

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN PARA APLICACIONES EN PEQUEÑA ESCALA

Luis H. Vera, e-mail: luis.horacio.vera@comunidad.unne.edu.ar

Departamento de Termodinámica y Máquinas Térmicas – Facultad de Ingeniería – Grupo en Energías Renovables –
Facultad de Ciencias Exactas- Universidad Nacional del Nordeste

Emilio Scozzina Unterholzner,

Héctor G. Lorenzo,

Departamento de Termodinámica y Máquinas Térmicas – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste

Manuel Cáceres, Andrés Firman

Grupo en Energías Renovables – Facultad de Ciencias Exactas- Universidad Nacional del Nordeste

Resumen. La creciente demanda de agua potable ha llevado a explorar alternativas sostenibles y eficientes en el proceso de desalinización. Los métodos convencionales, como la ósmosis inversa y la evaporación multietapa instantánea, enfrentan desafíos en la aplicabilidad a pequeña escala, especialmente en áreas rurales con restricciones de acceso a la energía eléctrica. Este artículo se centra en comparar estas tecnologías con el innovador proceso de humidificación-deshumidificación del aire (HDH) para la producción de 100 litros/hora de agua desalinizada. Se emplearon balances masicos y energéticos para evaluar la eficiencia de cada tecnología, específicamente la cantidad de energía térmica necesaria por volumen de agua desalinizada, y el área de colectores solares necesarias para el proceso. Se consideraron configuraciones de circuito abierto sin regeneración, y cerrado con y sin regeneración. Los resultados iniciales revelan que, en una configuración de circuito abierto sin regeneración, el consumo de energía térmica en el proceso HDH es 3,6 y 5,5 veces mayor en comparación con los procesos MSF y MED, respectivamente. En conclusión, a pesar de un mayor consumo de energía térmica, en comparación con las tecnologías MED y RO, el proceso HDH presenta ventajas significativas en términos de costos iniciales y de mantenimiento reducidos. Además, la modularidad del sistema permite adaptarse a diversas demandas de agua, desde pequeñas cantidades hasta volúmenes más significativos. De esta forma, el proceso HDH es una solución eficaz y accesible para la desalinización de agua en áreas con limitaciones de acceso a la energía eléctrica y mantenimiento. La combinación de bajos costos y el uso de fuentes renovables refuerzan el potencial de implementación de esta tecnología en entornos diversos, desde zonas rurales hasta aplicaciones más extensas.

Palabras clave: Energía Solar, Desalinización del Agua, Humidificación - Deshumidificación.

1. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua dulce es un desafío crítico para la humanidad, con aproximadamente cuatro mil millones de personas experimentando estrés hídrico anualmente (Mekonnen y Hoekstra, 2016), el aumento de la demanda global (UNESCO, 2023) y que solo 0,3% del agua dulce de la tierra (Ministerio de Salud de Argentina, 2022) está disponible para su consumo humano subraya la urgencia de soluciones para abordar este problema.

Esta escasez de agua dulce resalta la necesidad de gestionar y conservar los recursos hídricos de manera sostenible. Es decir, existe la necesidad de encontrar, o utilizar, reservas de agua de diversas fuentes, con concentraciones de elementos en ella y realizar una adecuación de la misma para el consumo humano (desalinizar). La calidad del agua es crucial, según la Organización Mundial de la Salud (2021) el agua destinada al consumo debe tener una cantidad de sales igual o inferior 0,6 kg/m³.

En parte del siglo pasado, la tecnología de desalinización se orientó hacia la evaporación y condensación, sobre todo la destilación por evaporación instantánea multi etapa (*MSF*, por sus siglas en inglés) y destilación multiefectos (*MED*). Actualmente la capacidad instalada total de sistema de desalinización se basó esencialmente en tres tecnologías: *RO* (68,7 %), *MSF* (17,6%) y *MED* (6,9 %), mientras que los otros procesos (compresión mecánica y térmica de vapor, electrodiálisis y nanofiltración) tuvieron un papel secundario (6,8 %). (Vicuña *et al.* 2022)

La necesidad de reducir el consumo de energía proveniente de fuentes fósiles debido a sus impactos negativos en el ambiente condujo a diversos países a incorporar las energías renovables en sus matrices energéticas (Our World in Data, 2023). Este contexto, las tecnologías de desalinización que, históricamente han dependido de la energía derivada de combustibles fósiles, están cambiando hacia una transición energética que prioricen las fuentes de energía renovables.

1.1 Tecnologías de desalinización

La destilación para la producción de agua potable se viene utilizando en las embarcaciones marinas desde hace 400 años, impulsada por la necesidad de abastecimiento en viajes a océanos abiertos. El interés moderno en desalación surgió en los años treinta por sequías en California, pero la crisis económica limitó la investigación. En 1940, María Telkes creó un destilador solar portátil, y tras la Segunda Guerra Mundial, la desalación creció debido al crecimiento poblacional en

áreas con escasos recursos hídricos. La década de 1950 vio la construcción de plantas de desalación en Kuwait. Las innovaciones continuaron, con ensayos de membranas de ósmosis inversa en 1953 y la aplicación comercial de la compresión de vapor en la década de 1970. En los años ochenta, se instalaron unidades de destilación multiefectos y grandes plantas de ósmosis. La capacidad instalada aumentó de 1,7 m³/día en 1970 a 90 m³/día en 2015, reflejando la evolución y crecimiento de la tecnología de desalación.

