

Desionización electroquímica: una tecnología emergente para la desalinización del agua y el  
almacenamiento de energía

Baruc Alharabi leal rojas  
Valentina Gómez Camacho

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico

Director

Dr. Juvencio Vázquez Samperio  
Investigador posdoctoral Gimba UIS

Codirector

Dr. Julio Andrés Pedraza Avella  
Profesor escuela de ingeniería química

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de ingenierías fisicoquímicas  
Escuela de ingeniería química  
Bucaramanga

2022

**Dedicatoria**

*Agradezco infinitamente a mis padres, Baruc y Adriana, por ser el soporte y la guía de mi vida y mi motivo de orgullo.*

*A mi nona y Dayana, quienes son la razón para cada día dar lo mejor de mí y a quienes llevo siempre en mi corazón.*

*A Elsita, por siempre estar atenta y ser una increíble persona en todo momento.*

*A Sofia, por haberme apoyado siempre y haberme llenado de tantas alegrías.*

*A mis amigos de universidad, con quienes compartí grandes experiencias y dejaron una gran marca en mí.*

*A los grandes profesores que me transmitieron todo su conocimiento y llenaron mi estancia de grandes enseñanzas.*

*Y, sobre todo, al ingeniero que nace con este libro, producto de su gran esfuerzo y dedicación, que supo afrontar las adversidades y nunca rendirse.*

***Baruc Alharabi Leal Rojas***

### **Dedicatoria**

*A Dios. por la entereza que hoy me caracteriza.*

*A mis padres, luz Amparo y Orlando. Quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un gran sueño.*

*A mi hermana, María José. Por ser fuente de mi inspiración y mi felicidad.*

*A mis abuelitas. Que desde el cielo me mandaron mucha energía.*

*A mis amigos y compañeros, especialmente a Nicolas. Por acompañarme en este viaje y no dejar que me rindiera nunca.*

*A los profesores que ayudaron a construir no solo una buena profesional sino una buena mujer.*

*Pero, sobre todo a la ingeniera química que nace con la entrega de este libro, porque supero cada obstáculo y logro sus objetivos.*

**Valentina Gómez Camacho**

### **Agradecimientos**

Al Dr. Juvencio Vazquez Samperio, por su gran amabilidad, compromiso y seguimiento en el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. Julio Andrés Pedraza Avella, por su paciencia y gran trabajo de acompañamiento al momento de desarrollar este trabajo de investigación.

A los miembros del grupo de Investigación GIMBA - UIS y Semillero de Investigación de Materiales, Electroquímica y Ambiente - UIS, por su colaboración.

Y a cada uno de los docentes de la Universidad Industrial de Santander, que con su gran esfuerzo y dedicación hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

	<i>Tabla de contenido</i>	<i>Pág.</i>
<b>1. Introducción</b>		<b>1</b>
1.1. Generalidades		1
1.2. Objetivos		3
1.2.1. Objetivo general		3
1.2.2. Objetivos específicos		3
1.3. Descripción del problema		4
<b>2. Marco teórico</b>		<b>5</b>
2.1. Desalinización		5
2.1.1. ¿Qué es la desalinización?		5
2.1.2. Historia de la desalinización		6
2.1.3. Características fisicoquímicas del agua y su clasificación		7
2.2. Breve descripción de las tecnologías de desalinización		7
<b>3. Desionización electroquímica</b>		<b>11</b>
3.1. Introducción		11
3.2. Antecedentes históricos edi		12
3.3. Fundamentos del EDI		12
3.4. Fenómenos relacionados con desionización electroquímica		15
3.4.1. Comprensión de EDI utilizando el concepto de ventanas de voltaje operativo.		16
3.4.2. Fundamentos de la carga-transferencia entre electrodos		16
3.5. Diseño de celdas y dispositivos EDI		17
3.5.1. Celdas con electrodos estáticos		17
3.5.2. Celdas con electrodos de flujo		18
3.6. Modos de operación		20
3.7. Prestaciones energéticas y de eficiencia		20
3.8. Materiales EDLC utilizados en EDI		21
3.8.1. Carbones activados		22
3.8.2. Carbonos mesoporosos ordenados		23

