

## Review. Water desalination methods

Henry Salinas-Freire <sup>\*,a</sup> , Osney Pérez-Ones <sup>a</sup> , Susana Rodríguez-Muñoz <sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Marianao, La Habana, Cuba.

<sup>b</sup>Grupo de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Marianao, La Habana, Cuba.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i2.21>

**Abstract.-** Desalinated seawater became a main source for fresh water supply to human populations around the world due to growing fresh water for human use scarcity. Several factors have contributed to it, wide brackish and seawater to be desalinated availability, a wide variety of desalination methods, permanent research and investigation proposing new methods and improving the already existing and the sustained cost reduction. The main desalination methods used are reverse osmosis, multi effect distillation and multi stage flash evaporation, those methods became reducing costs and improving efficiency strongly backed by operating systems experience and by investigation and theoretical development. In this paper an analysis of methods of desalination water is presented, the main methods, those whom became used long time ago, as new reported methods, and some improvements presented in new works to already known methods.

**Keywords:** Desalination; seawater; reverse osmosis; multi stage flash distillation; multi effect distillation.

## Estado del arte. Métodos de desalinización de agua

**Resumen.-** El agua de mar desalinizada ha llegado a ser una fuente importante de abastecimiento para grupos poblacionales en todo el mundo debido a la creciente escasez de agua para consumo humano. Muchos factores han aportado en ello, la abundante disponibilidad de agua de mar y salobre, la diversidad de métodos desarrollados, sus continuas mejoras y la paulatina reducción de costos. Los principales métodos usados son la ósmosis inversa, la evaporación instantánea multi etapa y la destilación multi efecto, los cuales han mejorado su eficiencia debido tanto a la experiencia con las plantas desalinizadoras como a las investigaciones y desarrollos teóricos recientes. En este documento se presenta una revisión de los métodos de desalinización, tanto de aquellos que se vienen empleando desde hace tiempo, como de nuevos métodos reportados, así como algunas consideraciones respecto a la energía empleada y los costos del agua desalinizada obtenida.

**Palabras clave:** Desalinización; agua de mar; osmosis inversa; evaporación instantánea multietapa; destilación multi efecto.

Recibido: 20 de abril, 2021.

Aceptado: 18 de junio, 2021.

### 1. Introducción

El problema de la escasez de agua apta para el consumo humano afecta ya a más de mil millones de personas en todo el mundo [1] y este déficit crece debido a factores como el incremento del consumo en las economías emergentes, la disminución del agua disponible por la contaminación y el cambio climático. Las consecuencias para las poblaciones afectadas son el aumento de enfermedades y

problemas de salud, y la dificultad de mantener un desarrollo sustentable [2] basado en agricultura e industria.

La desalinización de agua de mar es un proceso que se ha mencionado en documentos muy antiguos como lo reportan Khawaji [3], Tiwari [4] y otros [5], empleándose para cubrir las necesidades en bebida, higiene, servicios de saneamiento y preparación de alimentos [6]. Inicialmente se empleaba la ebullición, como el único método conocido para desalinizar agua de mar, luego apareció la desalinización solar y posteriormente se desarrollaron una gran gama de procedimientos que se mencionan a continuación.

\* Autor para correspondencia:

Correo-e:henrys667@hotmail.com (H. Salinas-Freire)

## 2. Clasificación de los métodos de desalinización

Se han desarrollado muchos métodos de desalinización [7], pero las plantas emplean principalmente tres: ósmosis inversa (RO), evaporación instantánea multi etapa (MSF) y destilación multi efecto (MED) [8]. En la Figura 1 se muestran los métodos de desalinización según el principio de trabajo [9], tomando como referencia la clasificación de Alkaisi [6] y Curto [5].

Aunque en el artículo se describen procesos como la desalinización nuclear (ND), en algunas clasificaciones no se menciona debido a que el método como tal, sigue siendo la evaporación y condensación, descritos en su lugar correspondiente.

### 2.1. Destilación multi efecto (MED)

Consiste en calentar una solución salina hasta el punto de ebullición, con lo que el solvente se evapora y puede ser retirado de la cámara para su enfriamiento y condensación. Debido al alto contenido energético del vapor, éste se aprovecha en un intercambiador donde precalienta una corriente de ingreso que se encuentra a menor presión y temperatura a la vez que el vapor se enfría y condensa. Se emplean varias etapas para maximizar la recuperación de calor, por lo que estos sistemas emplean 4 o 5 efectos conectados entre sí [7]. Los problemas más comunes están asociados a la corrosión debido a las altas temperaturas y la presencia de agua salada, las incrustaciones y el uso de químicos para proteger tuberías y equipos. Para reducir los costos, se han propuesto sistemas híbridos, como un sistema MED integrado a un reactor nuclear [10] o un sistema híbrido MED-MSF [11] con ahorros de hasta el 58 % en la energía de bombeo [12], con respecto a otros sistemas como MED-TVC. Estos sistemas son usualmente de gran capacidad de producción, como 40 000 m<sup>3</sup>/día [8].

### 2.2. Evaporación instantánea multi etapa (MSF)

En este procedimiento se lleva una corriente de agua salina precalentada con vapor a una cámara de baja presión, donde parte del agua de la solución se vaporiza instantáneamente. Este

vapor, para aprovechar su contenido térmico, mediante un intercambiador se pone en contacto con una corriente que está a menor temperatura, condensando debido al enfriamiento [13]. Se emplean varias etapas, que pueden ser de 12 a 20 [14], con cámaras que tienen menor presión y mayor temperatura sucesivamente, para mejorar la eficiencia. Junto con los equipos de destilación multi efecto, son los más antiguos y comúnmente empleados para la desalinización. Se utilizan también en sistemas híbridos como MED-MSF [11] o MSF acoplados a un reactor nuclear [15].

### 2.3. Ósmosis inversa (RO)

La ósmosis inversa emplea una membrana semi permeable donde se ponen en contacto una solución salina y agua desalinizada. La solución salina tiene mayor presión osmótica que el agua desalinizada, por lo que las moléculas de agua tienden a pasar desde el agua desalinizada hacia la solución para alcanzar el equilibrio, pero se ejerce presión sobre la solución salina, venciendo la presión osmótica de la misma, con lo que las moléculas de agua pasan hacia el agua desalinizada, la que se recolecta y almacena [7, 13]. La presión empleada es por lo general de 7 MPa. Aunque es uno de los sistemas de menor costo para desalinizar agua [8], el pre tratamiento, el costo y duración de las membranas son factores limitantes [16], las primeras membranas estaban basadas en acetato de celulosa, sin embargo se investigan nuevos materiales combinados, como nano partículas de zeolita, dióxido de titanio, nano tubos de carbono y amidas poli aromáticas, orientados a mejorar estos aspectos [2, 17], en particular, biomateriales como el clorhidrato de quitosano biguanidina se han empleado como antiescalantes [18].

### 2.4. Compresión de vapor (MVC-TVC)

Consiste en llevar la alimentación de agua salina hasta una cámara donde se deja caer en forma de spray sobre unos intercambiadores de tubos que están a mayor temperatura formándose así vapor, que se extrae, formándose vacío en la cámara; el vapor se lleva al compresor y hacia los tubos del intercambiador, donde debido a la alta presión