En la Fig. 1 se clasifican las tecnologías de desalinización según su fuente de energía que necesita desalinizar.

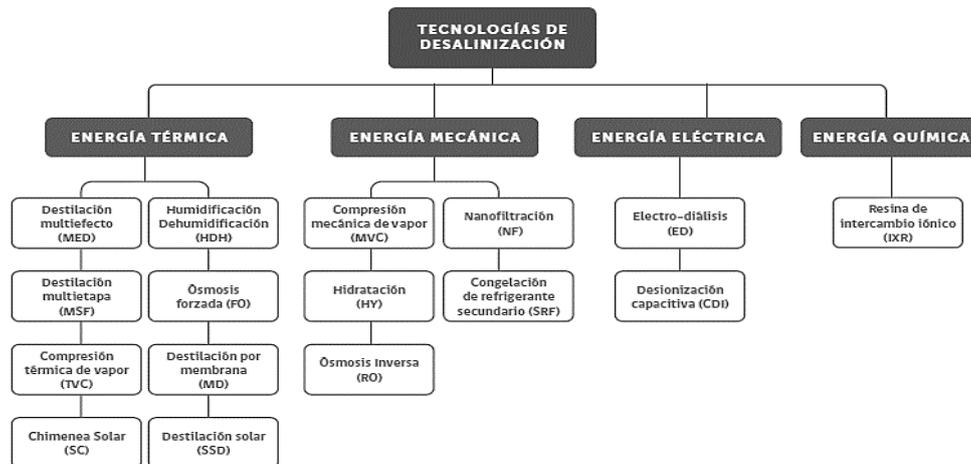


Figura 1- Clasificación de tecnologías de desalinización según la fuente de energía. Vicuña *et al.* (2022)

1.2 Procesos térmicos de desalinización

Los procesos térmicos de desalinización, como *MSF* (*Multieffect Distillation*, por sus siglas en inglés) y *MED* (*Multiple Effect Distillation*), son métodos que utilizan el calor para separar la sal y otras impurezas del agua, produciendo así agua dulce.

La evaporación instantánea multietapa (*MSF*) utiliza la diferencia de presión de vapor entre el agua salina y el vapor de agua para separar la sal y obtener agua dulce. El proceso se desarrolla en varias etapas consecutivas, cada una de las cuales implica una cámara de evaporación y una cámara de condensación. En cada etapa, el agua de mar se bombea a la cámara de evaporación, donde se calienta mediante un intercambiador de calor. El agua experimenta a una disminución abrupta de la presión, lo que provoca que parte del agua se evapore instantáneamente, decantando la sal. Este vapor de agua evaporado se dirige a la cámara de condensación, donde se enfría y se condensa nuevamente en forma de agua dulce. Después de cada etapa, el agua salina se elimina y la siguiente etapa comienza con una presión aún más baja, lo que permite la evaporación adicional del agua.

La desalinización por múltiples efectos (*MED*) este proceso se basa en el principio de evaporación y condensación múltiples, aprovechando el calor liberado durante el proceso para impulsar etapas posteriores.

Estas tecnologías térmicas se caracterizan por remover un gran contenido de sales presentes en el agua obteniendo valores menores de 0,01 kg/m³ en el producto final (Al-Dadaha *et al.*, 2014), con un rechazo de 75 % del agua procesada (Curto *et al.*, 2021). Se debe destacar que en el balance energético del proceso se debe considerar la energía térmica y también la eléctrica, debido al alto consumo de las bombas de agua.

1.3 Procesos mecánicos de desalinización

La tecnología de desalinización por ósmosis inversa (*RO*), es la más utilizada a nivel mundial, y se caracteriza por ser un proceso de separación de las sales disueltas en el agua por efecto de una presión elevada sobre una membrana permeable. El agua salada fluye a través de la membrana por la diferencia de presión creada entre el agua de alimentación y el producto, esta última a una presión cercana a la atmosférica. El agua de alimentación restante continúa a través del lado presurizado del reactor como salmuera (rechazo). La cantidad de sales presentes en el agua definirá las características físicas y químicas de la membrana (Alghoul *et al.*, 2009) y definirá las capacidades volumétricas de tratamiento de agua, presiones de trabajo, consumo de energía y costos. La tecnología de ósmosis inversa, a su vez, se clasifica en dos categorías: ósmosis inversa para agua salobre (*BWRO*, por sus siglas en inglés) y ósmosis inversa para agua de mar (*SWRO*, por su sigla en inglés). La obtención de agua desalinizada por el proceso *SWRO* produce un rechazo de agua tratada del 35 al 50 % y en el proceso *BWRO* rechaza un 65 % (Curto *et al.*, 2021), es decir, el volumen de agua que se desaliniza es mayor que en los procesos térmicos.

En la Tab.1 se presentan los valores de volúmenes de agua, energía, salinidad, presiones y costos de los procesos térmicos de las tecnologías de desalinización antes mencionadas.

Tabla 1 - Características de las tecnologías de desalinización.

