los escenarios óptimos para su implementación, resaltando su valor en términos de eficiencia y sostenibilidad. De igual manera, la exploración de sistemas híbridos, que combinan el HDH con fuentes de energía renovable, especialmente solar, se plantea como un camino hacia soluciones de desalinización autónomas y adecuadas para regiones con recursos limitados.

El desarrollo de modelos de simulación y predicción de rendimiento también se identifica como una necesidad fundamental, ya que estos facilitarían la adaptación del HDH a diversas condiciones operativas y escalas de aplicación. La investigación en modelado, combinada con análisis económicos y de costos de producción, provee una base crítica para que los tomadores de decisiones evalúen la viabilidad del HDH en entornos específicos. Por último, se reconoce la importancia de estudiar la gestión de residuos de salmuera generados por el proceso HDH, con un enfoque en métodos de reutilización o eliminación ambientalmente responsables.

3.4 Conclusión

Este estudio bibliométrico proporciona una visión sobre la evolución de la investigación en desalinización por medio de humidificación-deshumidificación (HDH), destacando las principales líneas de investigación, tendencias emergentes y brechas existentes. A través del análisis de 163 publicaciones entre 2007 y 2023, se observa un interés creciente en HDH como una tecnología de desalinización sostenible, especialmente en países con climas áridos y escasez de agua, como Egipto, Estados Unidos e Irán. Este incremento en la producción

científica refleja una mayor conciencia social y política sobre la necesidad de soluciones sostenibles ante los retos ambientales y la escasez de recursos hídricos exacerbada por el cambio climático.

Los hallazgos muestran los principales temas de investigación incluyen la integración de energía solar, el control de la humedad, la transferencia de masa, y la implementación de sistemas de bombas de calor, lo cual sugiere un enfoque en mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas HDH. El análisis de la contribución de revistas revela que "Desalination" y "Applied Thermal Engineering" lideran la publicación en este campo, dando relevancia científica a estos estudios en revistas de alto impacto. Además, autores influyentes como Zubair, Lienhard, Antar, y Kabeel han jugado un rol significativo, contribuyendo con un porcentaje considerable del total de artículos publicados.

La revisión realizada resalta el potencial del HDH como una tecnología emergente en desalinización, con oportunidades para optimizar su eficiencia y reducir costos. Este estudio aspira a orientar a investigadores e instituciones en la identificación de áreas prioritarias y en la formulación de estrategias de investigación que aborden los retos técnicos y económicos que enfrenta el HDH, contribuyendo así al desarrollo de soluciones sostenibles en la gestión de recursos hídricos en regiones con altos niveles de estrés hídrico.

3.5 Bibliografía

- Abdelmoez, W., Ashour, E. A., & Sayed, N. M. (2019). Water desalination by humidification–dehumidification technology with performance evaluation using exergy analysis. *Desalination and Water Treatment*, 148, 1–19. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23668>
- Adrián, Monterrey-Viña, Ana, Musicki-Savic, J., F., Díaz-Peña, Baltasar, & Peñate-Suárez. (2020). Technical and Agronomical Assessment of the Use of Desalinated Seawater for Coastal Irrigation in an Insular Context. *Water*, 12(272). <https://doi.org/doi:10.3390/w12010272>
- Agyekum, E. B., Odoi-Yorke, F., Okonkwo, P. C., Mbasso, W. F., & Darko, R. O. (2024). Clean water production – A content and bibliometric review of two decades of research on green membranes for desalination. *Energy Reports*, 12(July), 3812–3829. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.052>
- Alazaiza, M. Y. D., Alzghoul, T. M., Amr, S. A., Bangalore Ramu, M., & Nassani, D. E. (2024). Bibliometric Insights into Car Wash Wastewater Treatment Research: Trends and Perspectives. *Water (Switzerland)*, 16(14), 1–23. <https://doi.org/10.3390/w16142034>
- AlMallahi, M. N., Mustafa, J., Al-Marzouqi, A. H., & Elgendi, M. (2024). Research progress and state-of-the-art on solar membrane desalination. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10(May), 100825. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100825>
- Aref, L., Fallahzadeh, R., & Madadi Avargani, V. (2021). An experimental investigation on a portable bubble basin humidification/dehumidification desalination unit utilizing a closed-loop pulsating heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113694>
- Baniasad Askari, I., & Shahsavar, A. (2022). The exergo-economic analysis of two novel combined ejector heat pump/humidification-dehumidification desalination systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102561>
- Berana, Y., Saleem, M. W., Ali, H., & Mohmmmed, A. (2024). Visualizing the Landscape and Evolution of Solar Energy-Integrated Desalination Systems via Scientometric Analysis. *Energies*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/en17122857>
- Breckle, S. (2009). Is Sustainable Agriculture with Seawater Irrigation Realistic? In *Salinity and water stress* (Issue Springer, Dordrecht, pp. 187–196).

- Capocelli, M., Balsamo, M., Lancia, A., & Barba, D. (2018). Process analysis of a novel humidification-dehumidification-adsorption (HDHA) desalination method. *Desalination*, 429, 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.020>
- Conagua. (2018). Estadísticas del agua en México. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- El-Ghetany, H. H., & Khattab, N. M. (2016). Mathematical modeling for performance prediction of a humidification - dehumidification solar water desalination system in Egypt. *Egyptian Journal of Chemistry*, 59(2), 145–162. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85013319107&partnerID=40&md5=90d5215e64309b3834f984c63a12e5d0>
- Elattar, H. F., Nada, S. A., Al-Zahrani, A., & Fouda, A. (2020). Humidification-dehumidification water desalination system integrated with multiple evaporators/condensers heat pump unit. *International Journal of Energy Research*, 44(8), 6396–6416. <https://doi.org/10.1002/er.5368>
- Elhashimi, M. A., Gee, M., & Abbasi, B. (2022). Unconventional desalination: The use of cyclone separators in HDH desalination to achieve zero liquid discharge. *Desalination*, 539. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115932>
- Elsafi, A. M. (2017). Integration of humidification-dehumidification desalination and concentrated photovoltaic-thermal collectors: Energy and exergy-costing analysis. *Desalination*, 424(June), 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.022>
- Elsaid, K., Kamil, M., Taha, E., Ali, M., Wilberforce, T., & Olabi, A. (2020). Environment Environmental impact of desalination technologies : A review. *Science of the Total Environment*, 748. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>
- Faizan, M., Toor, Z., & Antar, M. A. (2022). Optimization of Two-Stage Modified Air Heated HDH Desalination Systems. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(12), 16451–16473. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06846-x>
- He, W. F., & Han, D. (2017). Performance Simulation of an Air-Heated Humidification Dehumidification Desalination System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 73(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/73/1/012004>
- He, W. F., Han, D., & Ji, C. (2018a). Investigation on humidification dehumidification desalination system coupled with heat pump. *Desalination*, 436, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.02.021>

- He, W. F., Han, D., & Ji, C. (2018b). Investigation on humidification dehumidification desalination system coupled with heat pump. *Desalination*, 436(29), 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.02.021>
- Huang, X., Ling, X., Li, Y., Liu, W., & Ke, T. (2019). A graphical method for the determination of optimum operating parameters in a humidification-dehumidification desalination system. *Desalination*, 455, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.013>
- Ifras Zubair, M., Al-Sulaiman, F. A., Antar, M. A., Dini, S., & Ibrahim, N. I. (2020). Performance and cost assessment of a solar HDH desalination system integrated with thermal storage: A case study. *Desalination and Water Treatment*, 173, 86–104. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.24686>
- Juwad, S. A., Lawal, D. U., Antar, M. A., Sharqawy, M. H., Khalifa, A. E., & Zubair, S. M. (2023). Performance analysis of a pilot-scale modified air heated and dual heated humidification-dehumidification desalination system. *Applied Thermal Engineering*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119956>
- Lawal, D., Antar, M., Khalifa, A., Zubair, S., & Al-Sulaiman, F. (2018). Humidification-dehumidification desalination system operated by a heat pump. *Energy Conversion and Management*, 161(September 2017), 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.067>
- Lawal, D. U., & Qasem, N. A. A. (2020). Humidification-dehumidification desalination systems driven by thermal-based renewable and low-grade energy sources: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109817>
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., Clarke, M., Devereaux, P. J., Kleijnen, J., & Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. In *Journal of clinical epidemiology* (Vol. 62, Issue 10). <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.06.006>
- López-Serrano, M. J., Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., & Román-Sánchez, I. M. (2020). Sustainable use of wastewater in agriculture: A bibliometric analysis of worldwide research. *Sustainability (Switzerland)*, 12(21), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su12218948>
- Lu, Y., He, W., Zhou, X., An, H., Chen, J., & Han, D. (2022). Design Analysis of a Solar-Powered Water Desalination System Using Humidification Dehumidification for Continuous Water Production. *Sustainability (Switzerland)*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/su14116860>

- Luna, O. P., & Grieger, C. E. (2015). El agua en México. https://backend.aprende.edu.mx/media/uploads/resources/el_agua_en_mexico_124e215f.pdf
- Mahdizade, E. Z., & Ameri, M. (2018). Thermodynamic investigation of a semi-open air, humidification dehumidification desalination system using air and water heaters. *Desalination*, 428, 182–198. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.032>
- Mahmoud, A., Fath, H., Ookwara, S., & Ahmed, M. (2019). Influence of partial solar energy storage and solar concentration ratio on the productivity of integrated solar still/humidification-dehumidification desalination systems. *Desalination*, 467, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.04.033>
- Mancuso, S., Atzori, G., Mancuso, S., & Masi, E. (2019). Seawater potential use in soilless culture: A review. *Scientia Horticultura*, 249, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.035>
- Martínez-alvarez, V., Martín-gorri, B., & Soto-garcía, M. (2016). Seawater desalination for crop irrigation — A review of current experiences and revealed key issues. *DES*, 381, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.11.032>
- Martínez-Granados, D., Marín-Membrive, P., & Calatrava, J. (2022). Economic Assessment of Irrigation with Desalinated Seawater in Greenhouse Tomato Production in SE Spain. *Agronomy*, 12(6), 1471. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061471>
- Mohamed, A. S. A., Ahmed, M. S., Maghrabie, H. M., & Shahdy, A. G. (2021). Desalination process using humidification–dehumidification technique: A detailed review. *International Journal of Energy Research*, 45(3), 3698–3749. <https://doi.org/10.1002/er.6111>
- Okasha, A. M., Eldib, E. M., Elmetwalli, A. H., Farooque, A. A., Yaseen, Z. M., & Elsayed, S. (2022). Maximization of Water Productivity and Yield of Two Iceberg Lettuce Cultivars in Hydroponic Farming System Using Magnetically Treated Saline Water. *Agriculture (Switzerland)*, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture12010101>
- Ortega-delgado, B., & Palenzuela, P. (2022). Integrated Seawater Multi-Effect Distillation and Parabolic trough Concentrating Solar Thermal Power Plants.
- Pereira, G. L. D., & Jegatheesan, V. (2024). Mapping the evolution of seawater desalination research (2000–2024): Bibliometric and co-word analysis of 11,000+ publications. *Desalination*, 591(August), 118029. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118029>

- Saldivia, D., Barraza, R., Estay, D., Valdivia, P., Reyes, M., & García, J. (2021). Experimental test and sensitivity analysis of performance parameters of a solar humidification–dehumidification system. *Desalination and Water Treatment*, 228, 21–35. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27312>
- Santosh, R., Lee, H.-S., & Kim, Y.-D. (2022). A comprehensive review on humidifiers and dehumidifiers in solar and low-grade waste heat powered humidification-dehumidification desalination systems. *Journal of Cleaner Production*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131300>
- Sharqawy, M. H., Antar, M. A., Zubair, S. M., & Elbashir, A. M. (2014). Optimum thermal design of humidification dehumidification desalination systems. *Desalination*, 349, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.06.016>
- Teixeira, A. H. d. C., Bastiaanssen, W. G. M., Moura, M. S. B., Soares, J. M., Ahmad, M. D., & Bos, M. G. (2008). Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(10), 1524–1537. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.05.004>
- Urrútia, G., & Bonfill, X. (2010). PRISMA declaration: A proposal to improve the publication of systematic reviews and meta-analyses. *Medicina Clinica*, 135(11), 507–511. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015>
- Wu, Z., You, S., Zhang, H., Fan, M., Zheng, W., Wang, Y., & Zhang, Y. (2019). Mathematical Modeling and Performance Analysis of Seawater Heat Exchanger in Closed-Loop Seawater-Source Heat Pump System. *Journal of Energy Engineering*, 145(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ey.1943-7897.0000608](https://doi.org/10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000608)
- Xuening, F., Lei, C., Yuman, D., Min, J., & Jinping, F. (2015). CFD modeling and analysis of brine spray evaporation system integrated with solar collector. *Desalination*, 366, 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.02.027>
- Zarei, T., & Behyad, R. (2019). Predicting the water production of a solar seawater greenhouse desalination unit using multi-layer perceptron model. *Solar Energy*, 177(November 2018), 595–603. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.059>
- Zarzo, D., Campos, E., & Terrero, P. (2013). Spanish experience in desalination for agriculture. *Desalination and Water Treatment*, 51(1–3), 53–66. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.708155>
- Zhang, Y., Zhu, C., Zhang, H., Zheng, W., You, S., & Zhen, Y. (2018). Experimental study of a humidification-dehumidification desalination system with heat pump unit. *Desalination*, 442(January), 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.05.020>

Zhani, K., Ben Bacha, H., & Damak, T. (2011). Modeling and experimental validation of a humidification-dehumidification desalination unit solar part. *Energy*, 36(5), 3159–3169. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.005>

4. CARACTERIZACIÓN DE UN DESALINADOR DE AGUAS SALOBRES PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA DULCE

4.1. Resumen

La disponibilidad de agua potable es cada vez más limitada esto plantea un desafío considerable a nivel mundial, especialmente en zonas rurales donde el acceso al agua está aún restringido. En este sentido, el desarrollo de sistemas de desalinización de agua salobre a pequeña escala, por el método de humidificación-deshumidificación (HDH), el cual se convierte en una solución de gran potencial gracias a su adaptabilidad y bajo costo operativo. el objetivo de este trabajo fue mejorar la eficiencia de los sistemas HDH mediante un análisis de balance de materia y energía en estado estacionario, complementado con técnicas como el análisis de Pareto y modelos de regresión, que describan el comportamiento físico del sistema y proporcionen herramientas para optimizar los procesos de transferencia de calor y masa. se realizaron mediciones experimentales bajo condiciones de operación controladas, donde se evaluó los factores en niveles mínimos, medios y máximos (-1, 0, 1). Se identificaron los factores críticos incluyen el flujo de agua nebulizada y la frecuencia del ventilador, que influyen significativamente en el flujo de agua evaporada (Fae), con un modelo predictivo que muestra un R^2 de 0.75. En el caso del flujo de agua condensada (Fac), el modelo presenta un R^2 de 0.578, destacando la frecuencia del ventilador y la temperatura del serpentín como determinantes en la fase de condensación. Los datos experimentales revelaron flujos de agua dulce de entre 0.000016 y 0.000362 kg/s, con una eficiencia de evaporación de hasta el 56 %. Aunque la temperatura del agua de nebulización afecta negativamente a Fae, su inclusión en el modelo mejora la precisión predictiva y facilita un análisis detallado del sistema.

Palabras clave: Escasez de agua, desalinización, sistema HDH, balance de energía y materia, optimización de procesos.

Tesis de Doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: M.C. Jesús Antonio García Martínez.

Director de tesis: Dr. Salvador Valle Guadarrama.

CHARACTERIZATION OF A BRACKISH WATER DESALINATION PLANT FOR FRESH WATER PRODUCTION

Abstract

The increasingly limited availability of drinking water poses a considerable challenge worldwide, especially in rural areas where access to water is still restricted. In this regard, the development of small-scale brackish water desalination systems, using the humidification-dehumidification (HDH) method, has become a solution with great potential due to its adaptability and low operational cost. The objective of this work was to improve the efficiency of HDH systems by means of a steady state matter and energy balance analysis, complemented with techniques such as Pareto analysis and regression models, which describe the physical behaviour of the system and provide tools to optimise the heat and mass transfer processes. Experimental measurements were performed under controlled operating conditions, where the factors were evaluated at minimum, average and maximum levels (-1, 0, 1). Critical factors identified include water mist flow and fan frequency, which significantly influence the evaporated water flow (F_{ae}), with a predictive model showing an R^2 of 0.75. In the case of the condensed water flow (F_{ac}), the model shows an R^2 of 0.578, with fan frequency and coil temperature as determinants in the condensation phase. Experimental data revealed freshwater fluxes between 0.000016 and 0.000362 kg/s, with an evaporation efficiency of up to 56 %. Although the temperature of the fogging water negatively affects F_{ae} , its inclusion in the model improves the predictive accuracy and facilitates a detailed analysis of the system.