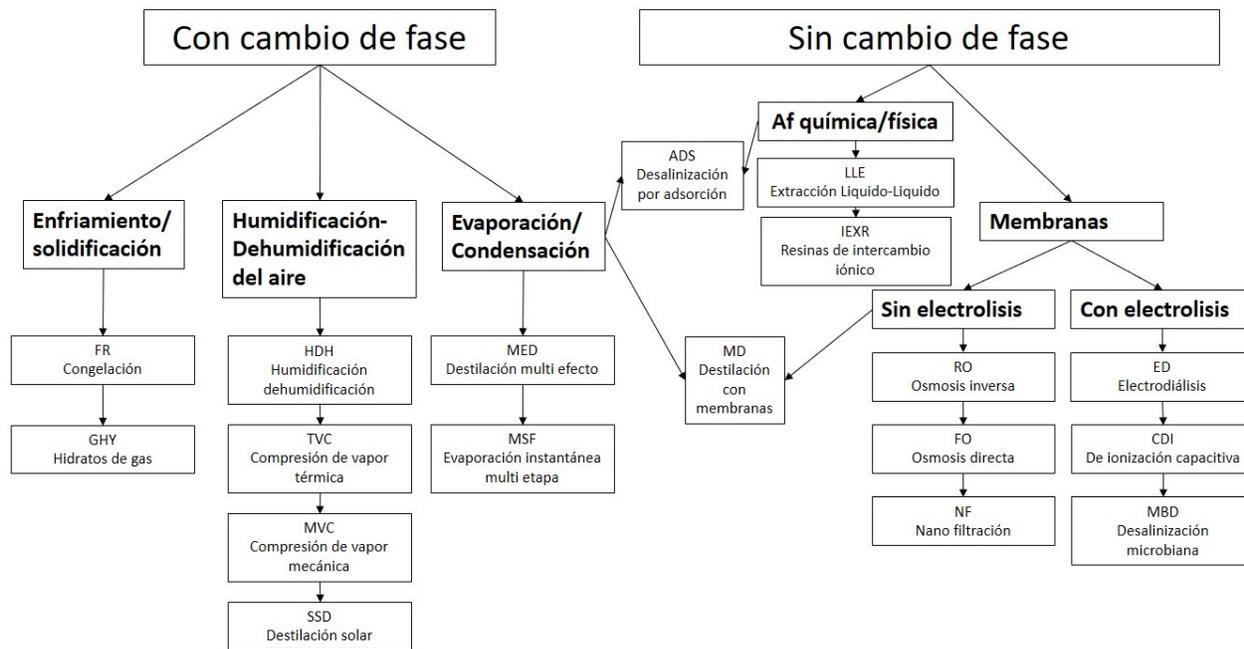


Figura 1: Métodos de desalinización de agua de acuerdo a su principio

condensa el agua y el calor latente se transfiere a la corriente que ingresa [19].

Hay varias configuraciones para este sistema, siendo las más usadas la de compresor mecánico, que se muestra en la Figura 2, la llamada compresión térmica, la de vapor jet y la destilación por vacío de súper gravedad reportado por Ma [20]. Puesto que trabaja a temperaturas alrededor de 70 °C reduce los problemas relativos a pérdidas de calor y corrosión, esto ha permitido instalar plantas de alto volumen, como 3000 m<sup>3</sup>/día. El consumo de energía en las plantas de gran capacidad está alrededor de 8 kWh/m<sup>3</sup> de agua producida [3].

### 2.5. Desalinización nuclear (ND)

Se ha llamado así a los procesos en los cuales se emplean la energía procedente de un reactor nuclear en un proceso de desalinización, generalmente de agua de mar [22, 23]. Es importante mencionar que la desalinización propiamente dicha se realiza en una planta de desalinización acoplada al reactor que emplea un método como destilación multiefecto (MED), evaporación instantánea multietapa (MSF) como se muestra en la Figura 3, ósmosis inversa (RO) [24], etc.

Una ventaja de estos sistemas es que aprovecha el calor del reactor previamente en funcionamiento, y por lo general se pueden construir plantas desalinizadoras de alta capacidad como 1800 m<sup>3</sup>/día con una planta de RO, 4500 m<sup>3</sup>/día con un sistema MSF [25] o 80 000 m<sup>3</sup>/día con un sistema MED [26]. Estos sistemas son adecuados donde hay necesidad de nuevos reactores nucleares para generación de energía eléctrica y además hay escasez de agua para consumo humano al mismo tiempo que se cuenta con agua de mar o salinizada para acoplar estos sistemas [27, 28]. Dado que aborda aspectos siempre importantes como energía y agua, estos sistemas han empezado a considerarse en conjunto y pueden llegar a ser económicamente viables como lo muestra en su trabajo Al-Othman [26, 29].

### 2.6. Destilación solar (SSD)

La destilación solar consiste en un recipiente generalmente de concreto, fibra reforzada o hierro galvanizado cuyo fondo es un recipiente que suele pintarse de color negro [30] donde se coloca el agua salada, con una cubierta de un material transparente como vidrio o plástico, la radiación solar calienta y evapora el agua, que se condensa en la cubierta

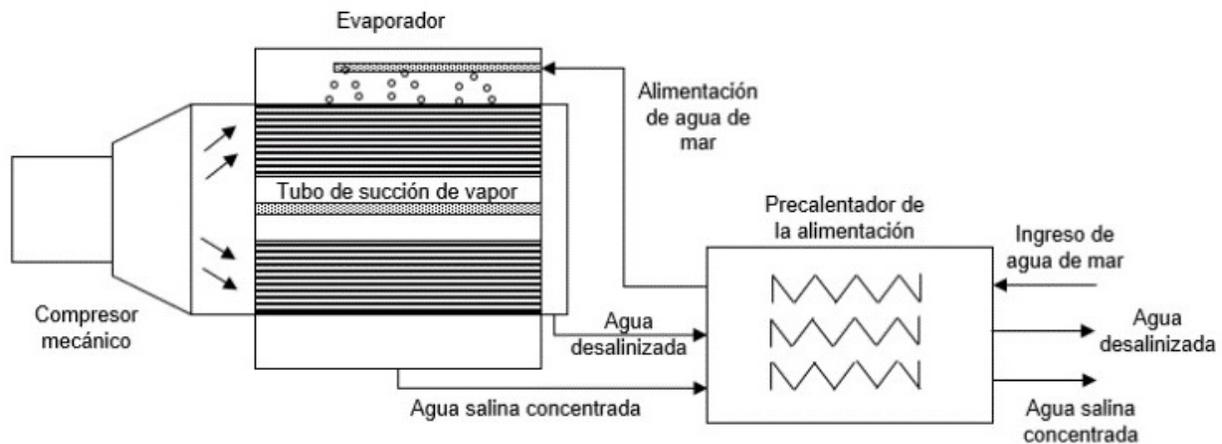


Figura 2: Diagrama de una unidad de desalinización por compresión de vapor [21]

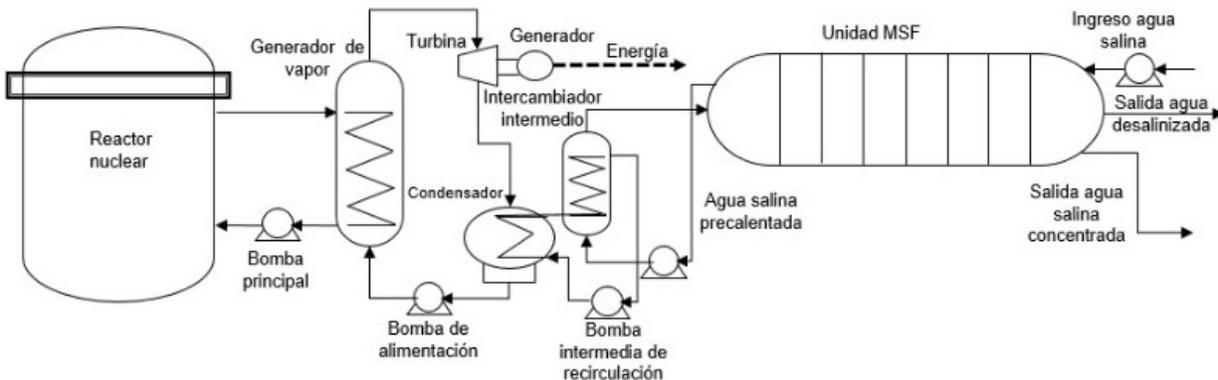


Figura 3: Diagrama de un reactor nuclear acoplado a una unidad MSF [24]

transparente y posteriormente es extraída del aparato como agua desalinizada [4, 31, 32].

Estos aparatos se remontan hasta el siglo XVI a los trabajos del alquimista Arab y Della Porta en 1589 de acuerdo con Tiwari [4]. En años posteriores se han presentado nuevos diseños [33, 34] y materiales como fibras sintéticas y aislantes para las carcasas y vidrios de mejor calidad para las cubiertas. Se han estudiado mucho los mecanismos de transferencia de masa y energía y se han derivado correlaciones para conocer su operación [31, 35, 36, 37, 38]. Se han clasificado como pasivos a aquellos que no tienen otra fuente de energía o sistema de recuperación de calor, aparte del sol y activos a aquellos que las emplean [39], los cuales mejoran su productividad [35, 40, 41].

Son simples de manejar, de relativo bajo costo de instalación y operación, toda vez que la energía que emplean es la solar, pero los inconvenientes son su baja productividad y la dependencia de la radiación solar en la zona y temporada donde estén ubicados, para mejorar estos aspectos se ha estudiado el uso de concentradores parabólicos por Bindhu [42], un diseño para concentrar energía en las llamadas chimeneas solares [43, 44, 45] y el empleo de nanomateriales por Alarifi y otros [46] para mejorar su eficiencia y productividad. Un esquema de un destilador solar pasivo se muestra en la Figura 4.