	SWRO	BWRO	MSF	MED
Volumen de agua desalinizada [m ³ /día]*	250 – 320.000	20 – 46.000	23.000 – 528.00	12.000 – 91.000
Energía requerida para desalinizar [MJ/m ³]	7,2 – 18 ^(eléctrico)	<3,6 ^(eléctrico)	230 – 299**	152**
Salinidad final del agua [kg/m ³]	<0,5	<0,2	0,01	0,01
Presiones de trabajo [MPa] ***	5,5 – 6,5	1 – 1,5	-	-
Costo [USD/m ³] *	3,93 – 0,45	1,33 – 0,26	1,75 – 0,52	1,95 – 0,52

* Valores extraídos de Shatat *et al.* (2012). ** Valor de energía térmica consumida, extraído de Saadat *et al.* (2018). ***Valores extraídos de Fritzmann *et al.* (2007).

2. Acceso al agua en comunidades rurales aisladas

El acceso al agua en comunidades rurales aisladas, sin acceso a energía eléctrica y con fuentes de agua salobre, es un desafío importante que requiere soluciones adaptadas a estas condiciones específicas. Los procesos de desalación son grandes consumidores de energía, por lo que la viabilidad de esta opción pasa necesariamente por la optimización energética de los procesos tecnológicos empleados, así como la incorporación efectiva de las energías renovables. De entre estas últimas, la energía solar se presenta como una opción debido a la coincidencia tanto geográfica como estacional del problema de escasez hídrica y alta disponibilidad del recurso solar.

Según Mathioulakis *et al.* (2007) no todas las tecnologías de desalinización son viables para la aplicación de fuentes de energías renovables. Las revisiones bibliográficas realizadas por Esfahani *et al.* (2015), Al-Karaghoulí (2013) y Sharon y Reddy (2015) afirman que existe un aumento del costo por volumen de agua desalinizada utilizando energía renovable. Este costo puede ser mayor cuando se considera escalas de producción pequeñas (1 – 100 m³/día), tal como lo reportaron Ghermandi y Messalem (2012), Song *et al.* (2017) y Al-Karaghoulí y Kazmerski (2013). Esto crea una competencia entre tecnologías de desalinización según la fuente de energía y principio de funcionamiento adaptables para zonas rurales aisladas sin acceso a la red eléctrica.

Existe una alternativa que imita el ciclo natural del agua, conocida como el ciclo de desalinización por humidificación y deshumidificación (HDH). Varios expertos concuerdan en que es aplicable en contextos de desalinización a mediana y pequeña escala, particularmente en áreas rurales (Vadalia *et al.*, 2013, Lienhard *et al.*, 2010). En el presente artículo se evalúa la energía asociada al proceso de obtención de agua de calidad para volúmenes que permitan abastecer la demanda en comunidades rurales aisladas.

2.1 Desalinización por Humidificación - Deshumidificación (HDH)

El HDH es una alternativa a las técnicas habituales de desalación, y se destaca por no necesitar una fuente de alta temperatura ni una bomba de vacío para provocar la evaporación. Esta metodología utiliza aire atmosférico para transportar el vapor de agua de un humidificador a un deshumidificador (Dias de Carvalho *et al.*, 2020).

El proceso de HDH utiliza el principio de la psicometría aprovechando las propiedades del aire de transportar el agua, eliminando las sales y otras impurezas. Se eleva la temperatura del aire húmedo para aumentar la capacidad de vapor agua contenido en él, de esta forma a 25°C el aire contiene 0,02 kilogramos de vapor de agua y elevando su temperatura a 90°C resulta 1,4 kilogramos de vapor de agua por cada kilogramo de aire (Gatthey, 2002). La eficacia de este proceso depende de varios factores, como la temperatura del agua de alimentación, la humedad relativa inicial del aire y la disponibilidad de energía para el calentamiento del aire. El HDH es particularmente útil en regiones con abundancia de energía solar, ya que puede aprovecharse para calentar el aire de manera sostenible.

Diferentes estudios analizaron configuraciones para el diseño de sistemas HDH buscando maximizar la transferencia de calor y masa entre agua salina y aire, aumentando la humedad absoluta contenida en el aire, con mínimos aportes de energía. Estas configuraciones han llevado a clasificar a los sistemas HDH en: calentados por agua (WH, por sus siglas en inglés) o calentados por aire (AH, por sus siglas en inglés) en ciclos cerrados o abiertos. En la Fig. 2 se observa una clasificación de la configuración que pueden adoptar los diferentes sistemas HDH.

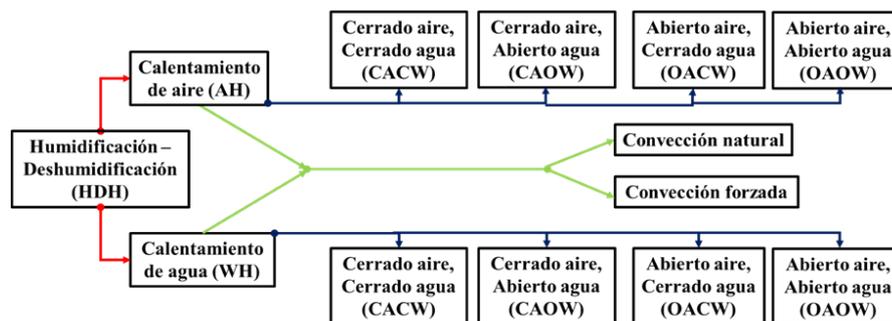


Figura 2- Diagrama presentado las posibles configuraciones para la desalinización mediante HDH. Adaptado de Qasem y Lawal (2020).