Key words: Water scarcity, desalination, HDH system, energy and matter balance, process optimisation.

Doctoral Thesis. Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua,
Universidad Autónoma Chapingo.

Author: M.C. Jesús Antonio García Martínez.

Thesis Director: Dr. Salvador Valle Guadarrama.

3.1. Introducción

La desalinización es un proceso utilizado para obtener agua dulce a partir de agua salada, como agua salobre o agua de mar. La desalinización de agua salobre o de mar se lleva a cabo, principalmente, mediante dos métodos: evaporación o el uso de membranas semipermeables (Choukai & Zejli, 2021). Sin embargo, en los últimos años, ha surgido un método alternativo con gran potencial: los sistemas de humidificación y deshumidificación (HDH). Estos sistemas se destacan por su capacidad de producir agua dulce utilizando fuentes de energía de baja calidad, como la solar, lo que los convierte en una opción atractiva para regiones con limitados recursos hídricos y energéticos (Khairat Dawood et al., 2021; Mora et al., 2017).

Los sistemas HDH se basan en un proceso termodinámico donde el aire se humidifica con agua salina para luego condensar el vapor en un proceso de deshumidificación, obteniendo así agua dulce (Kabeel & El-Said, 2014). La eficiencia de este proceso puede ser incrementada mediante la incorporación de tecnologías avanzadas, como las almohadillas en forma de panal y los tubos de carbono poroso, que mejoran significativamente la transferencia de calor y masa (El-Said et al., 2023; Luberti & Capocelli, 2023).

El uso de energía solar para alimentar los sistemas HDH ha demostrado ser particularmente eficiente (Rajaseenivasan et al., 2016). Algunas configuraciones han logrado producir hasta 5 litros de agua por metro cuadrado de área de captación por día, con relaciones de ganancia de rendimiento (GOR) que oscilan entre 3 y 10, dependiendo de las condiciones de operación (Narayan et al., 2010). Además, ciertos sistemas HDH ya han alcanzado la producción de hasta 700 litros de agua pura por día, lo que representa un avance significativo para aplicaciones de desalinización a pequeña escala (McGovern et al., 2013; Singh et al., 2023, Prakash et al., 2012).

Los sistemas HDH ofrecen costos operativos relativamente bajos, con un costo de producción de agua que oscila entre 0.14 y 0.24 dólares por litro, dependiendo de las condiciones específicas del proceso (Dizaji et al., 2024). Además, estos sistemas pueden tratar agua con alta salinidad, lo que los convierte en una solución viable para regiones con problemas críticos de escasez hídrica (Nabil et al., 2023). No obstante, aún se enfrenta el desafío de optimizar el rendimiento energético y la eficiencia frente a diferentes niveles de salinidad. Al respecto, la optimización de los deshumidificadores es importante para incrementar la eficiencia de los sistemas HDH (Eder et al., 2023). Los deshumidificadores de contacto directo, que permiten una mayor transferencia de calor en comparación con los de contacto indirecto, representan un área de gran interés. En este contexto, se han propuesto configuraciones innovadoras que incorporan la recirculación del agua de mar en el humidificador y el agua dulce en el deshumidificador, permitiendo una mejor recuperación de calor y masa. Estas configuraciones han mostrado un impacto positivo en la producción de agua dulce, la GOR y el consumo específico de energía (SEC), demostrando su potencial para mejorar la viabilidad de los sistemas HDH (El-Said et al., 2023). En este contexto, el trabajo se desarrolló con el objetivo de desarrollar, modelar y evaluar un sistema de desalinización de agua salobre mediante la tecnología de humidificación-deshumidificación, utilizando principios termodinámicos para optimizar su funcionamiento, con el fin de mejorar el acceso a agua dulce en regiones rurales y evaluar su viabilidad técnica y económica.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Construcción y operación de un dispositivo HDH

Se construyó un dispositivo para aplicar una estrategia de humidificación-deshumidificación que contó con los siguiente elementos (Figura): (1) un sistema de alimentación de aire (S1) provisto de un ventilador centrífugo de 90W y el sistema de calentamiento cuenta con una resistencia tipo resorte de alambre de níquel-cromo de 1 mm de grosor, con un diámetro de espiral de 0.5 cm, longitud de 252 cm y separación entre espiras de 0.5 cm, disipando una potencia de

1273.68 W; (2) un contenedor inicial de agua salobre (S2) con capacidad de 20 L, y tiene una resistencia para calentar el agua, fabricada en aluminio, tiene una longitud de 0.4318 m y un grosor de 0.5 cm, disipando una potencia de 1344.44 W; (3) una torre de humidificación (S3) con área transversal de 0.16 m² y altura de 1 m, provista de un panel lamelar modelo AP40/PP, fabricado en polipropileno natural, proporciona una superficie proyectada de 16.8 m²/m³, con un diámetro hidráulico de 0.039 m y por 3 espesas de nebulización en la parte superior para la alimentación de agua salobre y entrada de aire en la parte inferior y (4) una torre de deshumidificación (S4) provista de un sistema de enfriamiento de agua (S5) y un serpentín para favorecer el contacto de aire con una superficie fría y con ello la condensación de agua dulce. El sistema de enfriamiento implementado utiliza un ciclo de refrigeración basado en el refrigerante R134a y está compuesto por tres componentes principales: un compresor de 1.3 kW, un evaporador y un condensador que esta en contacto con el agua de refrigeración. El evaporador es el encargado de enfriar el agua, la cual fluye a través de él y es impulsada por una bomba hacia la entrada del condensador en la sección S4. Este condensador está compuesto por un sistema de 20 tubos aletados de cobre de 28 cm de longitud cada uno, diseñado para maximizar el contacto entre el aire exterior y el agua fría que circula en su interior. Durante este proceso, el calor del agua se transfiere al refrigerante, y de manera simultánea, el aire que fluye al exterior del condensador también transfiere calor y, como resultado, parte de su humedad comienza a condensarse. La Figura muestra la apariencia física del sistema HDH.

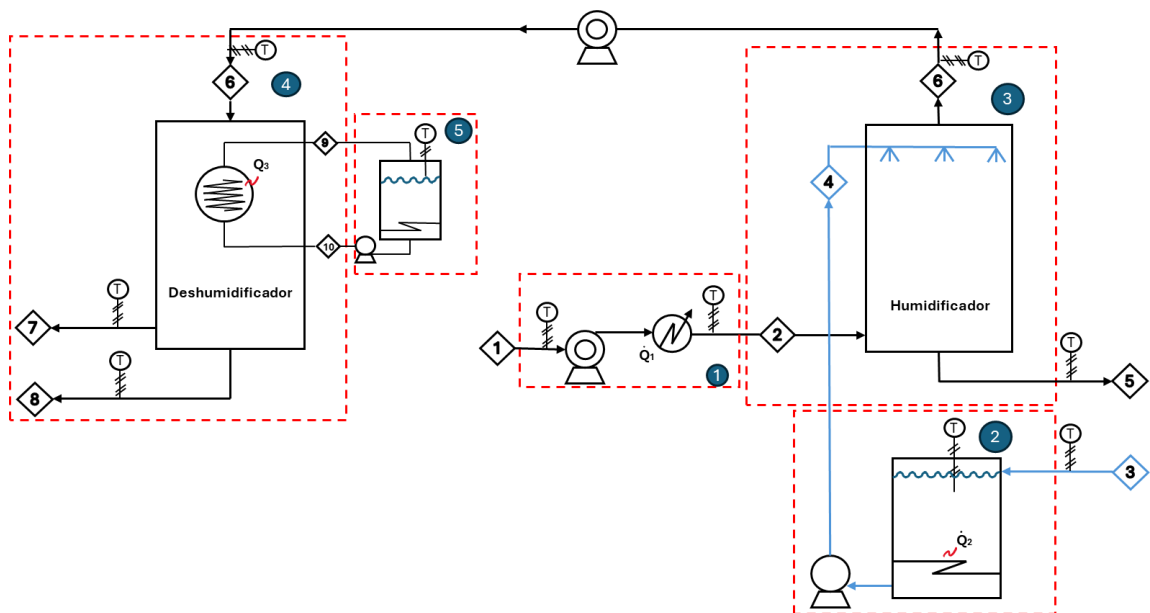


Figura 1 Diagrama del sistema de humidificación-deshumidificación.

3.2.2. Caracterización instrumental del dispositivo HDH

Se alimentó aire al sistema S1 mediante un ventilador de 90 W, con un flujo que varía de 0.00555 a 0.02039 kg/s, temperatura de bulbo seco entre 16 y 23 °C y temperatura de bulbo húmedo entre 12 y 17 °C. Allí, la temperatura de bulbo seco se elevó a un rango entre 30 y 60 °C. En tales condiciones, el aire se envió a la torre de humidificación. En forma simultánea, se alimentó agua salobre al contenedor inicial (S2), donde se elevó la temperatura a un valor entre 40 y 70 °C.

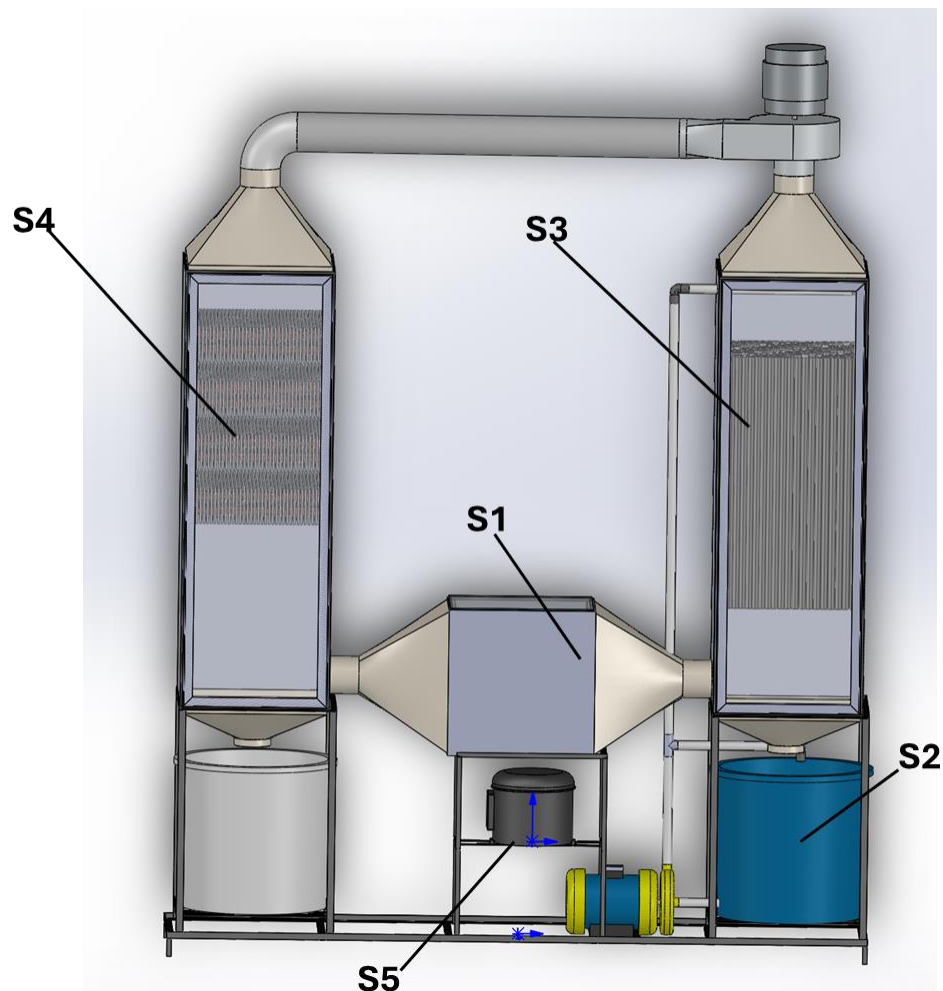


Figura 2 Apariencia externa del dispositivo HDH. S1: sistema de calentamiento del aire; S2: contenedor inicial de agua salobre; S3: torre de humidificación; S4: torre de deshumidificación; S5: sistema de enfriamiento de agua.

En la torre de humidificación, el agua salobre se nebulizó por medio de las espumas superiores y cayó sobre el panel de área amplificada. El flujo de agua en estos sistemas podía regularse mediante una válvula de retorno, cuya apertura permitió controlar la presión en los nebulizadores, ofreciendo tres posiciones de ajuste que resultaron en diferentes flujos de trabajo: (1) 0.00183 L/s, (2) 0.00348 L/s, (3) 0.00513 L/s. A la misma torre se alimentó, por la parte inferior, el aire caliente proveniente del sistema S1 y circuló en contracorriente con el agua a través del panel de área amplificada. Con ello, parte del agua de la corriente líquida se vaporizó y se incorporó al aire, con lo que ocurrió una humidificación

de éste. La otra parte del agua se colectó en un recipiente inferior y presentó un incremento de la concentración de sal. El aire humidificado se condujo a la torre de deshumidificación (S4), donde ingresó por la parte superior y se puso en contacto con una superficie fría formada por un serpentín de cobre de 22.4 m de longitud, con diámetros interior y exterior de 5.5 mm y 6.3 mm, respectivamente, que formaba parte de un sistema de enfriamiento que operaba en ciclo con un compresor de 1.3 kW y que utilizó un controlador de temperatura digital modelo REX-C100, con tecnología PID, para asegurar una regulación precisa de la temperatura en el proceso. Este dispositivo permitió un control automático y estable, utilizando un termopar tipo K como sensor de entrada para fijar el valor del agua de enfriamiento (*set point*). Con ello, se sustrajo calor del aire, lo que causó un enfriamiento hasta la condición de punto de rocío y una condensación posterior de parte del agua contenida en forma de vapor, lo que correspondió a una deshumidificación del aire. Con ello, se obtuvo agua dulce que se condensó sobre la superficie fría del serpentín y se colectó en un recipiente inferior. Finalmente, el aire se condujo hacia un punto de salida o se recirculó al sistema de calentamiento (S1) para reiniciar el ciclo. A la entrada y salida de los sistemas S1, S3 y S4 se colocaron sensores de temperatura digitales tipo DS18B20, con encapsulado de acero inoxidable que les proporciona resistencia al agua. Estos sensores permiten obtener mediciones en un rango de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$ y que registraron las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo. Asimismo, se colocaron sensores a la entrada y salida del agua salobre para evaluar la variación de temperatura durante el calentamiento.

Se midió la velocidad del aire en cinco puntos del dispositivo HDH con un anemómetro modelo "Termo Anemometer 731A". El flujo de aire fue proporcionado por un ventilador trifásico, fabricado por Electro Adda S.p.A., diseñado para operar a 50 Hz con una velocidad nominal de 1350 RPM y una potencia de 0.18 kW, trabajando a una tensión de 220 V y una corriente de 0.64 A, con un factor de potencia ($\cos \phi$) de 0.72. El flujo de aire se controló mediante un variador de frecuencia ajustado en un rango de 0 a 50 Hz. Sin embargo, las mediciones por debajo de 16 Hz no se consideraron, ya que los flujos de aire

resultaban demasiado pequeños para su evaluación precisa. Los puntos de medición fueron los siguientes (Figura 1): flujo 1: entrada de aire antes del calentador; flujo 2: salida del aire posterior al calentador (entrada al humidificador); flujo 6 (succión): punto de succión del ventilador alimentador de aire al deshumidificador; flujo 6 (descarga): punto de descarga del ventilador alimentador de aire al deshumidificador y flujo 7: salida del deshumidificador, donde el aire se liberaba a la atmósfera o se recirculaba al sistema S1. El Cuadro 1 presenta las velocidades del aire medidas en el sistema HDH, en función de la frecuencia del ventilador (Hz). Las velocidades del aire, expresadas en metros por segundo (m/s), se incrementan proporcionalmente a la frecuencia del ventilador, y la tabla proporciona un resumen detallado de los valores obtenidos para cada frecuencia. El Cuadro muestra, además, el diámetro (mm) de la tubería por donde circula el flujo de aire en cada punto medido. Asimismo, la Figura 1 muestra una representación gráfica de las velocidades del aire en los mismos cinco puntos del sistema HDH, pero en función de la frecuencia del ventilador. En el gráfico, se observa cómo las velocidades aumentan de manera continua a medida que se incrementa la frecuencia de operación del ventilador. Cada curva representa uno de los puntos de medición, lo que facilita la comparación visual de cómo varía el flujo de aire en diferentes partes del sistema.