### 2.7. Electrodialisis (ED)

Este proceso consiste en colocar membranas de intercambio catiónico y aniónico alternativamente

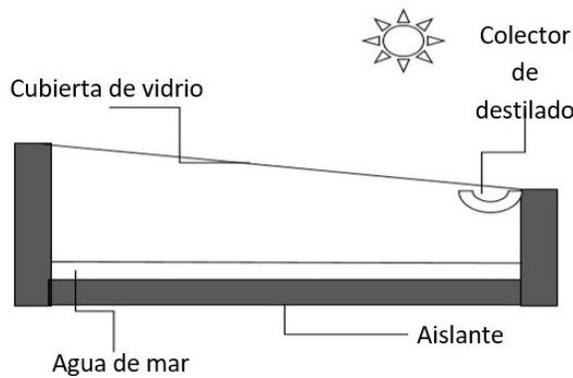


Figura 4: Diagrama de un destilador solar pasivo

entre los electrodos, cuando se aplica una corriente, los iones cargados presentes en la solución son arrastrados, los negativos hacia el ánodo y los positivos hacia el cátodo. Los cationes migran a través de la membrana de intercambio catiónico, pero son retenidos en la membrana de intercambio aniónico; los aniones migran a través de la membrana de intercambio aniónico, pero son retenidos a su vez en la membrana de intercambio catiónico. Por lo tanto, hay canales en los que se produce acumulación de iones, mientras en otros disminuye su concentración, pudiéndose extraer agua con muy baja concentración de sales por una parte, y una corriente muy concentrada por otra [47, 48, 49, 50]. Un esquema del procedimiento se muestra en la Figura 5.

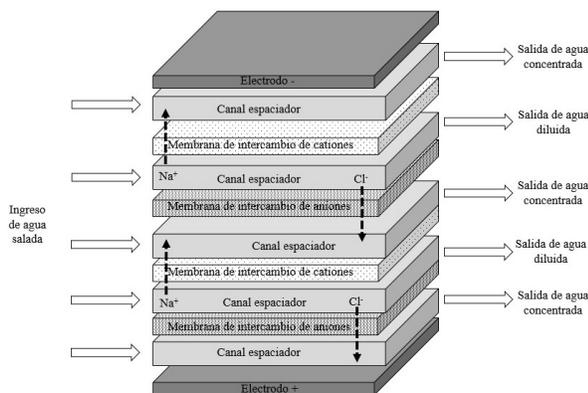


Figura 5: Esquema del funcionamiento de una unidad de electrodiálisis [47]

## 2.8. Destilación con membranas (MD)

Consiste en pasar una corriente salina caliente y una corriente de agua fría desalinizada separadas por una membrana porosa y aprovechar la diferencia en las presiones de vapor para lograr que las moléculas de vapor de agua pasen de la corriente de agua salada hacia el lado del agua pura [51, 52, 53, 54, 55, 56]. La membrana es de naturaleza hidrofóbica y debido al tamaño de los poros, ni el agua líquida ni las sales pueden atravesarla. Se han usado membranas de polipropileno, fluoruro de polivinilideno (polyvinylidene fluoride) y politetrafluoruro de etileno (teflón). Este método fue presentado y patentado por Bodell en el año 1963 [57] y debido a su simplicidad presenta muchas ventajas, pero como señala Khayet [58], no hay una buena metodología en los trabajos presentados en lo referente a costos y consumos de energía reportados [59].

## 2.9. Desalinización microbiana (MBD - FC)

Este método emplea una celda de combustible para remover los iones de una sal disuelta que se consumen en el proceso electrolítico y en el cual se emplean microorganismos como catalizadores biológicos [60, 61], como se muestra en la Figura 6. Un aporte novedoso es el empleo de ánodos macroporosos compuestos de nanotubos de carbono-quitosano, que tienen la ventaja de presentar alta capacitancia, buena estabilidad en los ciclos de trabajo y baja resistencia [62].

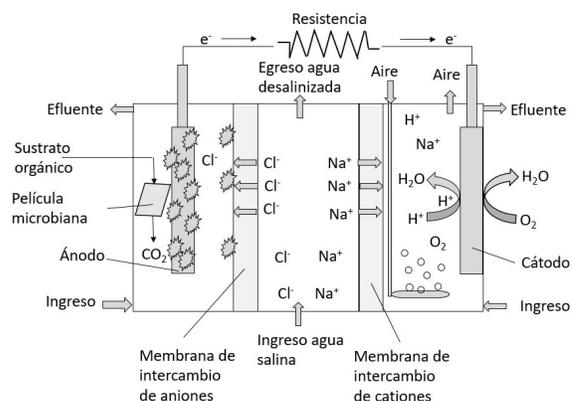


Figura 6: Esquema del funcionamiento de una unidad de desalinización microbiana con celda de combustible [63]

La concentración de los iones va disminuyendo hasta remover las sales en un 99 % según lo reportado por Sevda [63]. En este proceso se obtienen soluciones de ácidos y bases como subproducto, además de la generación de electricidad.

### 2.10. Deionización capacitiva (CDI)

Reportado por Caudle en la década de 1960 [11, 64], consiste en hacer pasar una corriente de agua que contiene sales disueltas entre dos capas de electrodos cargados que funcionan como ánodo y cátodo, los iones son atraídos hacia los electrodos, y son atrapados por adsorción, por lo que los electrodos deben tener gran área disponible. Se han usado electrodos de carbón activado en este procedimiento y para su funcionamiento prolongado se requiere realizar ciclos de carga y descarga para desorber los iones con corrientes entre 0,6 a 1,2 V [64]. Originalmente se presentaron problemas como el desgaste de los electrodos al ser sometidos a los consecutivos ciclos de carga y descarga, pero posteriores trabajos como los de Johnson, Bouhadana [65] y recientemente Sayed [66] han aportado mejoras, un esquema se muestra en la Figura 7, usando electrodos de otros materiales como el aerogel de carbón y realizando purgas con nitrógeno para regenerar los capacitores y lograr un proceso económicamente viable [64]. En su trabajo, Liu ha reportado la incorporación de óxido de magnesio sobre una matriz de nanotubos de carbono-quitosano para facilitar el transporte de iones, el contacto electroquímico y la conductividad eléctrica [67].

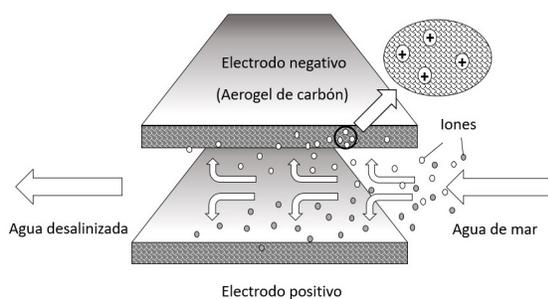


Figura 7: Esquema del funcionamiento de una unidad de desalinización por deionización capacitiva [68]

### 2.11. Ósmosis directa (DO-FO)

Consiste en poner el agua de mar, a través de una membrana semipermeable, en contacto con una solución que tenga una presión osmótica mucho mayor, por lo que las moléculas de agua pasan a través de la membrana hacia esta solución, de la cual posteriormente se separan soluto y solvente, dejando el agua desalinizada por una parte y el soluto en una solución de mayor concentración en la otra [12, 69, 70, 71]. Se han propuesto solutos como dióxido de azufre, alcohol alifático, sulfato de aluminio, glucosa, fructosa, nitrato de potasio, amoníaco-dióxido de carbono [72] y bicarbonato de amonio. El empleo de membranas de película delgada activa con una capa de quitosano hidrofílico se ha estudiado con buenos resultados [73]. La membrana más usada es de celulosa o fibras relacionadas, se ha reportado que las membranas empleadas en ósmosis inversa no son las más apropiadas para éste proceso [74].

### 2.12. Congelación (FR)

Este procedimiento, cuyos primeras referencias se remontan hasta Pachter en 1967 [75], consiste en provocar un descenso de la temperatura de una solución salina por debajo de 0 °C, cuando empiezan a formarse cristales de agua, los que son retirados y posteriormente fundidos [76, 77, 78]. Los contenidos de sales en el agua obtenida son tan bajos como 0,5 g/kg [79]. Si bien los resultados alcanzados muestran la factibilidad del procedimiento, no se ha desarrollado hasta el grado de ser comercialmente implementado, un esquema se muestra en la Figura 8. Se conoce de la existencia de algunas plantas piloto que emplean esta técnica en Carolina del norte y Florida en Estados Unidos, Yanbu en Arabia Saudita y Eilat en Israel [79].