En cualquiera de estas configuraciones es posible utilizar diferentes fuentes de energía para el aporte de calor al agua y al aire, el caso particular que se analizará propone utilizar energía solar para el aporte térmico, así como para la alimentación eléctrica a las bombas y ventiladores.

2.2 Calentamiento del agua al ingreso del humidificador

Nawayseh *et al.* (1999) construyó tres unidades de *HDH* de *CAOW* en Jordania y Malasia. La característica de estas unidades es que funcionaban con circulación natural del agua y encontraron que el coeficiente de transferencia de masa, en el humidificador, se ve afectado principalmente por el caudal de agua debido a su efecto sobre el área de humectación del empaque. Además, la circulación natural del aire aumenta con la tasa de flujo de agua, lo que provoca un aumento adicional en el coeficiente de transferencia de masa.

Al-Hallaj *et al.* (1998) realizó un estudio experimental de un *HDH CAOW*, para determinar los efectos de la producción de agua mediante convección natural o forzada del aire. Se observó que no hubo un aumento significativo en el rendimiento de las unidades de desalinización utilizando circulación de aire forzado a altas temperaturas. Mientras que, a temperaturas más bajas, se notó una mejora en la transferencia de masa.

Al-Hallajb *et al.* (2002) realizaron simulaciones numéricas de diferentes componentes en el sistema y demostraron la importancia de la correcta selección del área del colector y del condensador para maximizar la producción de agua desalinizada. Mahmoud *et al.* (2013) realizaron un modelo teórico y experimental de la utilización de lentes de Fresnel. Los resultados mostraron que el sistema de circuito cerrado proporciona una mayor producción de agua que el sistema de circuito abierto. Abdullah *et al.* (2018) midió la concentración de sales disueltas en el agua producida. Los resultados varían entre 0,11 kg/m³ y 0,086 kg/m³ alimentado con agua salobre del 5,7 kg/m³.

Con el objetivo de determinar la energía demandada para un proceso de *HDH* en una comunidad rural aislada que demanda 100 kg/h se realizó el cálculo considerando el proceso más sencillo en su entorno de aplicación del mismo.

3. METODOLOGÍA

Se realizó un balance energía y masa en el humidificador y deshumidificador considerando las siguientes hipótesis: a) el aire húmedo a la salida del humidificador y deshumidificador se encuentra saturado, b) la fuente de calor entrega energía de forma constante, c) la presión dentro de cada componente corresponde a la presión atmosférica normal al nivel del mar (101,325 kPa), d) las temperatura del aire ambiente y el agua de ingreso del deshumidificador no varían con el tiempo, e) no se consideran las características de transferencia de calor-masa del empaque en el interior del humidificador, f) el humidificador y deshumidificador están perfectamente aislados térmicamente, g) El aire y el vapor de agua se comporta como un gas ideal.

Para realizar el balance de energía y masa durante el proceso de desalinización se utilizan las ecuaciones psicrométricas que permiten calcular el flujo de masa de aire seco, vapor de agua y los intercambios de calor latente y sensible. La mezcla del aire seco y el vapor de agua se denomina aire húmedo y su energía (entalpía) se puede calcular como la suma de la entalpía de aire seco y la entalpía del agua (Ec. (1)).

$$h = cp_{aire}T + X(cp_{agua}T + r) \quad (1)$$

donde: h , entalpía del aire húmedo por masa de aire seco [kJ/kg]; cp_{aire} , calor específico del aire [kJ/°C kg]; cp_{agua} , calor específico del agua [kJ/°C kg]; X , razón masa de vapor de agua por masa de aire (humedad absoluta) [kg/kg]; T , temperatura de la mezcla [°C]; r , calor latente de vaporización del agua [kJ/kg].

En la Fig. 3 se presentan esquemáticamente el proceso y los puntos de entrada y salida de masa y energía en los componentes principales para la configuración: a) *WH-OAOW* y b) *WH-OACW*