Cuadro 1 Velocidades del aire (m/s) en distintos puntos del dispositivo HDH en función de la frecuencia del ventilador.

Frecuencia (Hz)	Velocidad del aire (m/s)				
	1	2	6Succión	6Descarga	7
16	0.71	0.4	1.3	2.7	0.85
20	0.85	0.6	1.52	3.66	1.01
25	1	0.8	1.9	3.74	1.37
30	1.3	0.91	2.35	4.82	1.83
33	1.56	1	2.51	5.03	1.86
35	1.83	1.09	2.67	5.24	1.9
40	1.9	1.33	3.23	6.49	2.11
45	2.09	1.44	3.8	7.74	2.61

50	2.61	1.7	4.3	9.42	2.84
Diámetro					
(mm)	90.12	90.59	110.05	105.65	102.19

Se caracterizó el sistema de enfriamiento de agua asociado al deshumidificador. En fluido ingresaba a este sistema por el punto 9 y salía de él por el punto 10, con flujo de 0.0265 L/s. Este flujo era impulsado por una bomba modelo YQ-2500 de 110V y 40W de potencia. En el deshumidificador, el agua fría circulaba a través de cuatro intercambiadores que funcionan como condensadores conectados en serie, cada uno está compuesto por 20 tubos de cobre de 28 cm de longitud, con diámetros interior y exterior son de 5.5 mm y 6.3 mm, respectivamente. En el sistema S2, el flujo de agua fluía por un serpentín fabricado con tubería de cobre de $\frac{1}{4}$ de pulgada y una longitud de 20 m, con los mismos diámetros interior y exteriores mencionados anteriormente. Este sistema permitía seleccionar entre tres flujos distintos, proporcionados por una bomba de 110 V y 140 W. Los valores de los flujos disponibles fueron: baja (0.00667 L/s), media (0.01092 L/s) y alta (0.013 L/s), ajustándose de acuerdo con las necesidades del proceso.

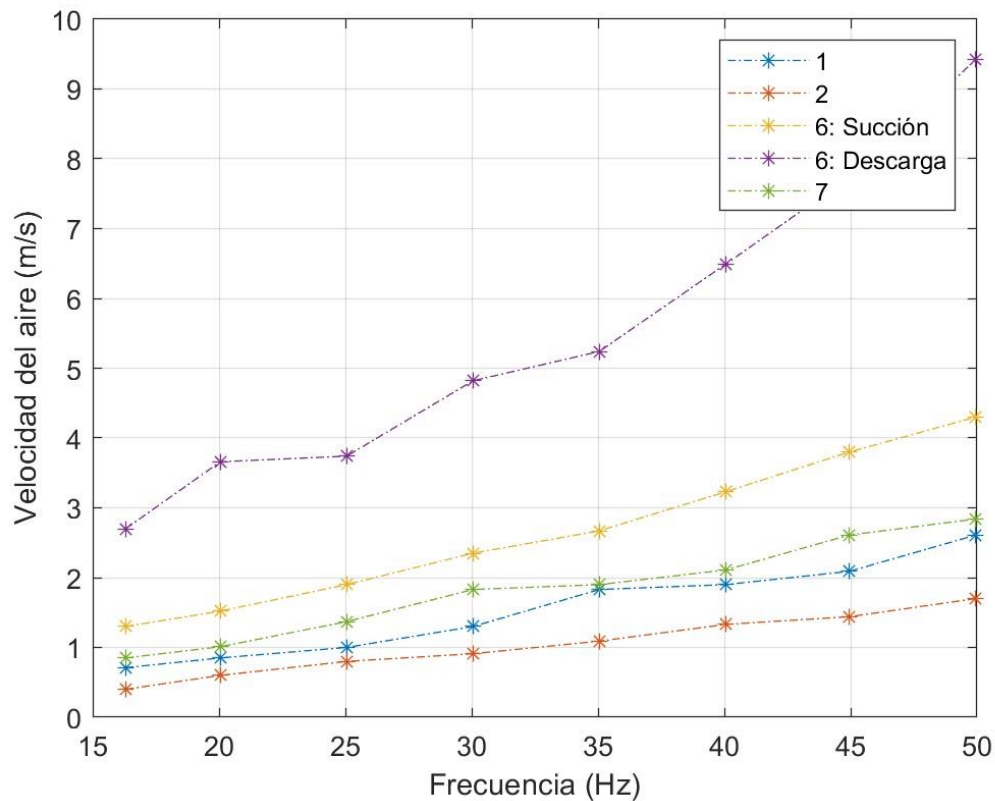


Figura 3 Variación de la velocidad del aire en función de la frecuencia del ventilador.

3.2.3. Caracterización psicrométrica del aire

El equipo desalinador utilizó aire húmedo como fluido de trabajo. Se aplicó la regla de las fases de Gibbs (Ecuación 1; Felder et al., 2020) para determinar el número de grados de libertad ($\#gl$) de este sistema, donde $\#f$ es el número de fases o estados de agregación y $\#c$ es el número de componentes o especies químicas presentes en el sistema.

$$\#gl = \#c - \#f + 2 \quad (1)$$

Dado que el aire húmedo se forma de aire seco y vapor de agua (dos componentes) y existe en fase gaseosa, se determinó que ($\#gl = 3$), es decir, que el número de variables intensivas que es necesario especificar de manera

independiente para caracterizar completamente el estado termodinámico del aire húmedo son tres.

En tal sentido, se usaron las variables de presión atmosférica de la región de Chapingo, México ($P_{atm} = 77,993.0$ Pa), la temperatura de bulbo seco (T_s , °C) y la temperatura de bulbo húmedo (T_h , °C), para caracterizar las propiedades psicrométricas del aire húmedo.

Asimismo, se aceptó que, durante el proceso, la cantidad de aire seco presente en el aire húmedo es constante. En tal sentido, todas las propiedades del aire húmedo se expresaron por unidad de masa de aire seco (kg_{as}).

Se utilizaron las siguientes definiciones de las propiedades del aire húmedo (Green, 2008)

Temperatura de bulbo seco (T_s , °C). Es la temperatura del aire húmedo indicada por un termómetro ordinario.

Temperatura de bulbo húmedo (T_h , °C). Es la temperatura que alcanzaría el aire húmedo al estar en equilibrio con una masa de agua líquida. Se determina con un termómetro ordinario con el bulbo cubierto por un lienzo húmedo y colocado en una corriente del aire evaluar, con velocidad entre 2 y 5 m/s.

Humedad relativa (Hr , % o adimensional). Es la relación entre la presión parcial del vapor de agua (P_v , Pa) presente en el aire húmedo y la presión de saturación o tensión del vapor (P_v^* , Pa) a la misma temperatura (Ecuación 2).

$$Hr = \left(\frac{P_v}{P_v^*} \right) \times 100 \quad (2)$$

Donde la tensión de vapor (P_v^*) se puede obtener de tablas de vapor o a través de ecuaciones de Antoine, en la forma mostrada por las Ecuaciones (3) y (4) correspondientes a los rangos de 0 a 60 °C y 60.001 a 150 °C, respectivamente, donde la temperatura T se sustituye en °C y la tensión de vapor se obtiene en mmHg (Felder et al., 2020):

$$\log P_v^* = 8.10765 - \frac{1750.286}{T + 235} \quad (3)$$

$$\log P_v^* = 7.96681 - \frac{1668.21}{T + 228} \quad (4)$$

Humedad absoluta (Ha , kg/kg_{as}). Es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire húmedo por unidad de masa de aire seco. Puede verificarse que se expresa en la forma de la Ecuación (5).

$$Ha = 0.622 \left(\frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \right) \quad (5)$$

Volumen específico (v , m³/kg_{as}). Es el volumen que ocupa el aire húmedo por unidad de masa de aire seco. Puede verificarse que se expresa en la forma de la Ecuación (6), donde M_{as} y M_v son pesos moleculares del aire seco (28.94 kg/kg_{mol}) y del vapor de agua (18.02 kg/kg_{mol}), R es la constante universal de los gases ideales (J/kg_{mol} K) y T es la temperatura del aire húmedo (°C).

$$v = \frac{R (T + 273.13)}{P_{atm}} \left(\frac{1}{M_{as}} + \frac{Ha}{M_v} \right) \quad (6)$$

Temperatura de saturación adiabática (T_{sa} , °C). Es la temperatura que adquiere el aire durante un proceso de humidificación adiabática, donde se acepta que el aire provee calor para causar una evaporación y luego recupera esa energía con la incorporación del vapor formado al mismo aire. Comúnmente se

acepta que es igual a la temperatura de bulbo húmedo. Con base en un balance de energía, el proceso de humidificación adiabática se expresa en la forma de la Ecuación (7), donde Cp_{as} y Cp_v son calores específicos de aire seco y del vapor de agua, respectivamente, expresados ambos en J/kg °C. Asimismo, λ_s (J/kg) es el calor latente del agua y H_s (kg/kg_{as}) es la humedad absoluta de saturación que puede alcanzarse tras un proceso de humidificación adiabática.

$$H_s - H_a = \left(\frac{Cp_{as} + Cp_v H_a}{\lambda_s} \right) (T_s - T_h) \quad (7)$$

Calor específico del aire seco (Cp_{as} , J/kg_{as} °C). Se usó la información de Green y Perry (2008) y el software Sigma Plot (SPSS, 2000) para representar el calor específico del aire seco (Cp_{aire} , J/kg °C), en función de la temperatura (T , °C), en la forma de la Ecuación (8).

$$Cp_{aire} = 1006.612577 - 0.014517 * T + 0.0004117 * T^2 \quad (8)$$

Calor específico del vapor de agua (Cp_v , J/kg_v °C). Se usó la definición de calor específico a presión constante, en términos de un cambio de entalpía por unidad de cambio de temperatura (Green y Perry, 2008). En tal sentido, el calor específico del vapor de agua se expresó en la forma de la Ecuación (9), donde se evaluaron cambios de entalpía en intervalos de 3 °C.

$$Cp_v = \left(\frac{\Delta h}{\Delta T} \right)_p = \left(\frac{1}{3} \right) [(1720.385(T_v + 3) - 1720.385 T_v)^2]^{0.5} \quad (9)$$

Entalpía específica del aire húmedo (h , J/kg_{as}). Es la suma del calor sensible del aire húmedo y el calor latente (λ_s , J/kg) del vapor de agua incorporado en el aire húmedo (Ecuación 11). Se expresa en la forma de la Ecuación (10).

$$h = (Cp_{as} + Cp_v H_a) T + \lambda_s H_a \quad (10)$$

$$\lambda_s = 2506708.125388 - 2576.339361 * T \quad (11)$$

Con base en este conjunto de definiciones, se desarrolló una rutina de cálculo en Matlab (The Mathworks Inc., 1990–2009), para el cálculo de las distintas propiedades psicrométricas, en la forma mostrada en el Cuadro .

Cuadro 2 Rutina de cálculo de las propiedades psicrométricas del aire húmedo.

```
function [Hr,Ha,Cp,h,v,Troc] = Psicrom(Ts,Th,Patm)
Cpa=1006.612577-0.014517*Ts+0.0004117*Ts^2;
Cpv=1/5*sqrt((1720.384615*(Ts+5)-1720.384615*(Ts))^2);
Qlat=2506708.125388-2576.339361*Th;
if Ts<=60
    Psats=(10^(8.10765-1750.285/(Ts+235)))*101325/760;
elseif Ts>60
    Psats=(10^(7.96681-1668.21/(Ts+228)))*101325/760;
end
if Th<=60
    Psath=(10^(8.10765-1750.285/(Th+235)))*101325/760;
elseif Th>60
    Psath=(10^(7.96681-1668.21/(Th+228)))*101325/760;
end
Hah=0.622*Psath/(Patm-Psath);
Has=(Hah*Qlat-Cpa*Ts+Cpa*Th)/(Qlat-Cpv*Ts+Cpv*Th);
Pv=Has*Patm/(0.622+Has);
Hr=Pv/Psats*100;
Ha=Has;
Cp=Cpa+Cpv*Ha;
h=(Cpa+Cpv*Ha)*Ts+Qlat*Ha;
Rgas=8314.4;Tabs=Ts+273.15;
v=(1/28.94+Ha/18.02)*Rgas*Tabs/Patm;
if Pv<=19924.17
    Troc=-(-235*log10(Pv*760/101325)+8.10765*235-1750.286)/(-log10(Pv*760/101325)+8.10765);
elseif Pv>19924.17
    Troc=-(-228*log10(Pv*760/101325)+7.96681*228-1668.21)/(-log10(Pv*760/101325)+7.96681);
end
end
```

Temperatura de rocío (T_r , °C). Es la temperatura a la cual el aire húmedo alcanza una condición de saturación después de un enfriamiento a humedad absoluta constante. La forma de cálculo está descrita en el Cuadro .

Adicionalmente, para obtener una representación gráfica de los cambios en las propiedades psicrométricas del aire, se utilizó el programa PsicroMezclas 2.1

(Reyes-Vigil, 2007) para construir un diagrama psicrométrico a la presión atmosférica de Chapingo, México (Figura 4 Diagrama psicrométrico correspondiente a la presión atmosférica de la región de Chapingo, México (77,993 Pa).).

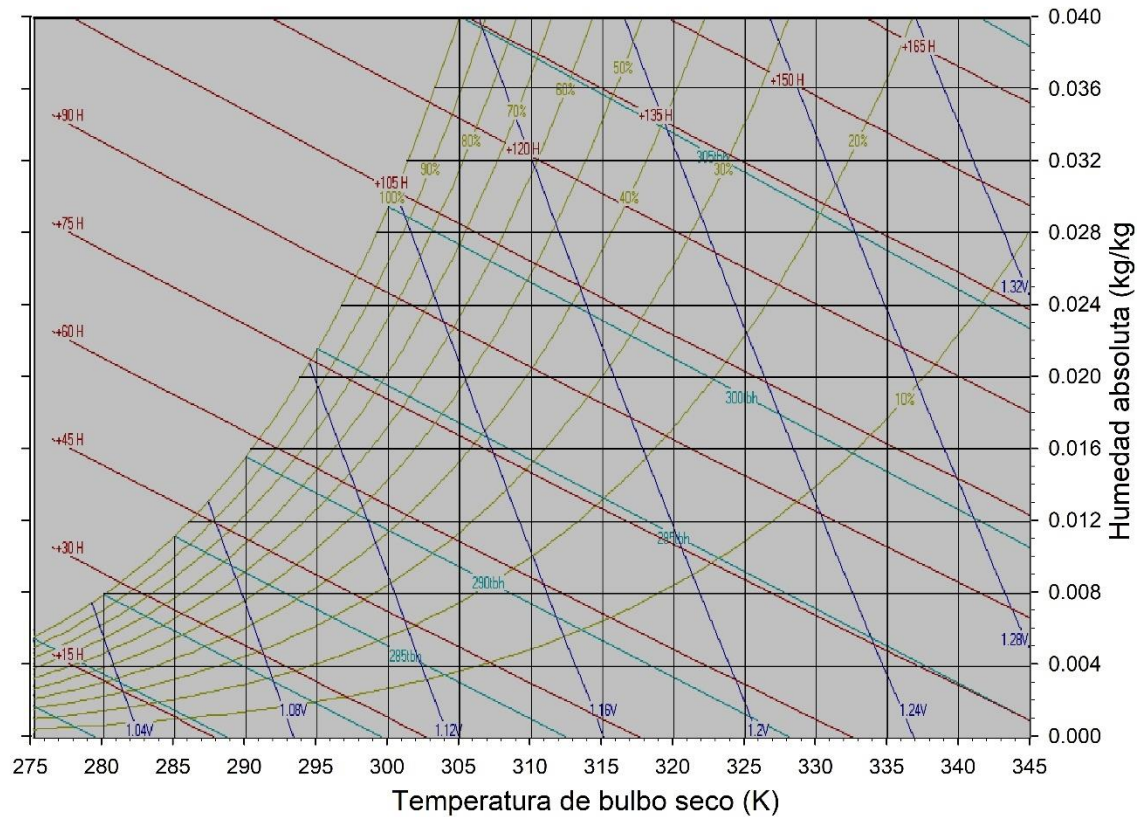


Figura 4 Diagrama psicrométrico correspondiente a la presión atmosférica de la región de Chapingo, México (77,993 Pa).