### 2.13. Intercambio iónico (IEXR)

Consiste en el paso del agua salina a través de un lecho con resinas de intercambio iónico tanto aniónico como catiónico, se emplean resinas quelatantes de ácido iminodiacético o ácido aminofosfónico. Estas resinas se regeneran haciendo pasar soluciones ácidas y básicas respectivamente. Por lo general la operación de estos sistemas consiste de las etapas de

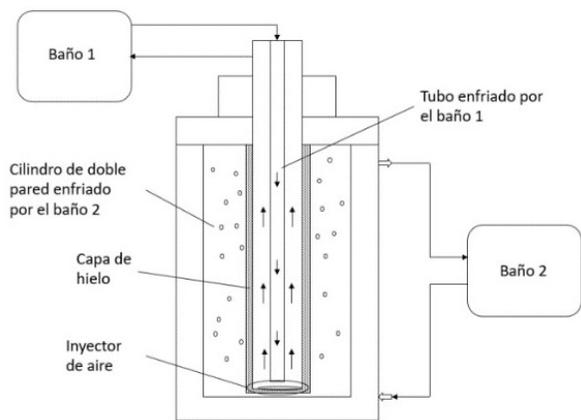


Figura 8: Esquema de una unidad de desalinización por cristalización [79]

intercambio iónico, lavado de resina y regeneración de resina [80, 81]. Los problemas asociados con este procedimiento son la degradación de las resinas, la necesidad de procesos adicionales de ablandamiento que encarecen el proceso, depósitos e incrustaciones de compuestos de calcio, bario, estroncio, sílice y hierro [82]. Se puede apreciar un esquema de este procedimiento en la Figura 9.

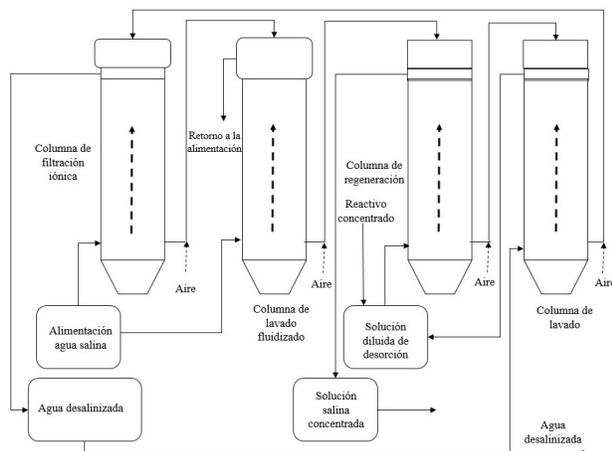


Figura 9: Diagrama de una unidad de desalinización por intercambio iónico CIF [82]

### 2.14. Desalinización por humidificación-dehumidificación de aire (HDH)

Existen algunas variantes de este procedimiento que se emplea en varios métodos, pero en general consta de las siguientes etapas: humidificación de aire, que ingresa en condiciones ambientales

y se humedece hasta el punto de saturación o cerca al mismo, una unidad de condensación, donde se enfría el aire y se condensa la humedad en un intercambiador donde se precalienta la corriente de agua salina que ingresa y una etapa de calentamiento externo de la corriente de entrada hasta alcanzar entre 60–70 °C [83, 84, 85, 86, 87, 88]. La fuente de energía en la etapa de calentamiento puede ser un concentrador solar, un sistema de resistencias eléctricas o uno basado en la combustión de diésel, gas, etc. [19] como se muestra en la Figura 10.

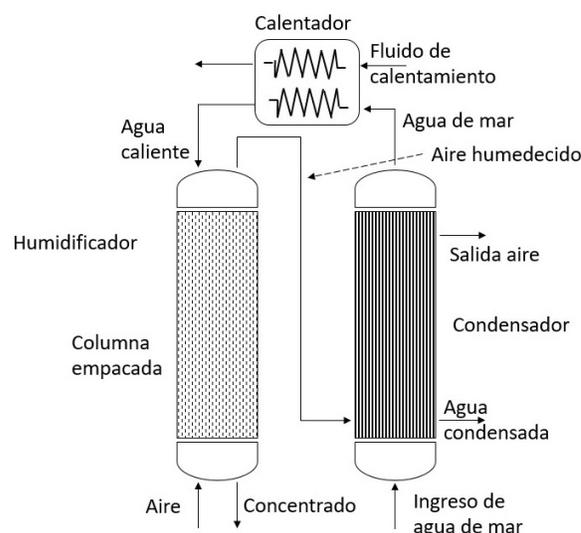


Figura 10: Esquema del funcionamiento de una unidad de desalinización por humidificación-dehumidificación de aire [19]

### 2.15. Nano, micro y ultra filtración (NF, MF, UF)

Se han desarrollado algunos procedimientos basados en la filtración para la purificación de agua: micro, nano (con nanotubos de carbono, CNT) y ultrafiltración. Hay que señalar que desde este punto de vista la ósmosis directa y la ósmosis inversa también emplean este principio. Se basa en pasar el agua salina a través de membranas donde se retienen diversos elementos presentes en la misma, que pueden ser proteínas, sales, hongos, algas, bacterias, virus, sólidos suspendidos o aceites y grasas. Lo que se retenga en la membrana depende del tamaño de los orificios de la misma, mientras menores sean los orificios

de la membrana, mayor será su capacidad de retención, pero al mismo tiempo requerirán de una mayor presión de trabajo y se obstruirán más rápidamente, necesitando limpieza mediante retrolavado, limpieza química o reemplazo de la membrana [89]. En la Tabla 1 se presentan las principales características y condiciones de operación de estos métodos.

Las estructuras de nanotubos de carbono se pueden emplear de dos maneras: como una película de varias capas o como nanotubos de pared simple [89]. En la Figura 11 se aprecia el funcionamiento de una estructura de nanotubos de carbono en la desalinización de agua.

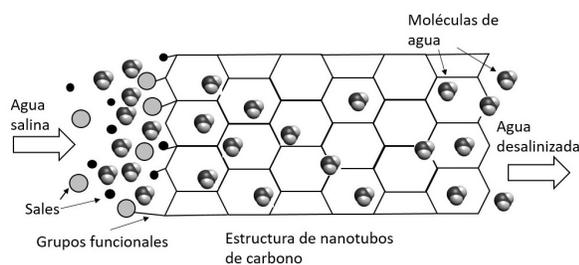


Figura 11: Esquema del funcionamiento de la nanofiltración empleando nanotubos de carbono con grupos funcionales [89]

Estas tecnologías, sobre todo las basadas en nanotubos de carbono, se encuentran actualmente en una activa investigación, se han reportado muchas potenciales ventajas con estos materiales, como la posibilidad de adicionar nanopartículas de plata o dióxido de titanio como agentes antimicrobianos y evitar los problemas de obstrucción causados por el depósito y crecimiento de microorganismos, pero aún se deben superar problemas como los altos costos o la producción de estas estructuras en grandes cantidades [89].

### 2.16. Adsorción (ADS)

Este método consiste en llevar una corriente de agua hasta una cámara de baja presión donde una parte del líquido se evapora instantáneamente, este vapor se lleva a un lecho de gel de sílice donde se somete a un ciclo de adsorción a alta presión. El proceso comprende cuatro etapas: adsorción, precalentamiento, desorción y pre enfriamiento.

Se han presentado diseños con múltiples efectos, como el representado en la Figura 12, con el fin de que cada efecto realice una etapa diferente y el sistema funcione de manera continua [90]. Las ventajas de este método son que permite trabajar a baja temperatura, no es intensiva en consumo de energía, y puede ser parte de un sistema de enfriamiento. Recientemente Alnajdi [91] en su trabajo presenta todas las optimizaciones realizadas al proceso, que ha aumentado su eficiencia, y sobre todo un análisis de sistemas descentralizados de producción de agua fresca, lo que pone de manifiesto la factibilidad económica de este método en plantas de mediana y baja capacidad.