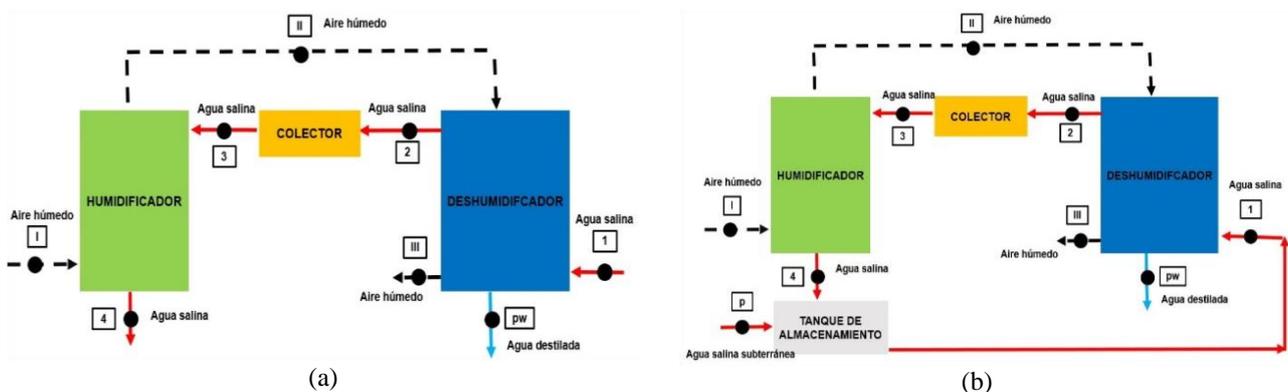


Figura 3- Diagrama del proceso de Humidificación - Deshumidificación. a) *WH-OAOW* b) *WH-OACW*.

El funcionamiento del proceso para un *WH-OAOW* inicia con la entrada del aire atmosférico (I) y el agua salina (3) al humidificador. El contacto del aire con el agua salina provoca evaporación de esta por lo que el aire aumenta su temperatura y su contenido de humedad absoluta (II). Para extraer el vapor de agua, contenida dentro del aire, se procede a provocar la condensación dentro del deshumidificador donde se produce el intercambio de calor con el agua salina que se encuentra a menor temperatura (1). El agua salina absorbe la energía calorífica del aire y elevando así su temperatura (2). Al final del proceso, en el deshumidificador, el aire se lo rechaza al ambiente (estado III) y se obtiene agua desalinizada (pw). El agua salina del estado 4 vuelve al lugar de extracción; para un proceso *WH-OACW* la misma ingresa a un tanque de almacenamiento el cual se mezcla con el agua salina de extracción (pozo, p). Esta mezcla se la vuelve ingresar nuevamente al sistema.

3.1 Balances en los componentes del sistema

Humidificador. En la Ec. (2) se presenta la ecuación del balance de energía y en la Ec. (3) de masa,

$$m_a h_I + m_3 h_3 = m_a h_{II} + m_4 h_4 \quad (2)$$

donde: h_I , entalpía del aire húmedo por masa de aire seco a la entrada del humidificador [kJ/kg]; h_{II} , entalpía del aire húmedo por masa de aire seco a la salida del humidificador [kJ/kg]; h_3 , entalpía específica del agua salina que ingresa al humidificador [kJ/kg]; h_4 , entalpía específica del agua salina a la salida del humidificador [kJ/kg]; m_a , masa de aire seco [kg]; m_3 , masa de agua salina que ingresa al humidificador [kg]; m_4 , masa de agua salina que sale del humidificador [kg].

$$m_3 - m_4 = m_{ev} = m_a (X_{II} - X_I) \quad (3)$$

donde: m_{ev} , masa de agua evaporada [kg]; X_I , humedad absoluta del aire húmedo por masa de aire seco a la entrada del humidificador [kg/kg]; X_{II} , humedad absoluta del aire húmedo por masa de aire seco a la salida del humidificador [kg/kg]

Deshumidificador. Las ecuaciones del balance de energía se presentan en la Ec. (4) y de masa en la Ec. (5).

$$m_a h_{II} + m_1 h_1 = m_a h_{III} + m_2 h_2 + m_{pw} h_{pw} \quad (4)$$

donde: h_{III} , entalpía de aire húmedo por masa de aire seco a la salida del deshumidificador [kJ/kg]; h_1 , entalpía específica del agua salina que ingresa al deshumidificador [kJ/kg]; h_2 , entalpía específica del agua salina a la salida del deshumidificador [kJ/kg]; h_{pw} , entalpía específica del agua desalinizada [kJ/kg]; m_{pw} , masa de agua desalinizada [kg]; m_1 , masa de agua salina que ingresa al deshumidificador [kg]; m_2 , masa de agua salina que sale del deshumidificador [kg].

$$m_{pw} = m_a (X_{II} - X_{III}) \quad (5)$$

donde: X_{III} , humedad absoluta del aire húmedo por masa de aire seco a la salida del deshumidificador [kg/kg].

Tanque almacenamiento. Para que la configuración *OACW* sea un circuito de agua cerrado, el agua salina que pasa por el humidificador (estado 4) debe volver a ingresar al sistema mediante el deshumidificador, pero, debido a que parte del agua se evapora en el humidificador es necesario reponer esa misma cantidad para que siga circulando el mismo caudal masico dentro del sistema. Es por ello que se encuentra un tanque de almacenamiento adiabático el cual ingresa la masa de agua salina del estado 4 y se mezcla con el agua salina subterránea. Las ecuaciones de balance de energía (Ec. (6)) y de masa (Ec. (7)) estacionarias se presentan a continuación:

$$m_4 h_4 + m_p h_p = m_1 h_1 \quad (6)$$

donde: h_p , entalpía de agua salina subterránea [kJ/kg]; m_p , masa de agua salina subterránea [kg].