3.8.3.	<i>Aerogeles de carbono</i> .....	24
3.8.4.	<i>Carbones derivados de carburos</i> .....	24
3.8.5.	<i>Nanotubos de carbono y grafeno</i> .....	25
3.8.6.	<i>Negro de carbón</i> .....	26
3.9.	<i>Materiales faradaicos utilizados en EDI</i> .....	26
3.9.1.	<i>Materiales de electrodos faradaicos de captura de Na<sup>+</sup></i> .....	27
3.9.2.	<i>Materiales de electrodos faradaicos de captura de Cl<sup>-</sup></i> .....	29
3.9.3.	<i>Materiales de electrodos faradaicos de captura de Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup></i> .....	30
3.10.	<i>Propuesta de sistema de materiales</i> .....	31
<b>4.</b>	<b><i>Conclusiones</i></b> .....	<b>35</b>
<b>5.</b>	<b><i>Referencias bibliográficas</i></b> .....	<b>36</b>
<b>6.</b>	<b><i>Apéndices</i></b> .....	<b>40</b>

### Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema de funcionamiento de EDI: carga (Superior) y descarga (Inferior)..	14
<b>Figura 2.</b> Proceso de experimentos de celdas EDI por lotes.....	15
<b>Figura 3.</b> Esquemas de diferentes disposiciones de celdas EDI con electrodos estáticos	18
<b>Figura 4.</b> Esquemas de las diferentes disposiciones de las celdas EDI con electrodos de flujo.....	19
<b>Figura A.1.</b> Cronología sobre los aspectos más relevantes de la historia de la desalinización.....	44
<b>Figura A.2.</b> Salinidad media anual superficial para los océanos, en unidades prácticas de salinidad (PSU) o gramos de sal por litro .....	45
<b>Figura A.3.</b> pH superficial del agua marina en el año 2015 .....	49
<b>Figura A.4.</b> Diagrama de las principales características del agua .....	50
<b>Figura A.5.</b> Proceso de Osmosis Inversa .....	52
<b>Figura A.6.</b> Esquema de un proceso de destilación multi-efecto (MED).....	53
<b>Figura A.7.</b> Esquema de un proceso de destilación multi-etapa (MSF) .....	55
<b>Figura A.8.</b> Descripción esquemática del proceso de Electrodiálisis Inversa .....	56

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> Métodos de Desalinización Existentes en el Mercado.....	8
<b>Tabla A.1.</b> Clasificación del tipo de agua basada en el contenido de salinidad.....	46
<b>Tabla A.2.</b> Porcentajes de los principales iones presentes en el agua de mar según W. Dittmar y Lyman & Flemming. ....	47
<b>Tabla A.3.</b> Temperaturas máximas y mínimas en las zonas costeras de los principales mares del mundo.....	48
<b>Tabla A.4.</b> Criterios de Operación de Diferentes Tecnologías de Desalinización.....	57
<b>Tabla B.1.</b> Resumen del rendimiento de adsorción de sal informado para diferentes materiales de electrodos aplicados para EDIs.....	62

**Lista de gráficas**

**Gráfica 1.** Porcentaje de origen del agua de alimentación en el proceso de desalinización a nivel mundial..... 6

**Gráfica 2.** Comparación de la capacidad de eliminación de sal de celdas EDI basadas en electrodos Faradaicos representativas en solución de NaCl de diferente concentración..... 64

**Lista de apéndices**

**Apéndice A.** Información correspondiente a la búsqueda de datos ..... 40

**Apéndice B.** Información complementaria sobre edi..... 57

## Resumen

**Título:** Desionización electroquímica: una tecnología emergente para la desalinización del agua y el almacenamiento de energía\*