3.2.4. Propiedades del agua líquida

Se usó la información de Green y Perry (2008) y el software Sigma Plot (SPSS, 2000) para representar el calor específico del agua líquida (Cp_{ag} , J/kg °C), en función de la temperatura (T , °C), en la forma de la Ecuación (12).

$$Cp_{ag} = 4214.006457 - 1.764368 * T + 0.024613 * T^2 - 0.00006452877 * T^3 \quad (12)$$

Asimismo, se consideró el calor latente de evaporación en la forma mostrada por la Ecuación (11).

3.2.5. Modelado del sistema HDH en régimen estacionario

Se analizó la operación del sistema HDH en la condición en que el fluido de trabajo (aire húmedo) ingresó (corriente 1) por el subsistema S1, donde experimentó calentamiento; luego se envió (corriente 2) a la torre de humidificación (S3) donde entró en contacto, en contracorriente, con el agua salobre caliente (corriente 4) proveniente del subsistema S2, se humidificó y se envió (corriente 6) a la torre de deshumidificación (S4) al sistema, donde parte del vapor se condensó y se obtuvo como agua dulce (corriente 8). Finalmente, el aire deshumidificado se expulsó hacia el exterior del equipo (corriente 7). Por otro lado, el agua salobre experimentó un incremento de la concentración de sal y salió del equipo (corriente 5). Dado que no hubo recirculación de aire o de agua salobre, el proceso se desarrolló en régimen estacionario.

Análisis de subsistema 1 (S1)

Se trata de un calentamiento del aire húmedo sin adición de humedad. A partir de una condición térmica de entrada (T_1), el aire se calienta hasta alcanzar la condición (T_2), mediante la transferencia de calor proporcionada por un calentador ($\dot{Q}_{Calentador}^a$). El proceso causa una reducción de la humedad relativa. Un balance general de materia se expresa en la forma de la Ecuación (13), donde los subíndices identifican el flujo, el superíndice A indica que se trata de aire y $\dot{m}$ (kg/s) corresponde a flujo de aire seco, bajo la premisa de que la cantidad de aire seco es constante.

$$\dot{m}_1^A = \dot{m}_2^A = \dot{m}^A \quad (13)$$

La Ecuación (14) corresponde a un balance de humedad.

$$\dot{m}_1^A Ha_1 = \dot{m}_2^A Ha_2 \quad (14)$$

donde $\dot{m}_1^a$ y $\dot{m}_2^a$ representan flujos másicos de aire seco en los puntos de entrada y salida, respectivamente, en tanto mientras que Ha_1 y Ha_2 denotan la humedad absoluta del aire en esos mismos puntos. Dado que en este proceso no se produce variación en el contenido de humedad del aire, el balance de humedad puede simplificarse en la forma de la Ecuación (15):

$$Ha_1 = Ha_2 \quad (15)$$

La Ecuación (16) muestra el balance de energía del subsistema S1, donde Q_1 es el calor que realmente se transfiere al air desde el calentador y se expresa en la forma de la Ecuación (17).

$$\dot{m}_1^A h_1 + Q_1 = \dot{m}_2^A h_2 \quad (16)$$

$$Q_1 = \dot{m}_2^A [(Cp_a + Cp_v Ha_2) T_{s2} + \lambda_{Th2} Ha_2] - \dot{m}_1^A [(Cp_a + Cp_v Ha_1) T_{s1} + \lambda_{Th1} Ha_1] \quad (17)$$

Con esta base, se determinaron experimentalmente las temperaturas de bulbo seco, de bulbo húmedo y las humedades absolutas en los puntos 1 y 2 (entrada y salida) del subsistema S1, con lo cual se determinaron las propiedades psicrométricas de estos flujos con la rutina mostrada en el Cuadro 4. Con ello, se evaluó el flujo de calor Q_1 y se determinó la eficiencia del sistema de calentamiento del aire (η_1 , %), en la forma descrita por la Ecuación (18), donde $Q_{calentador}$ tuvo valor de 1287.23 W.

$$\eta_1 = \left(\frac{Q_1}{Q_{calentador}} \right) \times 100 \quad (18)$$

En adición, se evaluó el coeficiente global de transferencia de calor (U_1 , W/ m² °C) del sistema de calentamiento del subsistema S1 mediante la Ecuación (19), donde la temperatura del sistema de calentamiento ($T_{res,1}$) fue medida utilizando un termopar tipo K y A_1 el área de calefacción, tomada nominalmente como 1 m².

$$Q_1 = U_1 A_1 (T_{res,1} - T_{prom,aire}) \quad (19)$$

Análisis de subsistema 2 (S2)

Este subsistema describe el proceso de calentamiento del agua de alimentación. El flujo másico del agua ingresa en el punto (3) y es descargado en el punto (4). Se acepta que no hay acumulación de masa en el sistema, es decir, que el nivel en el recipiente se mantiene constante. En esta forma, un balance de materia global se expresa en la forma de la Ecuación (20), donde el superíndice L identifica la corriente líquida.

$$\dot{m}_3^L = \dot{m}_4^L \quad (20)$$

Asimismo, un balance de energía tiene la forma de la Ecuación (21).

$$\dot{m}_3^L h_3^L + Q_2 = \dot{m}_4^L h_4^L \quad (21)$$

Dado que no hay cambio de fase y el líquido sólo experimenta un cambio de temperatura, la variación de entalpía se puede evaluar por medio del calor específico, en la forma de la Ecuación (22), de donde se puede obtener el calor transferido al agua salobre (Q_2).

$$Q_2 = \dot{m}_3^L C p_3 (T_4 - T_3) \quad (22)$$

Con esta base, se evaluaron las temperaturas de entrada y salida del agua en el subsistema S2 y el flujo del líquido ($\dot{m}_3^L, T_3, T_4$), se obtuvo un promedio de ambas

temperaturas, se calculó el calor específico con la Ecuación (12) y se determinó el valor de Q_2 . De esta forma, se calculó la eficiencia de calentamiento (η_2 , %) mediante el uso de la resistencia en el subsistema S2, con la Ecuación (23).

$$\eta_2 = \left(\frac{Q_2}{\dot{Q}_{Calentador,L}} \right) \times 100 \quad (23)$$

En adición y en forma similar al caso anterior, se determinó el coeficiente global de transferencia de calor del subsistema S2 (U_2 , W/m² °C) mediante la Ecuación (24), donde la temperatura del sistema de calentamiento ($T_{res,2}$) se midió utilizando un termopar tipo K, y con valor nominal en el área A_2 de calefacción igual a 1 m². Asimismo, el valor de $\dot{Q}_{Calentador,L}$ tuvo valor de 1344.44 W.

$$Q_2 = U_2 A_2 (T_{res,2} - T_{prom,agua}) \quad (24)$$

Análisis de subsistema 3 (S3)

El flujo de aire caliente (corriente 2) ingresa al sistema por la parte inferior del humidificador, mientras que el flujo de agua (corriente 4) ingresa por la parte superior (4), donde es atomizada el agua en contracorriente con el aire. Se asume que el agua alcanza la temperatura de bulbo húmedo (T_h) y a esa condición se evapora y se incorpora al aire. En esta forma, se trata de un proceso de un proceso de humidificación adiabática, en donde el aire proporciona la energía necesaria para la evaporación del agua. En dicho proceso, el aire se enfría debido a la transferencia de calor hacia el agua, permitiendo su evaporación y sigue una trayectoria de incremento de humedad relativa siguiendo las líneas de bulbo húmedo constante (Figura 7).

Un balance de humedad se expresa en la forma de la Ecuación (25):

$$\dot{m}_2^A Ha_2 + \dot{m}_4^L = \dot{m}_6^A Ha_6 + \dot{m}_5^L \quad (25)$$

Dado que $\dot{m}_2^A$ y $\dot{m}_6^A$ son flujos de aire seco, se tiene que son iguales. Entonces la ecuación anterior se puede expresar en la forma de la Ecuación (26), donde $\dot{m}_{vap}$ es la cantidad de agua vaporizada que causó el incremento de la humedad absoluta del aire durante el proceso de humidificación.

$$\dot{m}_{vap} = \dot{m}_6^A(Ha_6 - Ha_2) = \dot{m}_4^L - \dot{m}_5^L \quad (26)$$

Por otro lado, con la suposición de que el proceso de humidificación se conduce con energía aproximadamente constante para el aire, un balance de energía del sistema de humidificación debe expresarse por medio de la Ecuación (7), de tal forma que para el subsistema S3 se escribe como la Ecuación (27), donde Ha_{62} es la humedad absoluta promedio entre Ha_2 y Ha_6 (Ecuación 28).

$$Ha_6 - Ha_2 = \left(\frac{Cp_{as} + Cp_v Ha_{62}}{\lambda_s} \right) (T_2 - T_6) \quad (27)$$

$$Ha_{62} = \frac{Ha_2 + Ha_6}{2} \quad (28)$$

Con esta base, se determinaron las condiciones de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo de las corrientes 2 y 6, con lo cual se determinaron las propiedades psicrométricas correspondientes mediante la rutina mostrada en el Cuadro 4. Con ello, a partir de la Ecuación (27), se determinó el calor latente equivalente del proceso de humidificación (λ_s).

En adición, un balance de sal en el subsistema S3 se describe en la forma de la Ecuación (29), donde X indica concentración de sal en fracción peso.

$$\dot{m}_2^A X_2 + \dot{m}_4^L X_4 = \dot{m}_6^A X_6 + \dot{m}_5^L X_5 \quad (29)$$

En virtud de que la sal no es volátil y si no hay arrastre de sólidos con el aire, se verifica que $(X_2=0)$ y $(X_6=0)$, de donde se obtiene que la concentración de sal en corriente líquida de salida del humidificador está dada por la Ecuación (30).

$$X_5 = \frac{\dot{m}_4^L X_4}{\dot{m}_5^L} = \frac{\dot{m}_4^L X_4}{\dot{m}_4^L - \dot{m}_6^A (Ha_6 - Ha_2)} \quad (30)$$

Análisis de subsistema 4 (S4)

El flujo de aire (corriente 6) proveniente del humidificador entra en contacto con un serpentín de enfriamiento, el cual forma parte de un ciclo de refrigeración. Durante este proceso, el aire se enfría hasta alcanzar su temperatura de rocío. A medida que el enfriamiento continúa, se produce la condensación del vapor de agua presente en el aire, lo que genera una corriente de agua condensada (corriente 8). Como resultado, se obtiene una corriente de aire (7) con un contenido significativamente menor de humedad, que se ha deshumidificado mediante la eliminación del agua condensada. La trayectoria del proceso a partir de que se alcanza la temperatura de rocío se desarrolla sobre la curva de saturación del diagrama psicrométrico (Figura 7), en forma descendente, lo que corresponde a una deshumidificación.

Un balance de masa en este subsistema tiene la forma de la Ecuación (31), de la cual se puede obtener el flujo del agua condensada ($\dot{m}_{cond}$), que constituye el producto del proceso.

$$\dot{m}_{cond} = \dot{m}_8^L = \dot{m}_7^A (Ha_6 - Ha_7) \quad (31)$$

Con esta base, se determinaron las condiciones de temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo de las corrientes 6 y 7, las cuales sirvieron para determinar las propiedades psicrométricas de las mismas, con apoyo de la rutina descrita en el Cuadro 4. Asimismo, se determinó, por aforo el flujo de agua dulce condensada ($\dot{m}_{cond}$) y se contrastó con el cálculo mostrado por la Ecuación (31).

Análisis del subsistema S5

La torre de deshumidificación operó con el complemento de un sistema de refrigeración, que corresponde al subsistema S5 y provee agua de enfriamiento que circula a través de un serpentín con el que contacta el aire. Sobre este sistema se aplicó un balance de energía, que adoptó la forma de la Ecuación (32), de donde se determinó el flujo de calor de enfriamiento, que corresponde a la carga térmica del sistema (Q_5).

$$Q_5 = m_7^A (h_6 - h_7) \quad (32)$$

Al respecto, además de los datos de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo de la condición 6, se determinaron los de la condición 7, de donde se obtuvieron las propiedades psicrométricas con la rutina descrita en el Cuadro 4, entre ellas las entalpías requeridas para el cálculo en la Ecuación (32). Finalmente, se determinó el coeficiente global de transferencia de calor del sistema de enfriamiento (U_5 , W/m² °C) por medio de la Ecuación (33), donde $T_{ag,5}$ es la temperatura del agua que circulaba por el serpentín y T_{67} es la temperatura promedio entre la condición térmica de las corrientes 6 y 7.

$$Q_5 = U_5 A_5 (T_{67} - T_{ag,5}) \quad (33)$$

3.2.6. Diseño experimental y variables de respuesta

Se diseñó un conjunto de experimentos basados en un enfoque de análisis de regresión y superficies de respuesta con el propósito de evaluar detalladamente el comportamiento del sistema de HDH bajo diferentes condiciones operativas. Las condiciones operativas se programaron utilizando el método de normalización de variables, asignando valores de -1, 0 y 1 para representar los niveles mínimo, medio y máximo, respectivamente (Cuadro). Las combinaciones de los factores fueron seleccionadas estratégicamente para cubrir una amplia gama de escenarios y así obtener una representación adecuada de las

interacciones entre las variables. Los factores evaluados incluyeron la temperatura del aire en la entrada (Taire), la temperatura del agua nebulizada (Tagua), el flujo de agua nebulizada (Fagua), la frecuencia del ventilador (Hz), la temperatura del condensador (Tcond), la temperatura del serpentín (Tserp) y el flujo de agua a través del serpentín (Fserp). Este enfoque experimental está alineado con metodologías previas en sistemas HDH, en los que se busca identificar los parámetros críticos que afectan la eficiencia del proceso de desalación (Roslan et al., 2022)

Cuadro 3 Matriz de Diseño Experimental con Variables Normalizadas para las Condiciones Operativas del Sistema HDH

#	Taire	Tagua	Fagua	Hz	Tcond	Tserp	Fserp
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	1	1	1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	1	1	-1
4	1	1	-1	1	1	-1	1
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	-1	0	-1	0	0	0
7	0	1	0	1	-1	0	0
8	-1	0	0	0	1	0	-1
9	1	0	0	0	0	0	1
10	0	0	-1	-1	0	0	0
11	0	0	1	1	-1	0	0
12	0	0	0	0	1	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0
14	-1	0	1	-1	-1	-1	-1
15	1	0	-1	1	0	1	1
16	-1	0	1	1	-1	1	1
17	1	0	-1	1	1	-1	1
18	0	0	0	1	-1	0	0

Se utilizó un análisis de Pareto y superficie de respuesta para modelar y visualizar interacciones entre factores, lo que ayuda a identificar combinaciones óptimas que maximizan el flujo de agua evaporada y condensada. El análisis de Pareto se utiliza para determinar la influencia relativa de cada factor en la respuesta, lo que ayuda a identificar todos los factores con mayor impacto en la representación del sistema. Además, para identificar los factores que influyen significativamente en el flujo de agua evaporada (Fae), se aplicó un análisis de regresión paso a paso (stepwise regression), utilizando el criterio de información de Akaike (AIC)

como criterio de selección. Este método permitió eliminar variables no significativas y optimizar el modelo final con los factores más relevantes. Por otro lado, la superficie de respuesta, proporciona una representación visual de las interacciones entre los factores y nos permite observar cómo las respuestas (Fae y Fac) varían con los cambios en los niveles de los factores. Esta aplicación metodológica, ampliamente utilizada en estudios de optimización de procesos, proporciona un sólido margen para interpretar las relaciones entre los factores experimentales y los resultados obtenidos, permitiendo así una interpretación integral e informada de los datos experimentales basada en la efectividad del sistema HDH. Este análisis fue realizado en RStudio (Ver Anexo E), mientras que las gráficas de superficie de respuesta fueron generadas en Python (Ver Anexo F).

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Producción de agua dulce a partir de agua salobre

El dispositivo de humidificación-deshumidificación (HDH) operó con flujos de agua salobre que variaron entre 0.00183 y 0.00513 L/s, con flujos de aire entre 0.4 y 9.42 L/s, donde se lograron flujos de evaporación de 0.000570 y 0.002034 kg/s, se obtuvo agua dulce con flujo entre 0.000016 y 0.000362 kg/s. Estos resultados se pueden observar en el cuadro 5, donde se observa que el muestreo número 15 se logra evaporar un 56% del flujo de agua salobre, por otro lado, en el muestreo número 6 tenemos solo un 2.5% de evaporación. Esto podemos atribuirlo a varios factores operativos y de diseño, que impactan la eficiencia de evaporación, siendo la diferencia de temperatura entre el agua salobre y el aire uno de los principales (Thiel et al., 2013). Cuando esta diferencia es mayor, el sistema puede transferir más energía hacia el agua, facilitando su evaporación (He et al., 2016). Además, si encontramos condiciones de entrada desfavorables, como una baja diferencia de temperatura o una alta humedad relativa del aire, pueden limitar la capacidad de evaporación del sistema y reducir el porcentaje de agua salobre convertido en vapor.