$$m_4 + m_p = m_1 \quad (7)$$

Procedimiento de cálculo. Una vez definida las temperaturas de los fluidos en cada estado, la masa de agua destilada y la humedad relativa de cada estado, las variables que se deben determinar son: la masa de aire seco, la masa de agua salobre y la temperatura del agua salobre que sale del deshumidificador (estado 2). De la Ec. (4) despejamos h_2 (Ec. (8)),

$$h_2 = \frac{(h_{II} - h_{III} - (X_{II} - X_{III})h_{pw})}{MR} + h_1 \quad (8)$$

donde: MR , razón de masa de agua salobre por masa de aire seco [adimensional] del cual se lo calcula mediante la Ec (2), de esta forma tenemos la Ec. (9),

$$MR = \frac{m_3}{m_a} = \frac{(h_I - h_{II} - (X_{II} - X_I)h_4)}{h_4 - h_3} \quad (9)$$

Para obtener las propiedades termodinámicas de los fluidos durante las diferentes etapas del proceso se hace uso del software *Engineering Equation Solver (EES)*. (Mayere, 2018)

3.2 Aporte de Calor: Colector solar.

La máxima temperatura de trabajo del agua es 95 °C (hipótesis inicial), considerando este valor de temperatura se seleccionó un colector solar tipo *heat pipe* por su alta eficiencia y capacidad de trabajo a temperaturas arriba de los 80°C. El colector, es de la marca *Viessmann* modelo *Vitosol 200-T SPE* con un área efectiva de 3,26 m². El rendimiento del colector solar es función de las pérdidas ópticas, irradiancia solar, la temperatura ambiente y del fluido (Ec. (10)),

$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{T_f - T_a}{G} - k_2 \frac{(T_f - T_a)^2}{G} \quad (10)$$

donde: η , rendimiento del colector [adimensional]; η_0 , rendimiento óptico [adimensional]; T_f , Temperatura del fluido [°C]; T_a , Temperatura ambiente [°C]; G , Irradiancia solar [W/m²]; k_1 , Coeficiente perdida de calor (1,2006 W/m² K); k_2 = Coeficiente perdida de calor (0,011 W/m² K).

Para calcular la eficiencia de conversión del colector solar se obtienen los datos de temperatura e irradiación sobre la horizontal de la ciudad de Resistencia, Chaco, Argentina (longitud:-27.45°, latitud:-58,99°, irradiación media mensual: 19,062 MJ/m² día, temperatura media anual ambiental: 21,5 °C y velocidad media anual del viento: 12 km/h). Esta última es ajustada según el ángulo de inclinación y superficie efectiva total conforme al modelo de radiación de Reindl *et al* (1990). El modelo Reindl tiene en cuenta el Índice de Claridad y el ángulo de elevación solar, y con el modelo de cielo anisótropo de Hay y Davis (1980) se determina su valor a la inclinación de 25°.

La irradiación sobre la superficie del colector (superficie de efectiva) se calcula a partir de la fecha, la hora y la latitud geográfica, la altura del sol y el acimut del sol. De este modo es posible convertir la proporción directa de la radiación solar sobre la horizontal en la proporción directa de la radiación solar en relación con el colector, teniendo en cuenta la superficie de referencia.

4. RESULTADOS

El balance de energía y masa de un sistema de humidificación-deshumidificación para la extracción de sales del agua se evalúa con el objetivo de maximizar la eficiencia, minimizar el impacto ambiental y comprender mejor su desempeño en términos de gestión térmica y transferencia de masa.

A través de un análisis se examinó cómo el sistema responde a una condición operativa definida y cómo los intercambios de energía y masa son gestionados durante el proceso de humidificación y deshumidificación. La comprensión de estos aspectos es crucial no solo para optimizar el rendimiento del sistema, sino también para proponer mejoras y ajustes que permitan una extracción de sales más eficiente y sostenible.

En la Tab. 2 se encuentran detallados los valores de entalpía, temperatura, masa de aire y agua encontramos en los puntos característicos del proceso *HDH* para una configuración *WH-OACW* y *WH-OAOW*.

Tabla 2 - Valores de operación del desalinizador de agua por el proceso *HDH* configuración *WH-OACW*

		HUMIDIFICADOR				DESHUMIDIFICADOR		
		I	II	3	4	III	1	2
WH -OACW	h [kJ/kg]	57,24	3835	398	146,7	129	143	364,3
	T [°C]	30	90	95	35	35	34,123	87
	maire humedo [kg/h]	74,22	176,101	-	-	100,28	-	-
	magua [kg/h]	-	-	1163,52	1061,28	-	1163,52	1163,52
	X [kg _{agua} /kg _{aire}]	0,01061	1,398	-	-	0,03655	-	-
WH - OAOW	h [kJ/kg]	57,24	3835	398	146,7	129	104,8	326,2
	T [°C]	30	90	95	35	35	25	77,9
	maire humedo [kg/h]	74,22	176,101	-	-	100,28	-	-
	magua [kg/h]	-	-	1163,52	1061,28	-	1163,52	1163,52
	X [kg _{agua} /kg _{aire}]	0,01061	1,398	-	-	0,03655	-	-

Para las condiciones establecidas para el análisis, para ambos casos, la cantidad de agua evaporada en el humidificador es de 115,491 kg/h de la cual se condensa 100 kg/h en el deshumidificador, la diferencia sale con el aire húmedo en el punto III. El condensado se realiza en el deshumidificador y en el intercambio de calor entre aire húmedo y agua salobre se recupera 71,52 kW térmicos.