**Autor:** Baruc Alharabi Leal Rojas y Valentina Gómez Camacho\*\*

**Palabras Clave:** Desalinización, desionización, electrodo, energía, almacenamiento, remoción

### Descripción:

Una de las problemáticas más apremiantes en la actualidad es la escasez de agua potable en el mundo debido a la gran demanda que se presenta, dado que este recurso es indispensable para la sociedad moderna. Esto conlleva a buscar tecnologías que permitan aprovechar la gran cantidad de agua con concentraciones altas de sales que se encuentra en el mundo, por lo que la desalinización surge como una tecnología eficiente para la generación de agua potable. Técnicas como la ósmosis inversa, la destilación y la electrodiálisis son pioneras en el entorno de la purificación del agua; sin embargo, la desionización electroquímica nace como una tecnología prometedora capaz de alcanzar rendimientos iguales o superiores que las ya mencionadas técnicas, añadiendo la capacidad de almacenar la energía utilizada en este proceso. Dicho esto, la desionización electroquímica es un proceso electroquímicamente controlado que se basa en la retención de iones procedentes de una disolución salina que pasa a través de dos electrodos sometidos a un determinado voltaje; los iones son electroadsorbidos produciéndose de manera simultánea la desalación y el almacenamiento de energía. Así mismo, es una tecnología que al no requerir de altas presiones de operación ni de energía térmica para su funcionamiento es considerada una buena alternativa para reemplazar la osmosis inversa. Sin embargo, para que esta tecnología se posicione como una de las mejores opciones para la desalinización, se necesita de materiales con características que permitan una facilidad de operación junto con bajos consumos energéticos. Por lo anterior, se realizó una revisión bibliográfica en la cual se analizaron los mecanismos y los diferentes materiales con los que la desionización electroquímica ha trabajado las últimas décadas, analizando los materiales más adecuados y con mejores características que permitan mejorar la desionización electroquímica.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Doctor Juvencio Vázquez Samperio. Codirector: Doctor Julio Andrés Pedraza Avella

## Abstract

**Title:** Electrochemical deionization: an emerging technology for water desalination and energy storage\*

**Authors:** Baruc Alharabi Leal Rojas y Valentina Gómez Camacho\*\*

**Key Words:** Desalination, deionization, electrode, energy, storage, removal

## Description:

One of the most pressing problems today is the shortage of drinking water in the world due to the great demand that is presented, since this resource is essential for modern society. This leads to the search for technologies that allow the use of the large amount of water with high concentrations of salts found in the world, so desalination emerges as an efficient technology for the generation of drinking water. Techniques such as reverse osmosis, distillation and electro dialysis are pioneers in the field of water purification; however, electrochemical deionization emerges as a promising technology capable of achieving equal or higher yields than the techniques, adding the ability to store the energy used in this process. That said, electrochemical deionization is an electrochemically controlled process that is based on the retention of ions from a saline solution that passes through two electrodes subjected to a certain voltage; the ions are electroadsorbed, simultaneously producing desalination and energy storage. Likewise, it is a technology that, since it does not require high operating pressures or thermal energy for its operation, is considered a good alternative to replace reverse osmosis. However, for this technology to position itself as one of the best options for desalination, materials with characteristics that allow ease of operation together with low energy consumption are needed. Therefore, a bibliographic review was carried out in which the mechanisms and the different materials with which electrochemical deionization has worked in recent decades were analyzed, analyzing the most suitable materials and with better characteristics that allow improving electrochemical deionization.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineerings. School of Chemical Engineering. Director: Dr. Juvencio Vázquez Samperio. Co-Director: Dr. Julio Andrés Pedraza Avella