La eficiencia de evaporación en un sistema HDH depende de la diferencia de temperatura entre el agua salobre y el aire (Guler et al., 2010). Si esta diferencia es pequeña, la capacidad de evaporación disminuye. Además, flujos de aire y agua desbalanceados también pueden limitar el contacto y, en consecuencia, la transferencia de calor y masa.

Sin embargo, estos datos contrastan con los resultados informados en otros estudios. Por ejemplo, Fares et al. (2019) lograron una producción de 1.71 kg/h de agua dulce con un consumo de energía de 0.726 kWh en un sistema de baja capacidad, destacando una eficiencia energética significativa en condiciones de control estricto de los flujos de aire y agua. En otro estudio, Lawal et al. (2018) y colaboradores integraron una bomba de calor de compresión mecánica, alcanzando una producción de hasta 106.53 kg/h en condiciones óptimas de presión y flujo de aire. Esta configuración resultó en un GOR (gained-output-ratio) de 5.14, considerablemente superior al sistema estándar HDH, lo que indica que la adición de un sistema de recuperación de calor podría mejorar notablemente la eficiencia del proceso.

Por su parte, Ahmed et al. (2017) implementó mejoras en el sistema HDH mediante el uso de láminas de aluminio corrugado en el humidificador, logrando un incremento en la producción de agua destilada de 10 a 15 L/h al optimizar las temperaturas de entrada de agua y aire. Este estudio destaca cómo la elección de materiales y el diseño del equipo afectan de manera significativa la eficiencia de humidificación y deshumidificación. Finalmente, Lu et al. (2022) observaron que la operación del sistema HDH en condiciones de alta temperatura y en modo nocturno produce mayor cantidad de agua debido a la mejora en la deshumidificación por la disminución de la temperatura ambiente. Estos autores reportaron una productividad máxima de 67.47 kg/h durante la noche. El Cuadro presenta los resultados de las rutinas de operación que se realizaron para evaluar la eficiencia de la operación.

Cuadro 4 Rutinas de operación del sistema HDH.

#	Taire C	Tagua C	Fagua L/s	Hz Hz	Tcond C	Tserp C	Fserp L/s	Fae kg/s	Fac kg/s	Evap %	Cond %
1	40	40	0.002	16	5	40	0.00667	0.000590	0.000016	32.2	2.6
2	40	70	0.005	50	5	70	0.013	0.000938	0.000247	18.3	26.3
3	70	40	0.005	16	20	70	0.00667	0.001202	0.000031	23.4	2.5
4	70	70	0.002	50	20	40	0.013	0.000570	0.000075	31.2	13.2
5	55	55	0.035	30	12.5	55	0.01092	0.001179	0.000255	3.4	21.6
6	55	40	0.035	16	12.5	55	0.01092	0.000998	0.000026	2.9	2.6
7	55	70	0.035	50	5	55	0.01092	0.001209	0.000273	3.5	22.6
8	40	55	0.035	30	20	55	0.00667	0.001045	0.000261	3.0	25.0
9	70	55	0.035	30	12.5	55	0.013	0.001164	0.000224	3.3	19.2
10	55	55	0.002	16	12.5	55	0.01092	0.000651	0.000019	35.6	3.0
11	55	55	0.005	50	5	55	0.01092	0.001573	0.000287	30.7	18.3
12	55	55	0.035	30	20	55	0.01092	0.001154	0.000353	3.3	30.6
13	55	55	0.035	30	12.5	55	0.01092	0.001138	0.000216	3.3	19.0
14	40	55	0.005	16	5	40	0.00667	0.000656	0.000016	12.8	2.4
15	70	55	0.002	50	12	70	0.013	0.001247	0.000263	68.1	21.1
16	40	50	0.005	50	5	70	0.013	0.002034	0.000362	39.7	17.8
17	70	50	0.002	50	20	40	0.013	0.001184	0.000151	64.7	12.8
18	55	50	0.035	50	5	55	0.01092	0.001872	0.000314	5.4	16.8

3.3.2. Condiciones termofísicas de operación del sistema HDH

En los experimentos realizados en el sistema HDH, se midieron las condiciones termofísicas del aire en distintos puntos de muestreo, así como también los flujos del agua y el aire, con el objetivo de caracterizar el comportamiento del sistema bajo diferentes configuraciones. Los datos obtenidos incluyeron la temperatura de bulbo seco (Tbs), la temperatura de bulbo húmedo (Tbh), la humedad relativa (Hr), la humedad absoluta (Ha), la capacidad calorífica (Cp), la entalpía específica (h), el volumen específico (v) y la transferencia de calor (Troc) en cada punto clave del sistema.

Para explicar el comportamiento de la maquina HDH, se tomó un punto de muestreo en un solo experimento. dichos datos y resultados de los puntos de muestreo se presentan en detalle en el Anexo A. A continuación, se describe el flujo de condiciones termofísicas del aire a lo largo de cada subsistema del HDH. El experimento comienza con la medición de las condiciones del aire en el punto

S1. Aquí, el aire entra en condiciones atmosféricas, y las lecturas típicas de Tbs y Tbh son de aproximadamente 20.2°C y 14.3°C, respectivamente. Con estos datos, junto con la presión atmosférica de Chapingo y la rutina de cálculo en Matlab, se obtuvo una humedad relativa de 56.8% y una humedad absoluta de 0.0109 kg/kg. Este aire pasa por un calentador donde se incrementa la temperatura, pero sin cambiar su humedad absoluta, alcanzando un estado de salida en el punto de muestreo 2. En este punto, los datos revelan un aumento en Tbs a 31.7°C y en Tbh a 17.7°C, mientras que la humedad relativa disminuye a 28.9%, demostrando que la temperatura aumenta sin incluir humedad en el sistema.

El aire calentado pasa por S3, donde se encuentra en contacto en contraflujo con el agua que es nebulizada. A la salida del humidificador, en el punto de muestreo 6, se observa un aumento significativo en la humedad absoluta, que alcanza un valor de 0.0313 kg/kg, y una humedad relativa de 95.9%. Las temperaturas de bulbo seco y húmedo en este punto son de 28.5°C y 27.9°C, respectivamente, lo que manifiesta la absorción de humedad por parte del aire al entrar en contacto con el agua nebulizada.

Posteriormente, el aire húmedo se dirige hacia S4, donde se enfría en el condensador. En el punto de muestreo 7, a la salida del condensador, las temperaturas de bulbo seco y húmedo descienden a valores cercanos a 14.3°C y 14.1°C, respectivamente, y la humedad relativa alcanza un 98.1%, dando un aire cercano a saturación. La humedad absoluta en este punto también disminuye a 0.0130 kg/kg, lo cual es indicativo de que parte del vapor de agua se condensa y es removido del aire.

Este patrón de medición se puede observar de manera gráfica (ver Figura) y se replicó en cada uno de los experimentos realizados, permitiendo una evaluación consistente de las condiciones termofísicas en cada punto de muestreo. En general, los resultados muestran que el calentamiento adiabático aumenta la

capacidad del aire para retener vapor de agua, mientras que el proceso de humidificación incrementa significativamente la humedad absoluta, y el condensador permite reducir la cantidad de vapor al enfriar el aire a niveles próximos a la saturación.

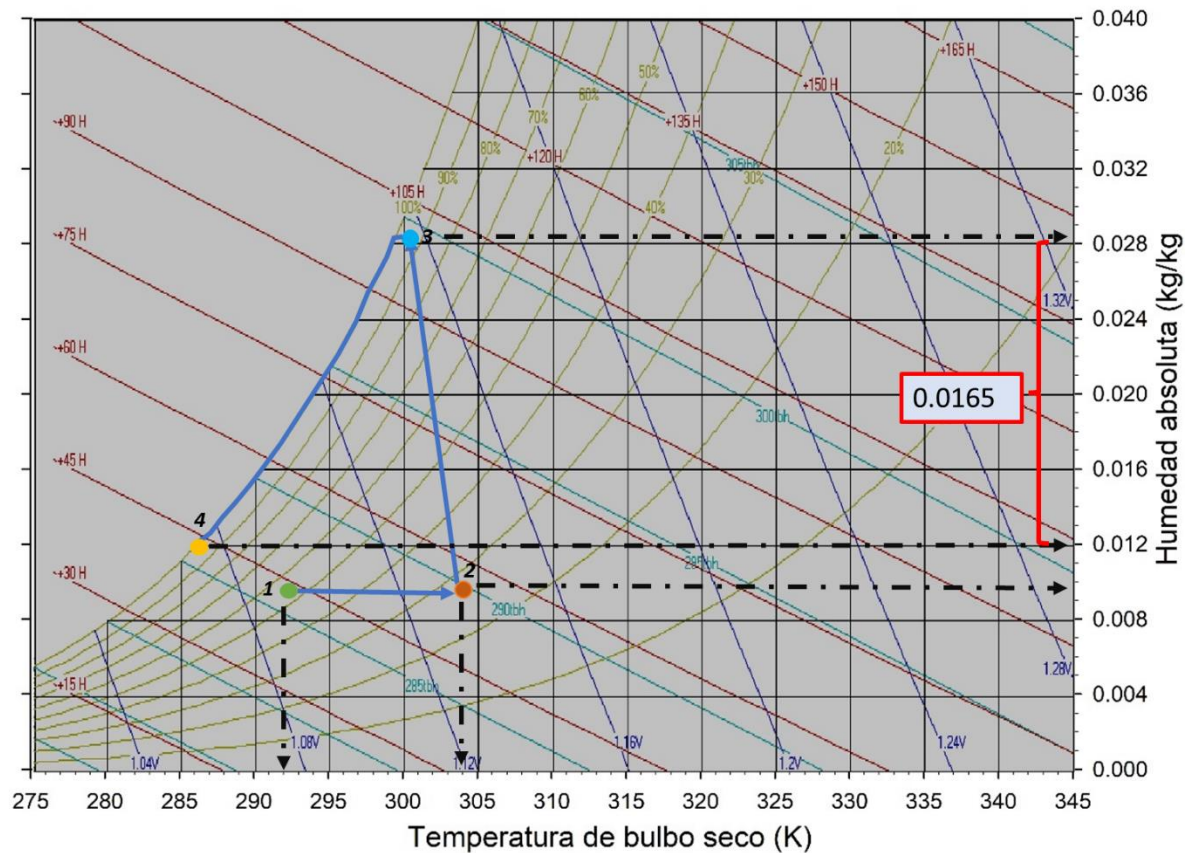


Figura 5 Diagrama Psicrométrico del Patrón de Medición de Humedad y Temperatura en el Sistema HDH.

3.3.3. Parametrización de la operación del sistema HDH

En la parametrización del sistema HDH, analizando los subsistemas involucrados en la operación de calentamiento de aire y agua salobre. Los coeficientes globales de transferencia de calor (U_1) y la carga térmica (Q_1) en el subsistema S1, encargado del calentamiento del aire. Los valores de la carga térmica alcanzaron un rango que vario entre 37.44 W a 704.35 W, mientras que los coeficientes de transferencia de calor oscilaron entre 0.36 W/m²K y 8.01 W/m²K, evidenciando la dependencia de ambos parámetros con respecto al flujo másico

y las condiciones de operación. Estos infieren que a un mayor flujo másico se tiende a mejorar la eficiencia del sistema, alcanzándose la mayor eficiencia (54.72%) en condiciones de mayor carga térmica (Anexo B).

En el subsistema S2, se calentó el agua salobre, aquí de igual manera como con el subsistema S1, se obtuvieron eficiencias de calentamiento cuando se vario la temperatura del agua en tres niveles (40°C, 55°C, y 70°C) y observando la influencia de diferentes tasas de flujo de agua. La carga térmica (Q_2) presentó valores que variaron entre 153.04 W y 7270.71 W, mientras que los coeficientes de transferencia de calor (U_2) oscilaron entre 7.65 W/m²K y 363.54 W/m²K. Los resultados revelan que la eficiencia del calentamiento en el subsistema S2 depende de la temperatura y el flujo del agua salobre, observándose un mejor rendimiento del sistema cuando se aplican mayores valores en ambos parámetros.

Los datos detallados se presentan en el Anexo C, mostrando el comportamiento del subsistema 2 para operar en condiciones variables y destacando la influencia de los parámetros de flujo y temperatura en la eficiencia.

Además, se presentan los datos de flujo másico de agua en el subsistema de Humidificación el sistema HDH, expresados como m_6 (kg/s) y la cantidad de agua evaporada (m_{evap} , kg/s) con valores que oscilan entre 0.029 y 0.101 kg/s para m_6 y 2.053 y 7.323 kg/h para m_{evap} . Se observa que, a mayores tasas de flujo másico, aumenta la cantidad de agua en estado vapor. De igual manera, el subsistema de deshumidificación, el flujo másico de agua (m_7 , kg/s) varía entre 0.001 kg/s y 0.029 kg/s, mientras que la cantidad de agua condensada (m_{cond} , kg/s) se encuentra entre 0.056 kg/h y 1.304 kg/h, mostrando una relación directa entre ambos parámetros.

Finalmente, los valores de carga térmica (Q_5) y del coeficiente global de transferencia de calor (U_5) reflejan la variabilidad de la absorción y liberación de

calor en el sistema HDH, con Q_5 variando de -2099.3 W a 1152.6 W, y U_5 entre -313.3 W/m²K y 659 W/m²K, evidenciando el impacto de las condiciones de operación en la eficiencia del condensador (Anexo D).

3.3.4. Análisis estadístico del sistema HDH

Análisis estadístico del flujo de agua evaporada (Fae).

El análisis de Pareto realizado nos sirvió para identificar los factores con mayor impacto en el flujo de agua evaporada (Fae), representado en la Figura . Se puede observar que el flujo de agua nebulizada (x_3), la frecuencia del ventilador (x_4) y la temperatura del serpentín (x_6) son los factores con efectos más significativos en Fae, con impactos positivos. En diferencia, la temperatura del agua nebulizada (x_2) presenta un efecto negativo menor. Sin embargo, el modelo final seleccionado mediante un análisis de regresión paso a paso, basado en el criterio de información de Akaike (AIC), incluyó los factores x_2 , x_3 y x_4 , mostrando un R^2 ajustado de 0.75, lo que indica que este modelo explica aproximadamente el 70% de la variabilidad en Fae. Este ajuste final sugiere que, aunque x_2 tiene una contribución negativa en el gráfico de Pareto, su inclusión en el modelo de regresión permite capturar interacciones con x_3 y x_4 , mejorando la predicción del flujo de agua evaporada.

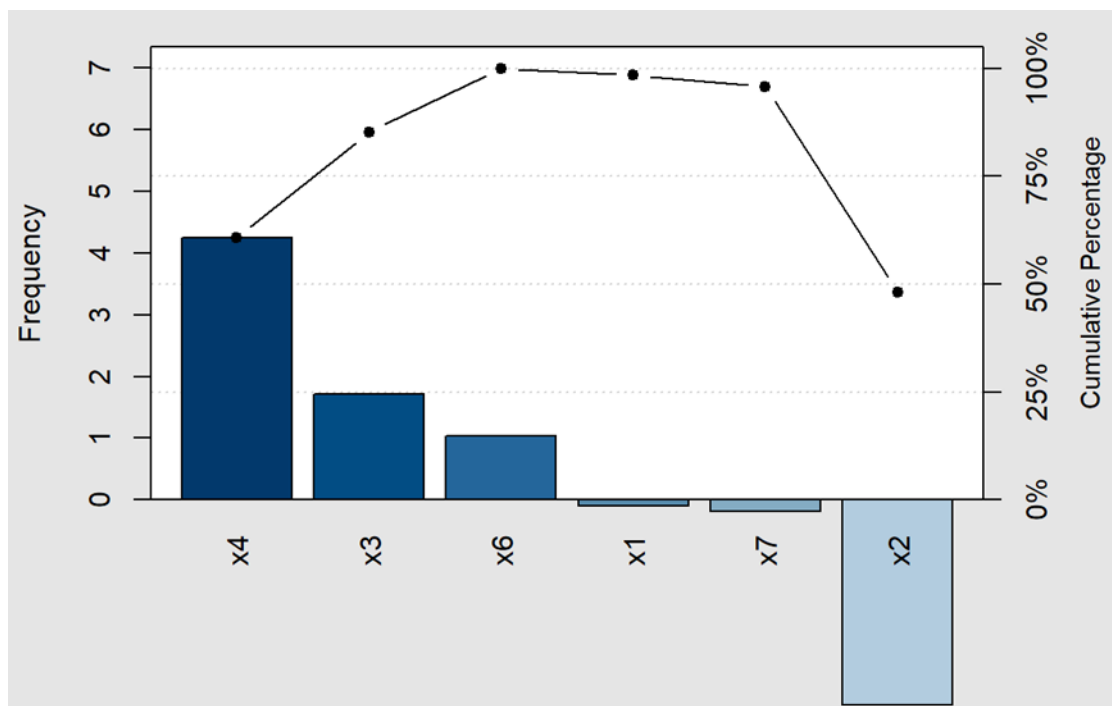


Figura 6 Grafico de Pareto de efectos estandarizados para flujo de agua evaporada (Fae).