Aunque la potencia calorífica que recupera el agua salobre es la misma para ambas configuraciones no es así la temperatura a la cual ingresa al deshumidificador, por lo que el aumento de temperatura será diferente para ambos casos. Para la configuración *OACW* el agua ingresa a 34,123 °C y se eleva a 87 °C, en cambio, la configuración *OAOW* el agua ingresa 25 °C y se eleva a 77,9 °C. Por hipótesis, la temperatura del agua salobre que ingresa al humidificador debe ser 95 °C, por lo que se requerirá 10,86 kW de potencia calorífica para la configuración *OACW* y 23,21 kW para *OAOW*. Siendo necesario 9 colectores solares para *OACW* y 14 para *OAOW* para cumplir con la demanda.

Para una producción de 4 horas de agua desalinizada, la energía calorífica necesaria por volumen de agua desalinizada para la configuración *OACW* es de 390,95 MJ/m³ y la *OAOW* 835,55 MJ/m³.

Por último, de los 1163,52 kg/hr de agua salobre que ingresa al sistema, en ambas configuraciones, solamente se destila 100 kg/hr, es decir, que el 8,6% se desaliniza. Este valor es bajo comparado con las tecnologías *MSF* y *MED* que poseen una tasa de desalinización entre 20% - 25%.

5. CONCLUSIÓN

La gestión eficiente de recursos hídricos es fundamental en el contexto actual, donde la disponibilidad de agua de calidad es esencial para diversas aplicaciones industriales y agrícolas. En este contexto, los sistemas de humidificación-des-humidificación han emergido como una tecnología clave para la extracción de sales en agua, brindando una solución sostenible y eficaz para enfrentar los desafíos asociados con la salinidad del recurso hídrico.

Se realizaron los balances de energía y masa preliminares para proyectar un desalinizador solar por la humidificación-deshumidificación de aire húmedo para una producción de 100 kg/h de agua desalinizada. Se compararon dos configuraciones: una con un circuito abierto en aire y cerrado en agua (*OACW*) y el otro circuito, abierto en aire y agua (*OAOW*), ambos con calentamiento de agua (*WH*) y no de aire. Este último demanda 2,13 veces de potencia calorífica a comparado con la configuración *OACW*.

Considerando una producción de 4 horas la configuración *OACW* demanda 390,95 MJ/m³ de energía térmica para producir agua desalinizada, siendo este valor 1,7 – 1,31 veces mayor con la tecnología *MSF* y 2,57 veces mayor para *MED*.

Debido al elevado volumen de agua de rechazo durante el proceso, el aporte de calor necesario conduce a un área de colectores solares que hace inviable económicamente su implementación, razón por la cual se verifica que para el acaso en estudio el sistema de calentamiento solar no es adecuado para trabajar en este tipo de sistemas, por lo que se debe considerar alguna nueva fuente de energía adaptable a las condiciones de contexto de una comunidad rural.

Se concluye que, para mismas condiciones de servicio y producción de agua desalinizada, es conveniente utilizar la configuración *OACW* para disminuir la demanda de potencia calorífica. Esta reducción de la demanda se debe a que se recupera el calor del agua salina que sale del humidificador.

Los resultados alcanzados en el estudio proporcionarán una base sólida para la toma de decisiones informada y el perfeccionamiento continuo del sistema, contribuyendo así al avance de tecnologías que abordan desafíos críticos en la gestión del agua y la preservación de recursos naturales.

REFERENCIAS

- Abdullah A. S., Essa F. A., Omara Z. M., Bek M. A., 2018. Performance evaluation of a humidification–dehumidification unit integrated with wick solar stills under different operating conditions, *Desalination*, 441.
- Al-Dadaha R.K., Youssefa P. G., Mahmouda S. M., 2014. Comparative Analysis of desalination technologies, *Energy Procedia*, 61, 2604-2607.
- Alghoul M. A., Poovanaesvaran P., Sopian K., Sulaiman M.Y., 2009. Review of brackish water reverse osmosis (BWRO) system designs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2661–2667.
- Al-Hallaj S., Farid M. M., Tamimi A. R., 1998. Solar desalination with a humidification--dehumidification cycle: performance of the unit, *Desalination*, 120, 273-280.
- Al-Karaghoul A., Kazmerski L., 2013. Energy consumption and water production cost of conventional and renewable energy powered desalination processes, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 24, 343-356.
- Ministerio de Salud de la Argentina: Calidad del agua, 2022. URL: www.argentina.gob.ar/salud/ambiental/agua
- Curto D., Franzitta V., Guercio A., 2021. A review of the water desalination technologies. *Applied Science*, 11, 607.
- Dias de Carvalho M., Selia dos Reis Coimbra J., Silva Miranda Lemos T., Alguilar Bellido J. D., Oliveira Siquiera A. M., 2020. A review of humidification-dehumidification desalination systems, *International Journal of Research*.
- Esfahani I. J., Rashidi J., Ifaei P., Yoo C., 2015. Efficient thermal desalination technologies with renewable energy systems: a state of the art review, *Korean Journal Chemical Engineering*.
- Farid M. M., Parekh S., Selman J. R., Al-Hallaj S., 2002. Solar desalination with a humidification-dehumidification cycle: mathematical modeling of the unit, *Desalination*, 151,153-164.
- Fritzmann C., Löwenberg J., Wintgens T., Melin T., 2007. State of the art of reverse osmosis desalination, *Desalination*.
- Gathey D. P., 2002. Understanding Psychrometrics, *ASHRAE*.
- Ghermandi A., Messalem R. 2012. Solar driven desalination with reverse osmosis: the state of the art, *Desalination and Water Treatment*, 7, 1-3, 285-296.
- Hay J. E., Davies J. A., 1980. Calculation of the Solar Radiation Incident on a inclined surface, in *Proceedings of the first Canadian Solar Radiation Data Workshop*, Ministry of Supply and Service, Toronto, Canada, p. 59.