## **Introducción**

### **1.1. Generalidades**

Actualmente, los recursos tanto hídricos como energéticos están directamente relacionados y son indispensables en todos los aspectos de la vida diaria. El agua, elemento crucial para el consumo humano, saneamiento y actividades industriales es un elemento determinante en la riqueza de un país, ya que la gestión eficiente de esta permite un desarrollo económico favorable, viéndose la escasez de este recurso como un problema básico y vital a gran escala. Si bien, a principios del siglo XX el agua era considerado un recurso inagotable, en la actualidad se presentan graves afectaciones que ponen en peligro la disposición del agua potable y de uso industrial para la población, surgiendo la problemática de que el consumo de agua potable en el mundo se ha visto aumentado alrededor de seis veces en los últimos 100 años, mientras que la población solo ha aumentado tres veces su tamaño.

Por consiguiente, se considera de vital importancia explorar diferentes alternativas que ayuden a realizar una adecuada administración y producción de agua potable. Para contrarrestar esta problemática, países como Arabia Saudita, España, Estados Unidos, India y China han sido pioneros en la implementación de tecnologías de desalinización para producir agua potable limpia a partir de agua subterránea, agua de mar y salobre, así como para mejorar la calidad de la ya existente. Basándose en los procesos de desalinización, estos han tenido una gran diversificación en las últimas décadas, variando en cuanto al sistema de tratamiento que se utiliza para la purificación del agua y sus características. Actualmente, los métodos de osmosis inversa, electrodiálisis, destilación multi-efecto y destilación multi-etapa comprenden las técnicas de desalinización más utilizadas a nivel global debido a su gran eficiencia de remoción de sales y sus

costos relativamente bajos a comparación de los muchos otros. Sin embargo, presentan dificultades específicas que incrementan el costo operacional y de implementación que dificultan la remoción de sales a grandes volúmenes de agua.

Dicho esto, surge una tecnología de desalinización prometedora que se visualiza como el futuro de los procesos de desalinización en este siglo: **la desionización electroquímica**. Este proceso es tan atractivo debido a los altos niveles de remoción de sales del agua que puede alcanzar con las diferentes modificaciones que se puede hacer a su funcionamiento; a ello es posible añadirle la específica función de poder almacenar energía a medida que realiza su proceso de desalinización, dando como resultado una gran oportunidad de llevar a grandes rasgos este método.

Este proyecto busca realizar un extenso estudio acerca de las principales características de la desionización electroquímica identificando sus principales ventajas y las posibles mejoras que se pueden aplicar en su estructura como tecnología del futuro, resaltando la importancia de la desalinización como método de purificación del agua y las diferentes técnicas utilizadas actualmente.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Realizar un estudio riguroso acerca de las técnicas de desalinización más utilizadas en la actualidad, teniendo como principal método la desionización electroquímica (EDI) y proponer un sistema de materiales que puedan utilizarse como electrodos en los dispositivos de remoción de iones alcalinos.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Establecer los mecanismos electroquímicos de remoción de iones alcalinos con base en una revisión de la literatura.
2. Identificar los materiales que han sido empleados como ánodo y cátodo en los dispositivos de desionización electroquímica y su caracterización electroquímica con base en el estado del arte.
3. Comparar los materiales que han sido empleados como electrodos en los dispositivos de desionización electroquímica teniendo en cuenta capacidad, eficiencia, tasa de desalinización, durabilidad y estabilidad.

### 1.3. Descripción del problema

El agua es un recurso esencial en el mundo moderno ya que es utilizada en una gran cantidad de actividades humanas y es imprescindible para la sociedad; sin embargo, este recurso no está exento de agotarse. De acuerdo con datos del Informe Mundial de las Naciones Unidas, en 2017 la demanda mundial de agua se estimó en alrededor de 4.600 km<sup>3</sup> por año. De esta forma se espera que esta demanda aumente entre un 20 y un 30% para el año 2050 (Fundación Aquae, 2018). De acuerdo con datos ofrecidos por el IDEAM, para el año 2012 Colombia tuvo una demanda hídrica nacional de 35,987 km<sup>3</sup>, teniendo como principal sector consumidor el agrícola, con una demanda de 16,703 km<sup>3</sup> (Sistema de Información Ambiental de Colombia- SIAC, 2011).