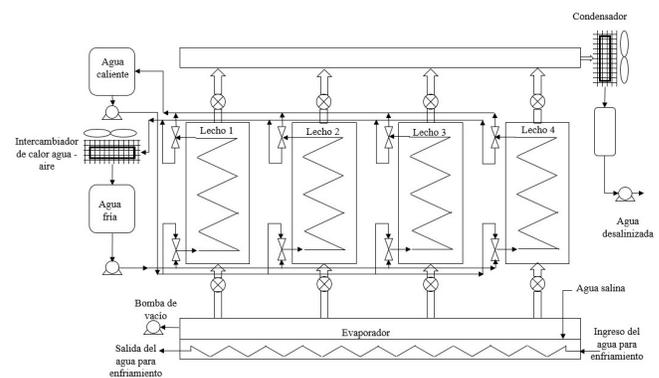


Figura 12: Esquema del funcionamiento de una unidad de desalinización por adsorción

### 2.17. Hidratos de gas (GHY)

Los hidratos de gas son compuestos de inclusiones cristalinas no estequiométricas formados por agua y pequeñas moléculas de un compuesto gaseoso en determinadas condiciones de presión y temperatura [92]. Este proceso de desalinización consiste en la formación de hidratos de un gas, como CO<sub>2</sub>, en el seno de agua de mar, los hidratos se forman con agua de la misma, y en las condiciones correctas como 2,9 MPa y 298 K [93], estos compuestos complejos se solidifican, lo que permite que se puedan separar de la solución. Posteriormente, se descompone el hidrato, el gas se recupera y se tiene agua que posee una concentración de sales tan baja como 0,7 % en relación de peso [42, 94, 95, 96]. Un esquema de este procedimiento se presenta en la Figura 13.

Tabla 1: Parámetros de trabajo de los métodos de purificación de agua por filtración [89]

Tipo de membrana	CNT	RO	NF	UF	MF
	CNT y polímeros en membranas	Polímeros orgánicos: poliamidas, polisulfonas y sulfonas poliéster	Polímeros orgánicos: poliamidas, poliéster y otros.	Polisulfonas, acrílicos, celulosa y otros.	Polipropileno, polisulfonas, poliuretano y otros.
Espesor membrana ( $\mu\text{m}$ )	2-6	0,1 – 0,2	0,05	150-300	50-100
Tamaño de poro [90]	0,1-2	0,3-0,6	<2	2-50	>50-500
Permite el paso de:	agua	agua	agua, sales	agua, sales, azúcares	agua, sales, azúcares, virus y proteínas
Presión de trabajo (MPa)	Despreciable	3-6	2-4	0,1-1	<0,1
Permeabilidad al agua ( $\text{mPa}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	$7 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-12}$	$40 \times 10^{-12}$	$0,5 \times 10^{-10}$	-

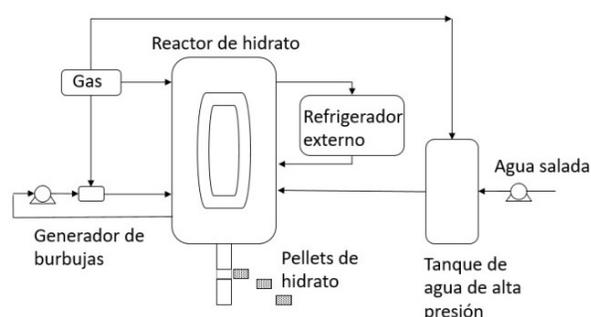


Figura 13: Esquema de una unidad de desalinización por hidratos de gas [93]

Los primeros reportes de desalinización empleando éste método se remontan a la década de 1940 por Park [93]. Aunque solamente se han construido prototipos de laboratorio y plantas piloto [92] recientemente se han presentado nuevos trabajos con mejoras en la eficiencia de este proceso usando nanomateriales [42]. Los iones que se han removido son  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  [97].

### 3. Energía empleada y costos del agua desalinizada

Las investigaciones relacionadas con nuevos métodos de desalinización o con mejoras en su eficiencia presentan valores de consumo energético, pero muchos son prototipos de laboratorio, simulaciones en software especializado o plantas de muy pequeña capacidad, esos valores no se pueden comparar con los de las plantas industriales

de los métodos tradicionales, se deben construir plantas piloto e instalaciones comerciales para tener valores más reales, queda aún mucho camino por recorrer para las nuevas tecnologías. En la Tabla 2 se muestra el estado de algunos métodos de desalinización, el tipo de agua que se alimenta y el tipo de energía que usa principalmente [5].

#### 3.1. Consumo energético

Anderson [47] establece que para cualquier método empleado, el valor mínimo de energía para desalinizar el agua es de aproximadamente  $1,1 \text{ kWh/m}^3$  para agua de mar ( $35000 \text{ mg/L}$ ) y de  $0,12 \text{ kWh/m}^3$  para agua subterránea ( $4000 \text{ mg/L}$ ). En los procesos de desalinización más empleados como RO, MED y MSF, la energía proviene principalmente de combustibles fósiles [76], aunque progresivamente se reduce este consumo haciendo a estos procesos más eficientes [98, 99, 100]. Considerando esta reducción del consumo, la energía requerida actualmente fluctúa entre 10 y  $20 \text{ kWh/m}^3$  en la mayoría de métodos, como se puede apreciar en la Figura 14 [101].

#### 3.2. Costos del agua desalinizada

En la Figura 15 se muestran los costos comparativos del agua obtenida por distintos métodos de desalinización. El costo real depende de factores locales como costo del terreno, mano de obra, insumos y energía, por lo que pueden presentar grandes variaciones de un lugar a otro.

Tabla 2: Características de los principales métodos de desalinización

Método	Estado	Alimentación*	Comentario	Tipo energía**
Destilación multi efecto (MED)	Comercial	AM/AS		T
Evaporación instantánea multi etapa(MSF)	Comercial	AM/AS		T
Compresión de vapor (MVC)	Comercial	AM/AS	Baja productividad	E
Ósmosis Inversa (RO)	Comercial	AM/AS		E
Ósmosis directa (FO)	Usos muy específicos	AS	Produce agua de uso industrial (no bebible)	E
Nano filtración (NF)	Usos muy específicos	AS	Se obtiene agua con alto TDS (agua blanda)	E
Electrólisis (ED)	Comercial	AS	Alto costo	E
Deionización capacitiva (CDI)	En desarrollo	AS	Alto costo	E
Hidratos de gas (GHYD)	En desarrollo	AM/AS		E
FR	En desarrollo	AM/AS		E
Destilación con membranas (MD)	Comercial aplicado a alimentos	AM/AS		E
IEX	Comercial aplicado a agua desmineralizada	AS		E
Destilación solar (SD)	En desarrollo	AM/AS	Baja productividad	S
Humidificación-dehumidación de aire(HDH)	En desarrollo	AM/AS		E
Adsorción (ADS)	En desarrollo	AM/AS		E

\* AM: Agua de mar, AS: Aguas salobres o subterráneas

\*\*T: térmica, E: eléctrica, S: solar

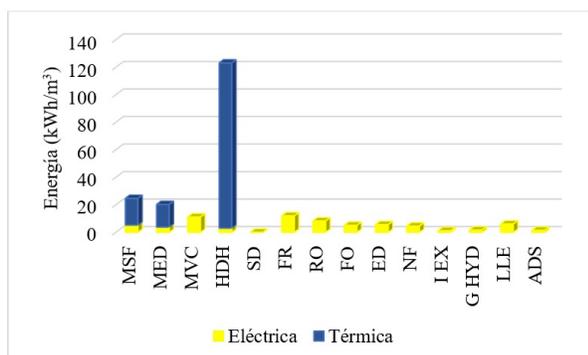


Figura 14: Consumo energético de los métodos de desalinización

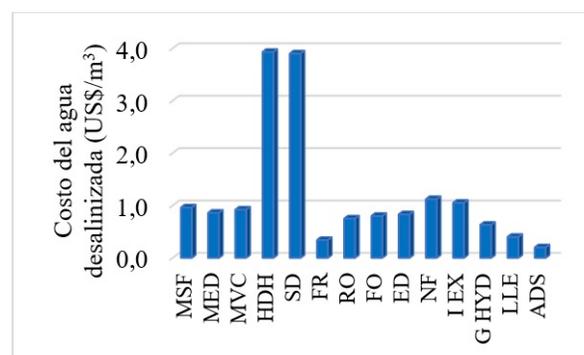


Figura 15: Costo del agua obtenida por los distintos métodos de desalinización [101]

#### 4. Conclusiones

Se han presentado alrededor de 20 métodos diferentes de desalinización, pero la mayoría de plantas en el mundo continúan empleando fundamentalmente RO, MSF y MED. De los datos disponibles de las plantas actualmente en funcionamiento se evidencia que la ósmosis inversa es el método que permite producir agua con el menor costo. Los trabajos presentados durante la última década, se han enfocado principalmente en mejorar la eficiencia de los métodos existentes,

más que en presentar otros nuevos. Por las características propias de su funcionamiento, los métodos más apropiados para tratar aguas de baja salinidad, son los basados en membranas y en electrolisis. La fuente de energía empleada en la mayoría de los métodos de desalinización proviene de combustibles fósiles, generando una alta huella de carbono. El consumo de energía reportado por algunos métodos es muy bajo, sin embargo, se requieren estudios en plantas de tamaño mediano y grande para conocer sus costos reales. La ventaja de

procesos como el de hidratos de gas, congelación, los métodos basados en filtración y deionización capacitiva, es que pueden instalarse en plantas de pequeño volumen en sistemas descentralizados de abastecimiento.