Los coeficientes obtenidos para x2 ($-5.048e-04$), x3 ($2.161e-04$) y x4 ($4.927e-04$) reflejan la dirección y magnitud del impacto de cada variable en Fae, todos ellos con significancia estadística ($p < 0.05$). En particular, el coeficiente negativo de x2 ($-5.048e-04$) indica que un aumento en la temperatura del agua nebulizada reduce Fae, probablemente debido a la disminución en el gradiente de temperatura entre el aire y el agua. Por otro lado, los coeficientes positivos de x3 ($2.161e-04$) y x4 ($4.927e-04$) sugieren que incrementar tanto el flujo de agua nebulizada como la frecuencia del ventilador favorece el aumento en Fae. Esto implica que un mayor flujo de agua nebulizada proporciona más cantidad y superficie de contacto para la evaporación, mientras que una mayor frecuencia del ventilador facilita el transporte de vapor, optimizando así el proceso de humidificación. En conjunto, estos hallazgos sugieren que ajustar estos factores podría mejorar significativamente el rendimiento de evaporación en el sistema HDH. Esto resalta que, si bien el análisis de Pareto es útil para explorar los

efectos individuales de los factores, el modelo de regresión permite seleccionar las combinaciones óptimas de variables al considerar tanto sus efectos individuales como las interacciones, logrando así una representación robusta del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas.

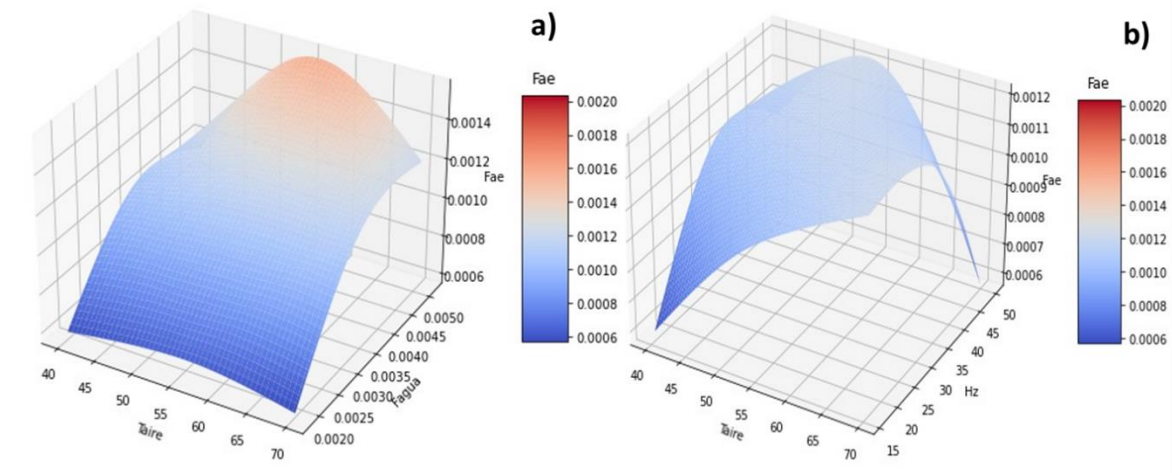


Figura 7 Superficies de respuesta del flujo de agua evaporada (Fae) en función de la temperatura del aire, flujo de agua nebulizada y frecuencia del ventilador.

Las gráficas de superficie de respuesta presentadas en la Figura (a) y (b) muestran la influencia de las variables de temperatura del aire (Taire), flujo de agua nebulizada (Fagua) y frecuencia del ventilador (Hz) sobre el flujo de agua evaporada (Fae) en el sistema HDH.

En la Figura (a), que analiza la relación entre Taire y Fagua, se observa que el flujo de agua evaporada aumenta hasta cierto punto con el incremento de ambas variables, pero después comienza a descender. Esto sugiere que, aunque una combinación de alta temperatura del aire y flujo de agua favorece inicialmente la evaporación, existe un límite en el que el sistema alcanza una saturación y el incremento adicional de estos factores reduce la eficiencia de evaporación, probablemente debido a que el aire se satura más rápido de lo que puede evacuar la humedad.

En la Figura (b), que muestra la interacción entre la temperatura del aire y la frecuencia del ventilador (Hz), se observa un comportamiento similar: el flujo de agua evaporada aumenta hasta cierto nivel con la frecuencia y temperatura del aire, pero al superar esos valores óptimos, F_{ae} disminuye. Este patrón indica que, aunque la ventilación rápida contribuye a la evaporación al principio, una velocidad excesiva podría provocar una disminución en la eficiencia debido a la reducción del tiempo de contacto entre el aire y el agua nebulizada o la saturación rápida del aire.

Análisis estadístico del flujo de agua condensada (F_{ac})

Para identificar los factores que influyen en el flujo de agua condensada (F_{ac}), se realizó un análisis de regresión paso a paso, empleando el criterio de información de Akaike (AIC) para seleccionar el modelo óptimo. El modelo final incluyó tres factores: la temperatura del aire (x_1), la frecuencia del ventilador (x_4) y la temperatura del serpentín (x_6), con un R^2 ajustado de 0.5782. Este valor indica que el modelo explica aproximadamente el 57.8% de la variabilidad en F_{ac} . El coeficiente obtenido para la frecuencia del ventilador (x_4) fue positivo y significativo ($p < 0.01$), lo que sugiere que un incremento en este factor aumenta el flujo de agua condensada. Aunque los efectos de la temperatura del aire (x_1) y la temperatura del serpentín (x_6) también contribuyen, su significancia estadística es menor, especialmente en el caso de x_1 .

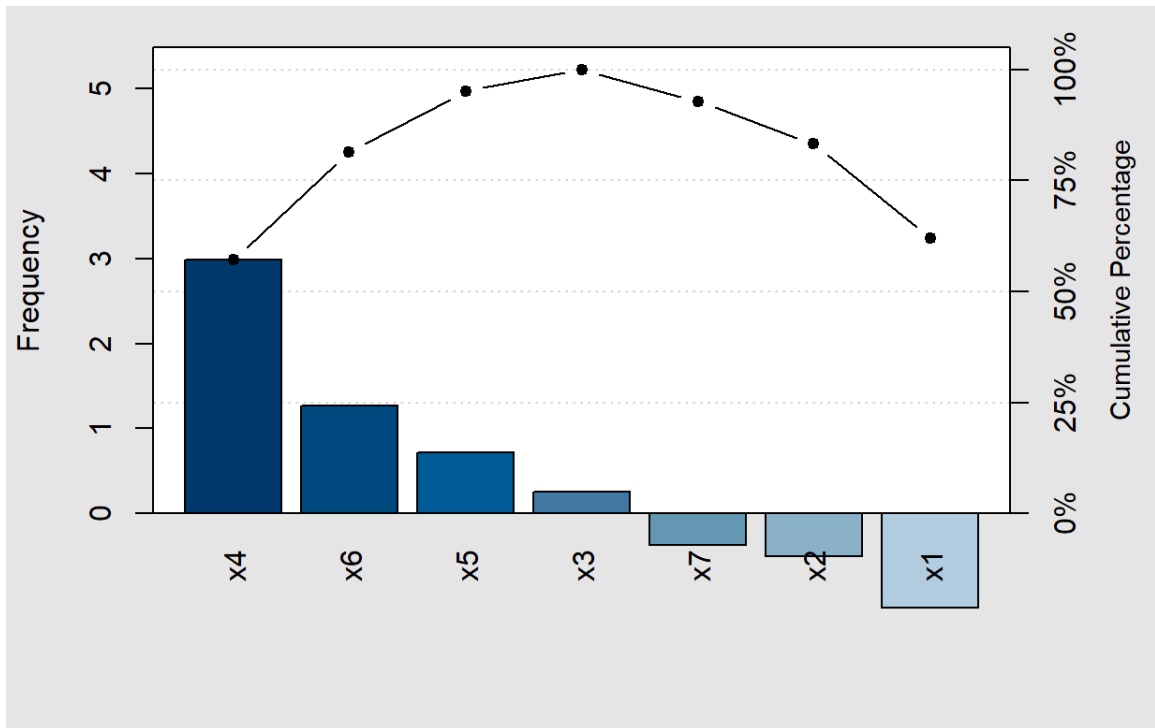


Figura 8 Grafico de Pareto de efectos estandarizados para flujo de agua evaporada (Fae).

El análisis de Pareto, representado en la Figura , muestra que los factores x4 y x6 tienen los efectos más significativos y positivos en Fac, representando conjuntamente un alto porcentaje de variabilidad explicada. En cambio, la variable x1 presenta un efecto negativo moderado, lo que sugiere que un aumento en la temperatura del aire podría reducir Fac bajo ciertas condiciones operativas. Este análisis permite concluir que, aunque los modelos de regresión detallan interacciones complejas entre factores, el análisis de Pareto proporciona una visión general del impacto individual de cada variable, facilitando la identificación de los factores clave en el comportamiento del sistema HDH.

En la Figura se presentan las superficies de respuesta para el flujo de agua condensada (Fac) en el sistema HDH. En la Figura (a), que muestra la relación entre la temperatura del aire (Taire) y el flujo de agua nebulizada (Fagua), se observa un incremento en Fac al aumentar ambos factores hasta un punto de saturación. A medida que la temperatura del aire y el flujo de agua alcanzan

niveles altos, F_{ac} muestra una tendencia a estabilizarse, lo que sugiere que una combinación óptima de estas variables puede maximizar la condensación sin un aumento continuo en la eficiencia (Figura a).

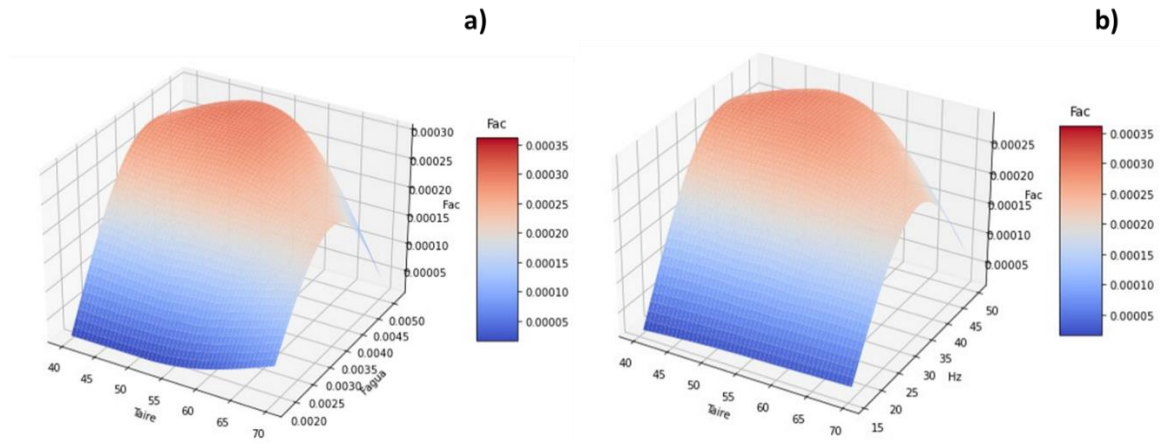


Figura 9 Superficies de respuesta del flujo de agua condensada (F_{ac}) en función de (a) temperatura del aire y flujo de agua nebulizada, y (b) temperatura del aire y frecuencia del ventilador.

En la Figura (b), que analiza la interacción entre la temperatura del aire (T_{aire}) y la frecuencia del ventilador (Hz), se identifica un comportamiento similar. Un aumento en ambos factores incrementa el flujo de agua condensada hasta un límite, más allá del cual el impacto es menor. Este patrón indica que, aunque la frecuencia del ventilador favorece el proceso de condensación, existe un umbral en el que el beneficio adicional es mínimo. Estos resultados sugieren que el control preciso de la temperatura del aire junto con el ajuste del flujo de agua y la frecuencia del ventilador puede optimizar la producción de agua condensada en el sistema.

3.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran la efectividad del sistema HDH para la producción de agua dulce a partir de agua salobre, destacando que las condiciones operativas de flujo de aire, flujo de agua, y temperaturas específicas juegan un papel determinante en la eficiencia del

proceso. A través de un análisis de balance de materia y energía en estado estacionario, se logró cuantificar las interacciones térmicas y de masa en cada subsistema, permitiendo una estimación de los factores que inciden en los flujos de evaporación y condensación bajo distintas condiciones operativas. Este análisis primario se complementó con el uso de técnicas estadísticas, específicamente el análisis de Pareto y modelos de regresión, que permitieron identificar los factores de mayor influencia en los flujos de agua evaporada y agua condensada.

En relación con el Fae, los factores más significativos identificados fueron el flujo de agua nebulizada, la frecuencia del ventilador y la temperatura del serpentín. Estos factores proporcionan una dirección para optimizar el proceso de humidificación, lo cual demuestra que el control preciso de estas variables es esencial para maximizar la eficiencia del sistema; de no implementarse, dichas eficiencias disminuirán de manera poco productiva. Cabe destacar que, aunque la temperatura del agua nebulizada presenta un efecto negativo sobre Fae, su inclusión en el modelo de regresión final es beneficiosa, ya que aumenta la precisión de la predicción. Desde una perspectiva física, mantener una diferencia térmica adecuada entre la temperatura del agua y la del aire o ajustar el flujo de aire podría optimizar el rendimiento del sistema. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que subrayan la importancia de estas variables en el control del proceso y resaltan las oportunidades de investigación orientadas a su optimización, lo cual resulta crítico en sistemas complejos como el HDH.

Por otro lado, en el caso de Fac, se observó un patrón similar, donde la frecuencia del ventilador y la temperatura del serpentín se destacan como los factores de mayor impacto en la condensación, reafirmando la importancia de estas variables en la transferencia de calor y masa en sistemas de deshumidificación. La identificación de un umbral en el que los aumentos en la frecuencia del ventilador y la temperatura del aire dejan de mejorar la eficiencia subraya la importancia de implementar un control preciso sobre estos parámetros, a fin de evitar la saturación del sistema y optimizar la productividad de agua en sistemas HDH.

Las superficies de respuesta corroboran que existen configuraciones óptimas en las cuales los incrementos de eficiencia son máximos antes de estabilizarse. Los resultados obtenidos en este estudio no solo permiten entender los factores clave en el desempeño del sistema HDH, sino que también abren oportunidades de optimización mediante ajustes específicos en su diseño. En este sentido, la identificación de un límite operativo en la capacidad de condensación indica que, con un modelado matemático complementado por la validación física del sistema, se pueden plantear integraciones estratégicas, tales como la optimización del condensador y el ajuste del número de boquillas de nebulización. Dichas mejoras contribuirían a maximizar el potencial del sistema HDH, aumentando su eficiencia y adaptabilidad en aplicaciones de desalinización de agua.

De manera conjunta, estos hallazgos sugieren que el rendimiento del sistema HDH puede incrementarse significativamente mediante la implementación de un control adaptativo de las variables operativas, estableciendo así una base sólida para estudios futuros que busquen mejorar y escalar esta tecnología. La implementación de sistemas de control dinámicos que ajusten dichas variables representa un avance clave hacia una mayor eficiencia energética y productiva del sistema, especialmente bajo condiciones operativas cambiantes. Estos resultados no solo contribuyen al conocimiento técnico de los sistemas HDH, sino que también tienen implicaciones prácticas importantes en zonas rurales, donde el acceso al agua potable es limitado y una desalinización efectiva y económica es crucial.