- 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.
- Mayere A., 2018. Analysis of Humidification Dehumidification Desalination System, *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*
- Mahmoud M. S., Farrag T. E., Mohamed W. A., 2013. Experimental and theoretical model for water desalination by humidification - dehumidification (HDH), *Procedia Environmental Sciences*, 17, 503 – 512.
- Mathioulakis E., Belessiotis V., Delyannis E., 2007. Desalination by using alternative energy: review and state of the art. *Desalination*, 203, 346-365.
- Mekonnen, M. M., Hoekstra A. Y., 2016. Four billion people facing severe water scarcity, *Science Advances*, 2,1-6.
- 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, 1187-1201.
- Nawayseh N. K., Farid M. M., Al-Hallaj S., Al-Timimi A. R., 1999. Solar desalination based on humidification process I. Evaluating the heat and mass transfer coefficients, *Energy conversion and management*. 40, 1423-1439.
- Our World in Data., 2023. Installed global renewable energy capacity by technology, Dirección URL: <ourworldindata.org/grapher/installed-global-renewable-energy-capacity-by-technology>[10 de agosto de 2023]
- Pérez-González A., Urriaga A.M., Ibáñez R., Ortiz I., 2012. State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates, *Water Research*, 46, 267-283.
- Reindl D.T. , Beckman W.A. , Duffie J.A., 1990. Diffuse fraction correlations, *Solar Energy*, v.45, 1, pp. 1-7.
- Saadat A. H. M., Islam M. S., Islam M. S., Parvin F., Sultana A., 2018. Desalination technologies for developing countries: A review, *Journal of Scientific Research*, 10, 1, 77-97.
- Sharon H. y Reddy K. S., 2015. A review of solar energy driven desalination technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1080-1118.
- Song J., Li T., Wright-Contreras L., Wing-Keung Law A., 2017. A review of the current status of small-scale seawater reverse osmosis desalination, *Water International*.
- UNESCO, 2023. Alianzas y cooperación por el agua. Resumen ejecutivo. URL: unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384657_spa [consulta: 07 de agosto de 2023]
- Vadalia B. V., Pate P., Patel J., 2013. Solar Humidification-Dehumidification technology for pure water production. *International Journal for Scientific Research and Development*, 1, 10, 2321-0613.
- Vicuña, S., Daniele, L., Farías, L., González, H., Marquet, P. A., Palma-Behnke, R., Stehr, A., Urquiza, A., Wagemann, E., Arenas-Herrera, M. J., Bórquez, R., Cornejo-Ponce, L., Delgado, V., Etcheberry, G., Fragkou, M. C., Fuster, R., Gelcich, S., Melo, O., Monsalve, T., Winckler, P., 2022. Desalinización: Oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile. Comité Asesor Ministerial Científico sobre Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- World Health Organization, 2021. Guidelines for Drinking-water Quality, 3ª edición, pp. 218, WHO Press, Geneva.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DESALINATION TECHNOLOGIES FOR SMALL SCALE APPLICATIONS

Abstract. *The growing demand for drinking water has led to the exploration of sustainable and efficient alternatives in the desalination process. Conventional methods, such as reverse osmosis and flash multistage evaporation, face challenges in small-scale applicability, especially in rural areas with electricity access restrictions. This article focuses on comparing these technologies with the innovative air humidification-dehumidification (HDH) process for the production of 100 liters/hour of desalinated water. Mass and energy balances were used to evaluate the efficiency of each technology, specifically the amount of thermal energy needed per volume of desalinated water, and the area of solar collectors necessary for the process. Open and closed circuit configurations with and without regeneration were considered. Initial results reveal that in an open-loop configuration without regeneration, the thermal energy consumption in the HDH process is 3,6 and 5,5 times higher compared to the MSF and MED processes, respectively. In conclusion, despite higher thermal energy consumption, compared to MED and RO technologies, the HDH process presents significant advantages in terms of reduced initial and maintenance costs. Furthermore, the modularity of the system allows it to be adapted to various water demands, from small quantities to more significant volumes. In this way, the HDH process is an effective and accessible solution for water desalination in areas with limited access to electricity and maintenance. The combination of low costs and the use of renewable sources reinforce the potential for implementation of this technology in diverse environments, from rural areas to more extensive applications.*

Keywords: *Solar Energy, Water Desalination, Humidification – Dehumidification.*