## 5. Referencias

- [1] J. Nihill, M. Leary, and A. Date, “A Novel Approach to Low Temperature Thermal Reverse Osmosis Desalination,” *Procedia Technology*, vol. 20, pp. 144–148, 2015.
- [2] K. P. Lee, T. C. Arnot, and D. Mattia, “A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—development to date and future potential,” *Journal of Membrane Science*, vol. 370, no. 1–2, pp. 1–22, 2011.
- [3] A. D. Khawaji, I. K. Kutubkhanah, and J.-M. Wie, “Advances in seawater desalination technologies,” *Desalination*, vol. 221, no. 1–3, pp. 47–69, 2008.
- [4] G. N. Tiwari, H. N. Singh, and R. Tripathi, “Present status of solar distillation,” *Solar energy*, vol. 75, no. 5, pp. 367–373, 2003.
- [5] D. Curto, V. Franzitta, and A. Guercio, “A Review of the Water Desalination Technologies,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, p. 670, 2021.
- [6] A. Alkaisi, R. Mossad, and A. Sharifian-Barforoush, “A review of the water desalination systems integrated with renewable energy,” *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 268–274, 2017.
- [7] S. A. Kalogirou, “Seawater desalination using renewable energy sources,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 31, no. 3, pp. 242–281, 2005.
- [8] S. Miller, H. Shemer, and R. Semiat, “Energy and environmental issues in desalination,” *Desalination*, vol. 366, pp. 2–8, 2015.
- [9] P. G. Youssef, R. K. AL-Dadah, and S. M. Mahmoud, “Comparative Analysis of Desalination Technologies,” *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 2604–2607, 2014.
- [10] M. Chang and Y. Hwang, “Coupling of MED–TVC with SMART for nuclear desalination,” *International journal of nuclear desalination*, vol. 1, no. 1, pp. 69–80, 2003.
- [11] T. H. Dahdah and A. Mitsos, “Structural optimization of seawater desalination: I. A flexible superstructure and novel MED–MSF configurations,” *Desalination*, vol. 344, pp. 252–265, 2014.
- [12] A. N. Mabrouk and H. E. Fath, “Technoeconomic study of a novel integrated thermal MSF–MED desalination technology,” *Desalination*, vol. 371, pp. 115–125, 2015.
- [13] B. Van der Bruggen and C. Vandecasteele, “Distillation vs. membrane filtration: overview of process evolutions in seawater desalination,” *Desalination*, vol. 143, no. 3, pp. 207–218, 2002.
- [14] A. El-Ghonemy, “Performance test of a sea water multi-stage flash distillation plant: Case study,” *Alexandria engineering journal*, vol. 57, no. 4, pp. 2401–2413, 2018.
- [15] O. Kotb, “Optimum numerical approach of a MSF desalination plant to be supplied by a new specific 650MW power plant located on the Red Sea in Egypt,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 257–265, 2015.
- [16] S. Avlonitis, K. Kouroumbas, and N. Vlachakis, “Energy consumption and membrane replacement cost for seawater RO desalination plants,” *Desalination*, vol. 157, no. 1, pp. 151–158, 2003.
- [17] N. Eid, “Overview of Membranes Technologies for Remediating Brackish Water,” *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, vol. 13, no. 1, pp. 8–12, 2013.
- [18] Y. A. Maher, M. E. Ali, H. E. Salama, and M. W. Sabaa, “Preparation, characterization and evaluation of chitosan biguanidine hydrochloride as a novel antiscalant during membrane desalination process,” *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 13, no. 1, pp. 2964–2981, 2020.
- [19] H. Ettouney, “Design and analysis of humidification dehumidification desalination process,” *Desalination*, vol. 183, no. 1–3, pp. 341–352, 2005.
- [20] Q. Ma, C. Yi, H. Lu, L. Xie, J. Fan, and W. He, “A conceptual demonstration and theoretical design of a novel “super-gravity” vacuum flash process for seawater desalination,” *Desalination*, vol. 371, pp. 67–77, 2015.
- [21] H. Ettouney, H. El-Dessouky, and Y. Al-Roumi, “Analysis of mechanical vapour compression desalination process,” *International journal of energy research*, vol. 23, no. 5, pp. 431–451, 1999.
- [22] H. Jia and Y. Zhang, “Nuclear seawater desalination plant coupled with 200 MW heating reactor,” *International Journal of Nuclear Desalination*, vol. 3, no. 2, pp. 230–239, 2008.
- [23] Y. Bouaichaoui, A. Belkaid, and S. A. Amzert, “Economic and safety aspects in nuclear seawater desalination,” *Procedia Engineering*, vol. 33, pp. 146–154, 2012.
- [24] A. Sudi and A. Siti, “Economic Aspect for Nuclear Desalination Selection in Muria Peninsula,” in *Proceedings of an International Conference on Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21. Century*, Vienna (Austria), 2009.
- [25] B. M. Misra, “Advances in nuclear desalination,” *International journal of nuclear desalination*, vol. 1, no. 1, pp. 19–29, 2003.
- [26] I. Khamis, “A global overview on nuclear desalination,” *International Journal of Nuclear Desalination*, vol. 3, no. 4, pp. 311–328, 2009.