3.5. Literatura citada

- Ahmed, H. A., Ismail, I. M., Saleh, W. F., & Ahmed, M. (2017). Experimental investigation of humidity ratio-dehumidification desalination system with corrugated packing in the humidifier. *Desalination*, 410, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.036>
- Choukai, O., & Zejli, D. (2021). Modeling of seawater greenhouse by a block diagram environment program and an equations solver program and simulations on different moroccan locations. *Desalination and Water*

- Treatment*, 240, 203–209. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27703>
- Eder, E., Cordin, M., Pham, T., Brüggemann, D., & Preißinger, M. (2023). An experimental study of oily wastewater treatment in a humidification–dehumidification system with bubble column humidifier. *Thermal Science and Engineering Progress*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101578>
- Fares, M. N., Al-Mayyahi, M. A., Rida, M. M., & Najim, S. E. (2019). Water Desalination Using a New Humidification-Dehumidification (HDH) Technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1279(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1279/1/012052>
- Felder, R. M., Rousseau, R. W., & Bullard, L. G. (2020). *Elementary principles of chemical processes*. John Wiley & Sons.
- Garcia, J., Hahn, F., Valle, S., & Carillo, M. (2023). Residual and desalination water treatments using HDH process- a review for potential use in mome gardens. *Advances in Robotics & Mechanical Engineering*, 4(1), 492–498. <https://doi.org/10.32474/ARME.2023.04.000177>
- Green, D. W. (2008). *Perry's chemical engineers' Handbook—seventh Edition*.
- Guler, E., Ozakdag, D., & Arda, M. (2010). Effect of temperature on seawater desalination-water quality analyses for desalinated seawater for its use as drinking and irrigation water. *Environ Geochem Health*, 32, 335–339. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9294-x>
- He, W. F., Xu, L. N., & Han, D. (2016). Parametric analysis of an air-heated humidification-dehumidification (HDH) desalination system with waste heat recovery. *Desalination*, 398, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.07.016>
- Jones, E., Qadir, M., Vliet, M. T. H. Van, Smakhtin, V., & Kang, S. (2019). Science of the Total Environment The state of desalination and brine production : A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343–1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
- Kabeel, A. E., & El-Said, E. M. S. (2014). A hybrid solar desalination system of air humidification, dehumidification and water flashing evaporation: Part II. Experimental investigation. *Desalination*, 341(1), 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.035>
- Khairat Dawood, M. M., Amer, A., Teamah, M. A., Aref, A., & Mansour, T. (2021). Experimental investigation of two-stage humidification-dehumidification desalination system integrated with an innovative oxy-hydrogen (HHO) system. *International Journal of Energy Research*, 45(6), 9116–9140. <https://doi.org/10.1002/er.6442>
- Khraisheh, M., Inamdar, M., Almomani, F., & Adham, S. (2022). Humidification–Dehumidification (HDH) Desalination and Other Volume Reduction Techniques for Produced Water Treatment. *Water (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/w14010060>
- Lawal, D., Antar, M., Khalifa, A., Zubair, S., & Al-Sulaiman, F. (2018). Humidification-dehumidification desalination system operated by a heat pump. *Energy Conversion and Management*, 161(September 2017), 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.067>
- Lu, Y., He, W., Zhou, X., An, H., Chen, J., & Han, D. (2022). Design Analysis of a Solar-Powered Water Desalination System Using Humidification

- Dehumidification for Continuous Water Production. *Sustainability (Switzerland)*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/su14116860>
- McGovern, R. K., Thiel, G. P., Narayan, G. P., Zubair, S. M., & V, J. H. L. (2013). Performance limits of zero and single extraction humidification-dehumidification desalination systems. *Applied Energy*, 102, 1081–1090. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.025>
- Mora, J. L., Herrero, J., & Weindorf, D. C. (2017). Multivariate analysis of soil salination-desalination in a semi-arid irrigated district of Spain. *Geoderma*, 291, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.12.018>
- Nabil, I., Abdalla, A. M., Mansour, T. M., Shehata, A. I., & Dawood, M. M. K. (2023). Salinity impacts on humidification dehumidification (HDH) desalination systems: review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(2), 1907–1925. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31327-5>
- Narayan, G. P., Sharqawy, M. H., Summers, E. K., Lienhard, J. H., Zubair, S. M., & Antar, M. A. (2010). The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1187–1201. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.014>
- Rajaseenivasan, T., Shanmugam, R. K., Hareesh, V. M., & Srihar, K. (2016). Combined probation of bubble column humidification dehumidification desalination system using solar collectors. *Energy*, 116, 459–469. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.127>
- Roslan, S. N. A. B., Alias, N. H., Othman, N. H., Aziz, M. H. A., Marpani, F., Mat-Shayuti, M. S., Shahrudin, M. Z., & Djokokusworo, T. (2022). Application of response surface methodology for modelling of direct contact membrane distillation system: a review. *Desalination and Water Treatment*, 257(September 2021), 169–184. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.28015>
- Singh, D., Tangellapalli, S., & Kukreja, R. (2023). Performance Investigation of the Ejector Humidification Dehumidification (EHD) Cycle for Fresh Water and Cooling Generation. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 285, 357–367. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5077-3_29
- Soomro, S. H., Santosh, R., Bak, C.-U., Kim, W.-S., & Kim, Y.-D. (2021). Humidification-dehumidification desalination system powered by simultaneous air-water solar heater. *Sustainability*, 13(23), 13491. <https://doi.org/10.3390/su132313491>
- Thiel, G. P., Miller, J. A., Zubair, S. M., & Lienhard, J. H. (2013). Effect of mass extractions and injections on the performance of a fixed-size humidification-dehumidification desalination system. *Desalination*, 314, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.12.025>
- Tiwari, A., & Kumar, A. (2023). A comprehensive review on solar thermal desalination systems based on humidification-dehumidification approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(7), 2075–2097. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02517-z>

5 CONCLUSIONES GENERALES

Este estudio demuestra la viabilidad y efectividad de los sistemas de humidificación-deshumidificación (HDH) como una alternativa sostenible para la desalinización de agua salobre, especialmente en contextos rurales con recursos hídricos limitados. A través de una revisión exhaustiva y un análisis bibliométrico, se exploraron las tendencias de investigación, subrayando el interés creciente en HDH como solución para el estrés hídrico mundial. Los resultados experimentales y el modelado predictivo del sistema evidenciaron los factores de mayor peso, como el flujo de agua nebulizada, la frecuencia del ventilador y la temperatura del serpentín son determinantes tanto en el flujo de agua evaporada (Fae) como en el flujo de agua condensada (Fac). Los modelos predictivos obtenidos, con coeficientes R^2 de 0.75 para Fae y 0.578 para Fac, reflejaron una capacidad considerable para predecir y optimizar estos flujos, lo cual resulta clave para mejorar la eficiencia de estos sistemas. Asimismo, la aplicación de principios psicrométricos y el balance de materia y energía permitieron cuantificar las interacciones térmicas y de masa en cada subsistema, facilitando la identificación de configuraciones óptimas en las cuales el incremento de eficiencia es máximo antes de estabilizarse. Las observaciones realizadas destacan la importancia de un control preciso y adaptativo sobre variables operativas para evitar la saturación del sistema y optimizar la producción de agua. Es de importancia implementar mejoras estratégicas como el ajuste en el número de boquillas de nebulización y la optimización del condensador, es posible maximizar el potencial de los sistemas HDH, con un bajo impacto ambiental y una alta adaptabilidad a contextos de recursos limitados.

ANEXOS

Anexo A Mediciones psicométricas obtenidas en las pruebas de los sistemas HDH, en relación con el número de sistema

#	Estado	Tbs	Tbh	Hr	Ha	Cp	h	v	Troc
1	1	20.2	14.3	56.8	0.0109	1025.3	47733.9	1.1026	11.3808
	2	31.7	17.7	28.9	0.0110	1025.5	59580.3	1.1459	11.4605
	6	28.5	27.9	95.9	0.0313	1060.5	106535.6	1.1703	27.7784
	7	14.3	14.1	98.1	0.0130	1028.9	46941.0	1.0840	14.0084
2	1	20.1	15.1	62.7	0.0120	1027.2	50320.9	1.1041	12.7856
	2	34.5	20.1	30.5	0.0136	1030.0	68985.8	1.1612	14.6652
	6	23.1	22.8	97.7	0.0229	1045.9	80199.6	1.1345	22.7180
	7	15.2	15.3	100.9	0.0142	1031.0	50824.4	1.0894	15.3427
3	1	17.8	13.9	68.7	0.0114	1026.1	46418.8	1.0943	11.9831
	2	63.2	27.1	8.2	0.0155	1034.1	103214.8	1.2734	16.6651
	6	38.5	37.8	95.9	0.0570	1104.7	179804.8	1.2565	37.7220
	7	21.7	21.5	98.4	0.0211	1042.8	74399.0	1.1260	21.4411
4	1	21.8	16.1	59.6	0.0127	1028.3	53719.0	1.1117	13.6011
	2	62.3	27.6	9.4	0.0171	1036.7	106156.9	1.2730	18.1133
	6	31.3	24.4	59.9	0.0227	1045.6	88212.5	1.1655	22.5866
	7	20.9	20.7	98.4	0.0201	1041.0	70994.7	1.1211	20.6382
5	1	17.5	13.4	67.0	0.0109	1025.2	44864.0	1.0923	11.3120
	2	44.4	22.5	18.2	0.0138	1030.5	79519.1	1.1989	14.8456
	6	29.7	29.4	98.0	0.0345	1065.9	115497.5	1.1806	29.3446
	7	20.6	21.1	104.1	0.0209	1042.4	72641.9	1.1214	21.2503
6	1	20.4	16.5	70.5	0.0138	1030.3	55060.5	1.1083	14.8747
	2	47.8	23.1	15.0	0.0135	1030.1	82328.5	1.2112	14.5490
	6	35.6	34.9	95.7	0.0479	1089.1	154583.6	1.2282	34.8067
	7	19.5	19.1	96.7	0.0180	1037.5	64541.2	1.1123	18.9637
7	1	20.9	15.5	60.7	0.0122	1027.5	51666.0	1.1075	13.0496
	2	52.8	25.0	13.1	0.0152	1033.2	91772.9	1.2334	16.3691
	6	28.3	26.0	84.7	0.0272	1053.3	96137.6	1.1621	25.4714
	7	18.6	18.6	100.0	0.0176	1036.8	62591.8	1.1081	18.6001
8	1	16.3	12.5	68.3	0.0103	1024.2	42128.2	1.0868	10.4593
	2	35.5	18.4	22.3	0.0105	1024.6	62119.6	1.1592	10.7285
	6	26.9	26.5	97.2	0.0288	1056.1	98674.7	1.1596	26.4121
	7	15.7	15.9	101.8	0.0149	1032.0	52840.3	1.0924	15.9821
9	1	16.6	12.9	69.3	0.0106	1024.8	43326.7	1.0885	10.9671
	2	63.0	26.8	8.0	0.0149	1033.0	101489.7	1.2714	16.0616
	6	31.3	30.0	91.6	0.0354	1067.4	119375.4	1.1884	29.7663
	7	22.7	23.0	102.3	0.0234	1046.8	81082.3	1.1339	23.0809
10	1	21.6	15.7	58.1	0.0122	1027.5	52354.1	1.1101	13.0374
	2	45.0	23.5	19.6	0.0154	1033.3	84241.2	1.2043	16.5580
	6	34.5	31.4	81.6	0.0379	1071.7	128820.0	1.2055	30.8824
	7	19.8	17.3	80.4	0.0152	1032.6	57863.5	1.1085	16.3265
11	1	21.8	15.3	54.6	0.0116	1026.5	51019.5	1.1098	12.2607
	2	52.2	23.5	11.1	0.0125	1028.5	84217.6	1.2258	13.3443
	61	27.8	26.3	89.8	0.0280	1054.7	97681.2	1.1616	25.9634

	7	18.9	18.9	100.0	0.0180	1037.4	63744.7	1.1098	18.9001
12	1	20.5	14.3	55.2	0.0108	1025.1	47739.7	1.1035	11.2169
	2	51.4	23.6	12.0	0.0130	1029.3	84715.8	1.2238	13.9613
	6	30.3	29.0	91.5	0.0333	1063.8	113133.3	1.1807	28.7520
	7	15.5	15.5	100.0	0.0144	1031.3	51496.1	1.0908	15.5001
13	1	16.3	12.5	68.3	0.0103	1024.2	42128.2	1.0868	10.4593
	2	50.6	23.5	12.7	0.0131	1029.5	84235.8	1.2211	14.1166
	6	29.4	28.8	95.9	0.0331	1063.5	111854.5	1.1770	28.6847
	7	21.9	21.8	99.2	0.0216	1043.6	75700.9	1.1276	21.7712
14	1	22.8	14.8	46.7	0.0105	1024.6	49391.2	1.1117	10.8353
	2	37.0	19.5	22.8	0.0116	1026.7	66563.1	1.1670	12.2919
	6	31.0	29.5	90.3	0.0342	1065.5	116236.9	1.1852	29.2219
	7	17.3	16.8	95.7	0.0155	1033.1	55995.1	1.0995	16.6043
15	1	22.6	15.8	53.5	0.0120	1027.1	52714.3	1.1134	12.7096
	2	60.7	27.0	9.7	0.0163	1035.4	102669.5	1.2655	17.4399
	6	37.1	28.2	54.3	0.0287	1055.9	108940.1	1.1987	26.3252
	7	20.8	20.3	96.0	0.0194	1039.9	69352.5	1.1197	20.1412
16	1	22.0	16.8	63.0	0.0136	1029.9	56158.0	1.1140	14.6359
	2	38.0	21.0	25.3	0.0137	1030.3	72806.0	1.1746	14.7729
	6	28.9	29.0	100.7	0.0338	1064.7	11300.0	1.1763	29.0191
	7	21.3	21.3	100.6	0.0211	1042.7	73822.0	1.1244	21.3909
17	1	22.0	17.3	66.2	0.0143	1031.1	57938.0	1.1153	15.4178
	2	64.0	28.2	9.0	0.0178	1038.0	10975.0	1.2809	18.7604
	6	29.8	27.5	83.8	0.0295	1057.2	10327.0	1.1719	26.7677
	7	23.6	23.6	100.0	0.0242	1048.1	83915.0	1.1387	23.6001
18	1	21.3	16.5	65.0	0.0135	1029.6	55087.0	1.1111	14.4749
	2	50.5	22.9	11.6	0.0120	1027.5	81186.0	1.2151	12.7576
	6	27.6	27.4	98.6	0.0305	1059.1	10364.0	1.1654	27.3585
	7	21.1	20.4	94.5	0.0195	1040.0	69775.0	1.1209	20.1785

Anexo B: Parametrización del calentamiento del aire

#	m	Q1	η_1	U1
1	0.003161	37.44	2.91	0.36
2	0.013432	250.71	19.48	2.44
3	0.003161	179.50	13.94	2.01
4	0.013432	704.35	54.72	8.01
5	0.007901	273.82	21.27	2.76
6	0.003161	86.18	6.70	0.90
7	0.013432	538.72	41.85	5.78
8	0.007901	157.96	12.27	1.52
9	0.007901	459.56	35.70	5.09
10	0.003161	100.78	7.83	1.04
11	0.013432	445.92	34.64	4.79
12	0.007901	292.16	22.70	3.11
13	0.007901	332.70	25.85	3.45
14	0.003161	54.27	4.22	0.54
15	0.013432	671.00	52.13	7.59
16	0.013432	223.62	17.37	2.24
17	0.013432	695.91	54.06	8.00
18	0.013432	351.57	27.31	3.74

Anexo C: Parametrización del calentamiento de agua salobre

#	m	Q2	η_2	U2
1	0.00183	153.04	11.38	7.65
2	0.00513	1071.80	79.72	53.59
3	0.00513	429.02	31.91	21.45
4	0.00183	382.34	28.44	19.12
5	0.0348	5090.09	378.60	254.50
6	0.0348	2910.31	216.47	145.52
7	0.0348	7270.71	540.80	363.54
8	0.0348	5090.09	378.60	254.50
9	0.0348	5090.09	378.60	254.50
10	0.00183	267.67	19.91	13.38
11	0.00513	750.35	55.81	37.52
12	0.0348	5090.09	378.60	254.50
13	0.0348	5090.09	378.60	254.50
14	0.00513	750.35	55.81	37.52
15	0.00183	267.67	19.91	13.38
16	0.00513	643.25	47.84	32.16
17	0.00183	229.46	17.07	11.47
18	0.0348	4363.54	324.56	218.18

Anexo D: Datos de flujo másico, carga térmica y eficiencia en los subsistemas de evaporación y condensación del sistema HDH

m6 kg/s	mevap kg/h	m7 kg/s	mcond kg/h	Q5	U5
0.029007	2.1242	0.00085	0.0562	50.883	3.1
0.101201	3.3762	0.02853	0.8878	838.01	59.2
0.029007	4.3273	0.00085	0.1102	14.701	1.46
0.101201	2.053	0.02853	0.2706	491.19	193
0.056939	4.2431	0.01868	0.9163	800.7	63.3
0.029007	3.5921	0.00085	0.0919	76.88	2.79
0.101201	4.3528	0.02853	0.9832	956.99	51.9
0.056939	3.7609	0.01868	0.9388	856.36	659
0.056939	4.1916	0.01868	0.8047	715.46	49.3
0.029007	2.3425	0.00085	0.0697	60.584	4.14
0.101201	5.6639	0.02853	1.0343	968.13	52.8
0.056939	4.153	0.01868	1.2692	1151.6	397
0.056939	4.0975	0.01868	0.7778	675.48	-23
0.029007	2.3599	0.00085	0.0577	51.436	2.69
0.101201	4.4891	0.02853	0.9467	1129.3	68.7
0.101201	7.3229	0.02853	1.3043	-1783.6	-88.7
0.101201	4.2626	0.02853	0.5443	-2099.3	-313
0.101201	6.74	0.02853	1.1297	-1694.9	-87.6

Anexo E: Código para el análisis de regresión, modelos de primer orden y gráfico de Pareto

```
endlibrary(rsm)

# Crear el data.frame con los nuevos datos
datos_experimento <- data.frame(
  Taire = c(40, 40, 70, 70, 55, 55, 55, 40, 70, 55, 55, 55, 55, 40, 70,
40, 70, 55),
  Tagua = c(40, 70, 40, 70, 55, 40, 70, 55, 55, 55, 55, 55, 55, 55, 55,
55, 55, 55),
  Fagua = c(0.00183, 0.00513, 0.00513, 0.00183, 0.00348, 0.00348,
0.00348, 0.00348, 0.00183, 0.00513, 0.00348, 0.00348, 0.00513,
0.00183, 0.00513, 0.00183, 0.00348),
  Hz = c(16, 50, 16, 50, 33, 16, 50, 33, 33, 16, 50, 33, 33, 16, 50, 50,
50, 50),
  Tcond = c(5, 5, 20, 20, 12.5, 12.5, 5, 20, 12.5, 12.5, 5, 20, 12.5, 5,
12.5, 5, 20, 5),
  Tserp = c(40, 70, 70, 40, 55, 55, 55, 55, 55, 55, 55, 55, 55, 40, 70,
70, 40, 55),
  Fserp = c(0.00667, 0.013, 0.00667, 0.013, 0.009835, 0.009835, 0.009835,
0.00667, 0.013, 0.009835, 0.009835, 0.009835, 0.009835, 0.00667, 0.013,
0.013, 0.013, 0.009835),
  Fae = c(0.000590, 0.000938, 0.001202, 0.000570, 0.001179, 0.000998,
0.001209, 0.001045, 0.001164, 0.000651, 0.001573, 0.001154, 0.001138,
0.000656, 0.001247, 0.002034, 0.001184, 0.001872),
  Fac = c(0.000016, 0.000247, 0.000031, 0.000075, 0.000255, 0.000026,
0.000273, 0.000261, 0.000224, 0.000019, 0.000287, 0.000353, 0.000216,
0.000016, 0.000263, 0.000362, 0.000151, 0.000314)
)

# Codificar las variables adicionales al intervalo [-1, 0, 1]
datos_experimento <- coded.data(
  data = datos_experimento,
  x1 ~ (Taire - 55) / 15,          # Codificación de Taire (con rango de
40 a 70°C)
  x2 ~ (Tagua - 55) / 15,          # Codificación de Tagua (con rango de
40 a 70°C)
  x3 ~ (Fagua - 0.00348) / (0.00165), # Codificación de Fagua (rango de
0.00183 a 0.0348)
  x4 ~ (Hz - 33) / 17,             # Codificación de Hz (rango de 16 a
50 Hz)
  x5 ~ (Tcond - 12.5) / 7.5,       # Codificación de Tcond (rango de 5
a 20°C)
  x6 ~ (Tserp - 55) / 15,          # Codificación de Tserp (rango de 40
a 70°C)
  x7 ~ (Fserp - 0.009835) / 0.003165 # Codificación de Fserp (rango de
0.00667 a 0.013)
)

# Ver la tabla codificada
as.data.frame(datos_experimento)

##ANALISIS DE LOS COEFICIENTES DEL MODELO "Fae"
```

```

# Ajustar un modelo de primer orden con todos los factores
modelo_completo <- lm(Fae ~ x1 + x2 + x3 + x4 + x6 + x7, data =
datos_experimento)
# Realizar la selección paso a paso (stepwise)
modelo_stepwise <- step(modelo_completo, direction = "both")
# Ver el resumen del modelo seleccionado
summary(modelo_stepwise)

library(qcc)
# Calcular los coeficientes estandarizados
efectos_estandarizados <- coef(modelo_completo)[-1] /
sqrt(diag(vcov(modelo_completo))[-1])

# Crear el gráfico de Pareto
pareto.chart(efectos_estandarizados, main = "Gráfico de Pareto de
efectos estandarizados")

modelo_fae<-rsm(Fae~FO(x4,x3,x2),data = datos_experimento)
#modelo_fae<-rsm(Fae~SO(x3,x5,x7,x2,x4),data = datos_experimento)
summary(modelo_fae)

##ANALISIS DE LOS COEFICIENTES DEL MODELO "Fac"
# Ajustar un modelo de primer orden con todos los factores
#modelo_completo <- lm(Fac ~ Taire + Tagua + Fagua + Hz + Tcond + Tserp
+ Fserp, data = datos_experimento)
modelo_completo <- lm(Fac ~ x1 + x2 + x3 + x4 + x5 + x6 + x7, data =
datos_experimento)
summary(modelo_completo)

# Realizar la selección paso a paso (stepwise)
modelo_stepwise <- step(modelo_completo, direction = "both")
# Ver el resumen del modelo seleccionado
summary(modelo_stepwise)

library(qcc)
# Calcular los coeficientes estandarizados
efectos_estandarizados <- coef(modelo_completo)[-1] /
sqrt(diag(vcov(modelo_completo))[-1])

# Crear el gráfico de Pareto
pareto.chart(efectos_estandarizados, main = "Gráfico de Pareto de
efectos estandarizados")

modelo_fac<-rsm(Fac~FO(x5),data = datos_experimento)
#modelo_fac<-rsm(Fac~SO(x2,x4,x5),data = datos_experimento)
summary(modelo_fac)

```

Anexo F: Código para el análisis de superficie de respuesta.

```
# Import necessary libraries for surface response analysis
and plotting
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from scipy.interpolate import griddata

# Crear las variables en formato numpy array
Taire = np.array([40, 40, 70, 70, 55, 55, 55, 40, 70, 55,
55, 55, 55, 40, 70, 40, 70, 55])
Tagua = np.array([40, 70, 40, 70, 55, 40, 70, 55, 55, 55,
55, 55, 55, 55, 55, 55, 55, 55])
Fagua = np.array([0.00183, 0.00513, 0.00513, 0.00183,
0.00348, 0.00348, 0.00348, 0.00348, 0.00348, 0.00183,
0.00513, 0.00348, 0.00348, 0.00513, 0.00183, 0.00513,
0.00183, 0.00348])
Hz = np.array([16, 50, 16, 50, 33, 16, 50, 33, 33, 16, 50,
33, 33, 16, 50, 50, 50, 50])
Tcond = np.array([5, 5, 20, 20, 12.5, 12.5, 5, 20, 12.5,
12.5, 5, 20, 12.5, 5, 12.5, 5, 20, 5])
Tserp = np.array([40, 70, 70, 40, 55, 55, 55, 55, 55, 55,
55, 55, 55, 40, 70, 70, 40, 55])
Fserp = np.array([0.00667, 0.013, 0.00667, 0.013, 0.009835,
0.009835, 0.009835, 0.00667, 0.013, 0.009835, 0.009835,
0.009835, 0.009835, 0.00667, 0.013, 0.013, 0.013, 0.009835])
Fae = np.array([0.000590, 0.000938, 0.001202, 0.000570,
0.001179, 0.000998, 0.001209, 0.001045, 0.001164, 0.000651,
0.001573, 0.001154, 0.001138, 0.000656, 0.001247, 0.002034,
0.001184, 0.001872])
Fac = np.array([0.000016, 0.000247, 0.000031, 0.000075,
0.000255, 0.000026, 0.000273, 0.000261, 0.000224, 0.000019,
0.000287, 0.000353, 0.000216, 0.000016, 0.000263, 0.000362,
0.000151, 0.000314])

# Create a function to graph the surface response
def plot_surface_response(x_variable, y_variable,
z_variable, x_label, y_label, z_label, title):
    # Create a mesh grid for plotting
    x_grid, y_grid =
np.meshgrid(np.linspace(min(x_variable), max(x_variable),
100),
np.linspace(min(y_variable), max(y_variable), 100))

    # Interpolate z_variable data
    z_grid = griddata((x_variable, y_variable), z_variable,
(x_grid, y_grid), method='cubic')
```



```

# Plotting the surface response
fig = plt.figure(figsize=(12, 6))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
surf = ax.plot_surface(x_grid, y_grid, z_grid,
cmap='coolwarm', edgecolor='none')
ax.set_title(title)
ax.set_xlabel(x_label)
ax.set_ylabel(y_label)
ax.set_zlabel(z_label)

# Create the colorbar
cbar = fig.colorbar(surf, ax=ax, shrink=0.5, aspect=5)

# Set the label above the colorbar
cbar.ax.set_title(z_label, fontsize=12, pad=10) #
Adjust 'pad' to control the distance from the bar

plt.tight_layout()
plt.show()

```

```

# Create a function to graph the surface response
def plot_surface_response(x_variable, y_variable,
z_variable, x_label, y_label, z_label, title, z_min=None,
z_max=None):
    # Create a mesh grid for plotting
    x_grid, y_grid =
np.meshgrid(np.linspace(min(x_variable), max(x_variable),
100),
np.linspace(min(y_variable), max(y_variable), 100))

    # Interpolate z_variable data
    z_grid = griddata((x_variable, y_variable), z_variable,
(x_grid, y_grid), method='cubic')

    # Apply the common limits for the z axis if provided
    if z_min is not None and z_max is not None:
        z_grid = np.clip(z_grid, z_min, z_max)

    # Plotting the surface response
    fig = plt.figure(figsize=(12, 6))
    ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
    surf = ax.plot_surface(x_grid, y_grid, z_grid,
cmap='coolwarm', edgecolor='none', vmin=z_min, vmax=z_max)

```

```

ax.set_title(title)
ax.set_xlabel(x_label)
ax.set_ylabel(y_label)
ax.set_zlabel(z_label)

# Create the colorbar and set its label above
cbar = fig.colorbar(surf, ax=ax, shrink=0.5, aspect=5)
cbar.ax.set_title(z_label, fontsize=12, pad=10) # Label
above colorbar

plt.tight_layout()
plt.show()

# Define common limits for Fac and Fae
fae_min, fae_max = min(Fae), max(Fae) # Limits for Fae
fac_min, fac_max = min(Fac), max(Fac) # Limits for Fac

# Function to select variables to graph and keep consistent
color scale
def select_and_plot(x_name, y_name, z_name, z_min=None,
z_max=None):
    variables = {
        'Taire': Taire,
        'Tagua': Tagua,
        'Fagua': Fagua,
        'Hz': Hz,
        'Tcond': Tcond,
        'Tserp': Tserp,
        'Fserp': Fserp,
        'Fac': Fac,
        'Fae': Fae
    }

    # Call the plot function with the selected variables
    plot_surface_response(variables[x_name],
variables[y_name], variables[z_name],
                        x_name, y_name, z_name, f'Surface
Response - {z_name}', z_min, z_max)

# Examples to plot Fae and Fac with consistent color scaling
select_and_plot('Taire', 'Tagua', 'Fae', fae_min, fae_max)
# Same scale for all Fae graphs
select_and_plot('Taire', 'Fagua', 'Fae', fae_min, fae_max)
# Same scale for all Fae graphs
select_and_plot('Taire', 'Hz', 'Fae', fae_min, fae_max) #
Same scale for all Fae graphs

```

```

select_and_plot('Taire', 'Tserp', 'Fae', fae_min, fae_max)
# Same scale for all Fae graphs
select_and_plot('Fagua', 'Hz', 'Fae', fae_min, fae_max) #
Same scale for all Fae graphs
select_and_plot('Fagua', 'Tserp', 'Fae', fae_min, fae_max)
# Same scale for all Fae graphs

```

```

select_and_plot('Taire', 'Tagua', 'Fac', fac_min, fac_max)
# Same scale for all Fac graphs
select_and_plot('Taire', 'Fagua', 'Fac', fac_min, fac_max)
# Same scale for all Fac graphs
select_and_plot('Tcond', 'Hz', 'Fac', fac_min, fac_max) #
Same scale for all Fac graphs
select_and_plot('Fagua', 'Hz', 'Fac', fac_min, fac_max) #
Same scale for all Fac graphs

```

Anexo G: Congresos

En esta sección se presentan los congresos en los cuales se ha expuesto parte del trabajo desarrollado en la presente tesis.

Título: “Desarrollo de un sistema de desalación por humidificación-deshumidificación para mejorar la disponibilidad de agua potable”

Congreso: Congreso Internacional de Ciencias Agronómicas

Chapingo, Estado de México, del 03 al 06 de octubre de 2023



Titulo: “Optimización de la desalinización mediante humidificación-deshumidificación para mejorar la disponibilidad de agua potable”

Congreso: Congreso Internacional de Ciencias Agronómicas

Chapingo, Estado de México, del 23 al 26 de abril de 2024



Anexo H: Artículos

Residual and desalination water treatments using HDH process- A review for potential use in home gardens

Revista: Advances in Robotics & Mechanical Engineering (ARME)

Estado: Publicado (10 de abril de 2023)

DOI: 10.32474/ARME.2023.04.000177

Residual and Desalination Water Treatments using HDH Process- a Review for Potential use in Home Gardens

Jesús García¹, Federico Hahn^{2*}, Salvador Valle¹ and Mauricio Carillo²

¹ADUA Postgraduate Department, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México

²Irrigation Department, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México

*Corresponding author: Federico Hahn, Irrigation Department, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México

Received: April 03, 2023

Published: April 10, 2023

Abstract

Home gardens in Mexico represent a pathway toward food sovereignty in both rural and urban areas. The rural family-garden is an agroecosystem with traditional roots where the family lives, together with their animals. A comprehensive review of water treatment from brackish and desalination water by small-scale humidification-dehumidification (HDH) was carried out considering the use of renewable energies. The different HDH cycle provide advantages and disadvantages and present great potential for decentralized small-scale water production applications implemented in agricultural crop irrigation systems. Home gardens can be rural or urban, but the smaller area within the city terraces prevent the use of photovoltaic panels as they will occupy most of the space and reduce the solar radiation required for photosynthesis. Heat pumps can be very useful as the space required is smaller and energy can be reduced if water is sprayed over the condenser.

Keywords: Home gardens; HDH; Solar Energy; Humidifier; Heat Pump

Introduction to HDH technology

Desalination is a process used to obtain fresh water from saline water, such as brackish water or seawater. Since its evolution in the 1950s, its technical and economic feasibility have improved considerably. Membrane, thermal or emergent processes are commonly used being membrane reverse osmosis (RO) used in 69% of the global facilities [1]. A major environmental concern arises from the large volume of brine produced in the desalination process, requiring special management and increasing energy costs. Brine handling is both financially expensive and technically difficult, and therefore most desalination plants discharge untreated brine directly into the environment. Middle East & North Africa represent the largest brine production volume (994 m³/day), followed by East Asia & Pacific (14.9 m³/day), Western Europe (84 m³/day) and North America (54 m³/day). they represent the vast majority in the rest of the global participation. On the other hand, the sectors with the greatest brine production problem are the municipal (106.5 m³/day), industrial (274 m³/day) and irrigation (1.1 m³/

day) sectors [1]. The higher the volumetric processing efficiency of the desalination process, the lower the proportion of brine produced relative to the volume of desalinated water produced. Humidification-Dehumidification (HDH) technology has become a viable alternative for small-scale desalination. This technology based on the steam cycle principle, condenses the water vapor to obtain fresh water. Air enters the HDH unit and condenses in the evaporator to produce water vapor. This steam is passed through the condenser and the collected water is stored for later use [2]. Humidification-dehumidification technology has been shown to be an effective alternative to traditional desalination due to its low cost, simplicity, and energy efficiency. The main components of the HDH system are the humidifier and the dehumidifier. In the humidifier, the evaporation process increases air humidity, by maintaining contact between atomized water droplets and unsaturated air. This humidification results from the difference between air and the air-water interface moisture content [3]. In