- [27] A. Belkaid, S. A. Amzert, Y. Bouaichaoui, and H. Chibane, "Economic Study of Nuclear Seawater Desalination for Mostaganem Site," *Procedia Engineering*, vol. 33, pp. 134–145, 2012.
- [28] P. Asiedu-Boateng, B. Nyarko, S. Yamoah, F. Ameyaw, and K. Tuffour-Acheampong, "Comparison of the Cost of Co-Production of Power and Desalinated Water from Different Power Cycles," *Energy and Power Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 26–35, 2013.
- [29] A. Al-Othman, N. N. Darwish, M. Qasim, M. Tawalbeh, N. A. Darwish, and N. Hilal, "Nuclear desalination: A state-of-the-art review," *Desalination*, vol. 457, pp. 39–61, 2019.
- [30] B. Bouchekima, "A solar desalination plant for domestic water needs in arid areas of South Algeria," *Desalination*, vol. 153, no. 1–3, pp. 65–69, 2003.
- [31] P. Cooper, "The maximum efficiency of single-effect solar stills," *Solar Energy*, vol. 15, no. 3, pp. 205–214, 1973.
- [32] I. Al-Hayekaa and O. O. Badran, "The effect of using different designs of solar stills on water distillation," *Desalination*, vol. 169, no. 2, pp. 121–127, 2004.
- [33] E. Chafik, "A new seawater desalination process using solar energy," *Desalination*, vol. 153, no. 1–3, pp. 25–37, 2003.
- [34] P. Cooper and R. Dunkle, "A non-linear flat-plate collector model," *Solar Energy*, vol. 26, no. 2, pp. 133–140, 1981.
- [35] A. El-Sebaai and E. El-Bialy, "Advanced designs of solar desalination systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 1198–1212, 2015.
- [36] G. Lof, J. Eibling, and J. Bloemer, "Energy balances in solar distillers," *AIChE Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 641–649, 1961.
- [37] S. Kumar and G. Tiwari, "Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems," *Solar energy*, vol. 57, no. 6, pp. 459–464, 1996.
- [38] S. Mullick, "Estimation of heat-transfer coefficients, the upward heat flow, and evaporation in a solar still," *Journal of solar energy engineering*, vol. 113, no. 1, pp. 36–41, 1991.
- [39] K. Sampathkumar, T. Arjunan, P. Pitchandi, and P. Senthilkumar, "Active solar distillation-a detailed review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 6, pp. 1503–1526, 2010.
- [40] J. Y. Alaydi, "Design of a parabolic solar collector system for seawater desalination in Gaza," *Desalination and Water Treatment*, vol. 52, no. 13–15, pp. 2502–2511, 2014.
- [41] H.-M. Yeh and N.-T. Ma, "Energy balances for upward-type, double-effect solar stills," *Energy*, vol. 15, no. 12, pp. 1161–1169, 1990.
- [42] M. Bindu and G. J. Herbert, "A review on application of nanomaterials in heat transfer fluid for parabolic trough concentrator," in *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [43] L. Zuo, Z. Liu, P. Dai, N. Qu, L. Ding, Y. Zheng, and Y. Ge, "Economic performance evaluation of the wind supercharging solar chimney power plant combining desalination and waste heat after parameter optimization," *Energy*, vol. 227, p. 120496, 2021.
- [44] E. Abdelsalam, F. Kafiah, M. Tawalbeh, F. Almani, A. Azzam, I. Alzoubi, and M. Alkasrawi, "Performance analysis of hybrid solar chimney–power plant for power production and seawater desalination: A sustainable approach," *International Journal of Energy Research*, pp. 1–15, 2020.
- [45] L. Zuo, Z. Liu, N. Qu, P. Dai, Y. Sun, and B. Qu, "Economic analysis of a wind supercharging solar chimney power plant combined with thermal plant for power and freshwater generation," in *2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [46] I. M. Alarif, A. G. Abo-Khalil, A.-R. Al-Qawasm, W. Alharbi, and M. Alobaid, "On the effects of nanomaterials on the performance of solar distillation systems-A comprehensive review," *Solar Energy*, vol. 218, pp. 596–610, 2021.
- [47] M. A. Anderson, A. L. Cudero, and J. Palma, "Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: Will it compete?" *Electrochimica Acta*, vol. 55, no. 12, pp. 3845–3856, 2010.
- [48] A. H. M. Golam-Hyder, B. A. Morales, M. A. Cappelle, S. J. Percival, L. J. Small, E. D. Spoerke, S. B. Rempe, and W. Shane Walker, "Evaluation of Electrodialysis Desalination Performance of Novel Bioinspired and Conventional Ion Exchange Membranes with Sodium Chloride Feed Solutions," *Membranes*, vol. 11, no. 3, p. 217, 2021.
- [49] U. Assalaam, "Technology Reverse Electrodialysis Membrane," *Journal of Membranes and Materials*, vol. 1, no. 1, pp. 10–19, Mar. 2021.
- [50] L. Gurreri, A. Filingeri, M. Ciofalo, A. Cipollina, M. Tedesco, A. Tamburini, and G. Micale, "Electrodialysis with asymmetrically profiled membranes: Influence of profiles geometry on desalination performance and limiting current phenomena," *Desalination*, vol. 506, p. 115001, Jun. 2021.
- [51] J. Koschikowski, M. Wieghaus, and M. Rommel, "Solar thermal driven desalination plants based on membrane distillation," *Desalination*, vol. 156, no. 1–3, pp. 295–304, 2003.
- [52] S. B. Abdallah, N. Frikha, and S. Gabsi, "Study of the performances of different configurations of seawater desalination with a solar membrane distillation," *Desalination and Water Treatment*, vol. 52, no. 13–15, pp. 2362–2371, 2014.
- [53] Z. Zhang, O. R. Lokoare, A. V. Gusa, and R. D. Vidic, "Pretreatment of brackish water reverse osmosis

- (BWRO) concentrate to enhance water recovery in inland desalination plants by direct contact membrane distillation (DCMD)," *Desalination*, vol. 508, p. 115050, 2021.
- [54] I.-M. Hsieh, A. K. Thakur, and M. Malmali, "Comparative analysis of various pretreatments to mitigate fouling and scaling in membrane distillation," *Desalination*, vol. 509, p. 115046, 2021.
- [55] A. H. Avci, S. Santoro, A. Politano, M. Propato, M. Micieli, M. Aquino, Z. Wenjuan, and E. Curcio, "Photothermal Sweeping Gas Membrane Distillation and Reverse Electrodialysis for light-to-heat-to-power conversion," *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, vol. 164, p. 108382, 2021.
- [56] H. Lu, W. Shi, F. Zhao, W. Zhang, P. Zhang, C. Zhao, and G. Yu, "High-Yield and Low-Cost Solar Water Purification via Hydrogel-Based Membrane Distillation," *Advanced Functional Materials*, vol. 31, no. 19, p. 2101036, 2021.
- [57] M. Khayet, M. Godino, and J. Mengual, "Possibility of nuclear desalination through various membrane distillation configurations: a comparative study," *International journal of nuclear desalination*, vol. 1, no. 1, pp. 30–46, 2003.
- [58] M. Khayet, "Solar desalination by membrane distillation: Dispersion in energy consumption analysis and water production costs (a review)," *Desalination*, vol. 308, pp. 89–101, 2013.
- [59] G. W. Meindersma, C. M. Guijt, and A. B. de Haan, "Desalination and water recycling by air gap membrane distillation," *Desalination*, vol. 187, no. 1–3, pp. 291–301, 2006.
- [60] U. Mardiana, C. Innocent, M. Cretin, and B. Buchari, "A New Method of Bio-Catalytic Surface Modification for Microbial Desalination Cell," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 10, no. 2, pp. 345–354, 2021.
- [61] H. H. Salman and Z. Z. Ismail, "Modeling and simulation of the processes in desalination fuel cell fed with actual wetland brackish water," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 51, pp. 905–916, 2021.
- [62] C.-Y. Ma and C.-H. Hou, "Enhancing the water desalination and electricity generation of a microbial desalination cell with a three-dimensional macroporous carbon nanotube-chitosan sponge anode," *Science of The Total Environment*, vol. 675, pp. 41–50, 2019.
- [63] S. Seveda, H. Yuan, Z. He, and I. M. Abu-Reesh, "Microbial desalination cells as a versatile technology: functions, optimization and prospective," *Desalination*, vol. 371, pp. 9–17, 2015.
- [64] Y. Oren, "Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment—past, present and future (a review)," *Desalination*, vol. 228, no. 1–3, pp. 10–29, 2008.
- [65] Y. Bouhadana, E. Avraham, M. Noked, M. Ben-Tzion, A. Soffer, and D. Aurbach, "Capacitive deionization of NaCl solutions at non-steady-state conditions: inversion functionality of the carbon electrodes," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 115, no. 33, pp. 16 567–16 573, 2011.
- [66] E. T. Sayed, M. A. Radi, A. Ahmad, M. A. Abdelkareem, H. Alawadhi, M. A. Atieh, and A. G. Olabi, "Faradic Capacitive Deionization (FCDI) for Desalination and Ion Removal from Wastewater," *Chemosphere*, vol. 275, p. 130001, 2021.
- [67] Y.-H. Liu, T.-C. Yu, Y.-W. Chen, and C.-H. Hou, "Incorporating manganese dioxide in carbon nanotube–chitosan as a pseudocapacitive composite electrode for high-performance desalination," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 3196–3205, 2017.
- [68] J. C. Farmer, D. V. Fix, G. V. Mack, R. W. Pekala, and J. F. Poco, "Capacitive deionization of NaCl and NaNO<sub>3</sub> solutions with carbon aerogel electrodes," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 143, no. 1, pp. 159–169, 1996.
- [69] X.-X. Ke, T.-Y. Wang, X.-Q. Wu, J.-P. Chen, Q.-B. Zhao, and Y.-M. Zheng, "Alleviation of Reverse Salt Leakage across Nanofiber Supported Thin-Film Composite Forward Osmosis Membrane via Heat-Curing in Hot Water," *Membranes*, vol. 11, no. 4, p. 237, 2021.
- [70] M.-N. Li, X.-J. Chen, Z.-H. Wan, S.-G. Wang, and X.-F. Sun, "Forward osmosis membranes for high-efficiency desalination with Nano-MoS<sub>2</sub> composite substrates," *Chemosphere*, vol. 278, p. 130341, 2021.
- [71] P. Deka, V. K. Verma, B. Yurembam, A. B. Neog, K. Raidongia, and S. Subbiah, "Performance evaluation of reduced graphene oxide membrane doped with polystyrene sulfonic acid for forward osmosis process," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 44, p. 101093, 2021.
- [72] R. L. McGinnis and M. Elimelech, "Energy requirements of ammonia–carbon dioxide forward osmosis desalination," *Desalination*, vol. 207, no. 1–3, pp. 370–382, 2007.
- [73] A. Shakeri, H. Salehi, and M. Rastgar, "Chitosan-based thin active layer membrane for forward osmosis desalination," *Carbohydrate polymers*, vol. 174, pp. 658–668, 2017.
- [74] J. R. McCutcheon, R. L. McGinnis, and M. Elimelech, "A novel ammonia–carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process," *Desalination*, vol. 174, no. 1, pp. 1–11, 2005.
- [75] M. Pachter and A. Barak, "The vacuum freezing vapor compression (Zarchin) process Present status and future trends," *Desalination*, vol. 2, no. 3, pp. 358–367, 1967.
- [76] W. Cao, C. Beggs, and I. M. Mujtaba, "Theoretical approach of freeze seawater desalination on flake ice maker utilizing LNG cold energy," *Desalination*, vol.

- 355, pp. 22–32, 2015.
- [77] E. Hernández Yáñez, M. Blanco Abellán, N. V. Pazmiño, M. Raventós Santamaria, S. Samsuri, R. Y. Ruiz Pardo, F. L. Moreno Moreno, and A. Rich, “Two strategies for freeze desalination of seawater by progressive and block techniques,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 215, pp. 1–9, 2021.
- [78] M. Salajeghe and M. Ameri, “Performance investigation of freezing desalination coupled with carbon dioxide refrigeration system,” *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 5, pp. 16–16, 2020.
- [79] A. Rich, Y. Mandri, D. Mangin, A. Rivoire, S. Abderafi, C. Bebon, N. Semlali, J.-P. Klein, T. Bounahmidi, A. Bouhaouss, and S. Veessler, “Sea water desalination by dynamic layer melt crystallization: Parametric study of the freezing and sweating steps,” *Journal of Crystal Growth*, vol. 342, no. 1, pp. 110–116, 2012.
- [80] T. Gettongsong, M. Taseidifar, R. M. Pashley, and B. W. Ninham, “Novel Resins for Efficient Desalination,” *Substantia*, vol. 4, no. 2, pp. 39–48, 2020.
- [81] T. Gettongsong, M. Taseidifar, and R. M. Pashley, “New Resins for Ion Exchange Applications and a Process for Their Sustainable Regeneration,” *Substantia*, vol. 4, no. 2, pp. 33–37, 2020.
- [82] S. Burn, M. Hoang, D. Zarzo, F. Olewniak, E. Campos, B. Bolto, and O. Barron, “Desalination techniques—a review of the opportunities for desalination in agriculture,” *Desalination*, vol. 364, pp. 2–16, 2015.
- [83] M. Faegh, P. Behnam, M. B. Shafii, and M. Khiadani, “Development of artificial neural networks for performance prediction of a heat pump assisted humidification-dehumidification desalination system,” *Desalination*, vol. 508, p. 115052, 2021.
- [84] S. M. Negharchi, A. Najafi, A. A. Nejad, and N. Ghadimi, “Determination of the optimal model for solar humidification dehumidification desalination cycle with extraction and injection,” *Desalination*, vol. 506, p. 114984, 2021.
- [85] M. H. Elbassoussi, M. Antar, and S. M. Zubair, “Hybridization of a triple-effect absorption heat pump with a humidification-dehumidification desalination unit: Thermodynamic and economic investigation,” *Energy Conversion and Management*, vol. 233, p. 113879, 2021.
- [86] Y. Elhenawy, “Experimental Investigation of the Helical Condenser for Humidification Dehumidification Desalination Unit Powered by Solar Energy,” *Journal of Environmental Treatment Techniques*, vol. 9, no. 2, pp. 402–409, 2021.
- [87] Y. Cao, H. A. Dhahad, T. Parikhani, A. E. Anqi, and A. M. Mohamed, “Thermo-economic evaluation of a combined Kalina cycle and humidification-dehumidification (HDH) desalination system integrated with thermoelectric generator and solar pond,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 168, p. 120844, 2020.
- [88] R. Tariq, J. Jimenez, N. Ahmed Sheikh, and S. Khan, “Mathematical Approach to Improve the Thermoeconomics of a Humidification Dehumidification Solar Desalination System,” *Mathematics*, vol. 9, no. 33, pp. 1–31, 2020.
- [89] R. Das, M. E. Ali, S. B. A. Hamid, S. Ramakrishna, and Z. Z. Chowdhury, “Carbon nanotube membranes for water purification: a bright future in water desalination,” *Desalination*, vol. 336, pp. 97–109, 2014.
- [90] S. Mitra, K. Srinivasan, P. Kumar, S. Murthy, and P. Dutta, “Solar driven adsorption desalination system,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 2261–2269, 2014.
- [91] O. Alnajdi, Y. Wu, and J. Kaiser Calautit, “Toward a sustainable decentralized water supply: review of adsorption desorption desalination (ADD) and current technologies: Saudi Arabia (SA) as a case study,” *Water*, vol. 12, no. 4, p. 1111, 2020.
- [92] K. C. Kang, P. Linga, K.-n. Park, S.-J. Choi, and J. D. Lee, “Seawater desalination by gas hydrate process and removal characteristics of dissolved ions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{B}^{3+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ),” *Desalination*, vol. 353, pp. 84–90, 2014.
- [93] K.-n. Park, S. Y. Hong, J. W. Lee, K. Chan Kang, Y. Cheol Lee, M.-G. Ha, and J. Dong Lee, “A new apparatus for seawater desalination by gas hydrate process and removal characteristics of dissolved minerals  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{B}^{3+}$ ,” *Desalination*, vol. 274, no. 1–3, pp. 91–96, 2011.
- [94] M. M. Falahieh, M. Bonyadi, and A. Lashanizadegan, “A new hybrid desalination method based on the  $\text{CO}_2$  gas hydrate and capacitive deionization processes,” *Desalination*, vol. 502, p. 114932, 2021.
- [95] S. Nallakukkala, Z. Kassim, N. A. Othman, and B. Lal, “Advancement in Gas Hydrate Water Based Produced Water Desalination: An Overview,” in *Third International Conference on Separation Technology 2020 (ICoST 2020)*. Atlantis Press., 2020, pp. 190–197.
- [96] M. Usman, Z. Rehman, K. Seong, and M. H. Song, “Vacuum degassing of aqueous tetrafluoroethane ( $\text{R134a}$ ) solution during seawater desalination utilizing gas hydrate,” *Desalination*, vol. 498, p. 114754, 2021.
- [97] M. Karamoddin and F. Varaminian, “Water desalination using  $\text{R141b}$  gas hydrate formation,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 52, no. 13–15, pp. 2450–2456, 2014.
- [98] R. Zhao, L. Zhao, S. Deng, Y. Tan, Y. Liu, and Z. Yu, “Techno-economic study of solar-assisted post-combustion carbon capture system integrated with desalination,” *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 1614–

- 1617, 2014.
- [99] S. Loutatidou and H. A. Arafat, "Techno-economic analysis of MED and RO desalination powered by low-enthalpy geothermal energy," *Desalination*, vol. 365, pp. 277–292, 2015.
- [100] D. Han, "Study on zero-emission desalination system based on mechanical vapor recompression technology," *Energy procedia*, vol. 75, pp. 1436–1444, 2015.
- [101] P. Youssef, R. Al-Dadah, and S. Mahmoud, "Comparative analysis of desalination technologies," *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 2604–2607, 2014.

auxiliar, 2013. Actualmente se desempeña como profesora de la Facultad de Ingeniería química, de la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae. Es además, Jefa del grupo de investigaciones Ingeniería ambiental, y Vicedecana de Investigaciones y Posgrados de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae.

## Breve reseña de los autores

### 1. *Henry Salinas* (Ambato, Ecuador)

Ingeniero Químico por la Universidad Central de Ecuador, posteriormente obtuvo el título de Ms.C en la Pontificia Universidad Católica de Ecuador. Actualmente es Candidato al Doctorado en Procesos de Ingeniería Química por la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE en Cuba, desarrollando un trabajo relacionado con la desalinización de agua de mar empleando destiladores solares, tema sobre el cual ha realizado algunas publicaciones y ponencias en Congresos Científicos Internacionales.

### 2. *Osney Pérez Ones* (La Habana, Cuba)

Ingeniero Químico (1998), Máster en Tecnología de la Industria Azucarera (2003). Doctor en Ciencias Técnicas (2011). Profesor Auxiliar (2012). Decano (2015-actualidad) de la Facultad de Ingeniería Química de la Cujae. Tutor de Trabajos de Diploma de Ingeniería Química, Tesinas de Diplomado y Tesis de Maestría. Ha participado en la red temática CYTED y otros proyectos de investigación. Por sus resultados en las investigaciones ha recibido reconocimientos y premios.

### 3. *Dr. C. Susana Rodríguez Muñoz* (Cuba)

Graduada de Ingeniero químico en julio del año 2000, en el Instituto Superior José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba. Máster en Ingeniería en Saneamiento ambiental, 2004. Grado científico: Doctor en Ciencias Técnicas, enero del 2010 y Categoría docente: Profesor