Resulta necesario el enfoque que debe tenerse en las fuentes hídricas que contienen agua no potable, ya que constituyen un porcentaje enorme a comparación del agua potable en el planeta tierra (alrededor del 97,5% del agua total del planeta es salada) (UNESCO, 2015). De esta forma, surgen los métodos de desalinización como respuesta a la alta demanda que se tiene de agua potable a nivel global (Villanueva, 2014). Los grandes avances en la tecnología han permitido la diversificación de los procesos de desalinización en las últimas décadas, por lo cual, se requiere el estudio detallado de estos métodos, teniendo en cuenta características como la facilidad de operación de cada método y su eficiencia desde el punto de vista energético y económico, entre los que destacan: la ósmosis inversa, la electrodiálisis y la destilación (Germán Eduardo Dévora-Isiordia, 2013). Sin embargo, para este trabajo, se hará especial énfasis en la desalinización electroquímica, proceso conocido por su eficiencia cíclica y reversibilidad y que cuenta con el valor agregado de que los materiales de transferencia de carga tienen la capacidad de almacenamiento de energía, viéndose como el tratamiento y purificación de agua de próxima generación.

## Marco teórico

### 2.1. Desalinización

#### 2.1.1. ¿Qué es la desalinización?

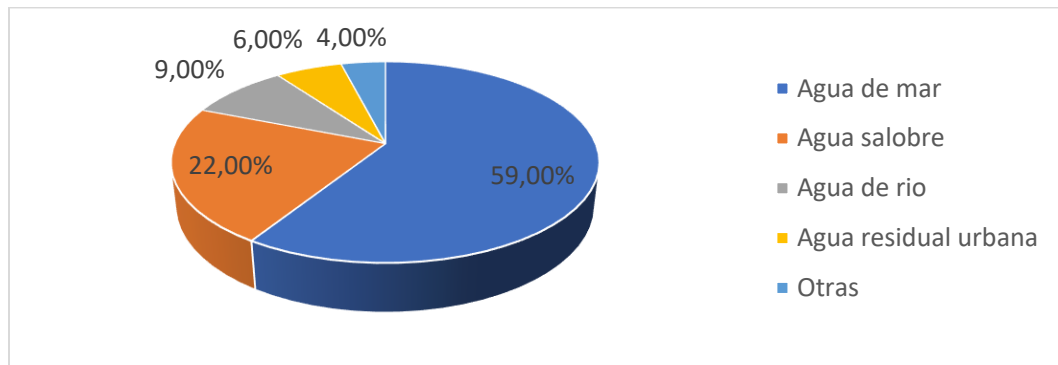
La desalinización se define como un proceso mediante el cual se realiza una separación de sales de una disolución salobre con el objetivo de obtener agua con un contenido total de sólidos disueltos (TDS) menor al establecido por diferentes especificaciones de calidad de agua (se considera aceptable un valor menor a 900 mg/L de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud OMS), suficiente para ser utilizada en actividades industriales o domésticas, variando los contenidos que se pueden alcanzar con respecto al tipo de tecnología que se utilice. Estos procesos de desalinización son procesos termodinámicos que requieren de diferentes tipos de energía para lograr su funcionamiento, y que siguen el concepto de proceso ideal como meta para alcanzar una alta eficiencia; en este sentido, se trata de un procedimiento reversible en el cual las condiciones de presión y temperatura de entrada y salida del flujo son las mismas. La gran mayoría de tecnologías se componen de cinco importantes partes en la estructura de su protocolo: la entrada de flujo de agua a tratar, una fuente de energía para el funcionamiento del mismo, la maquinaria que realizará el proceso de separación, el permeado, que se entiende como el agua con bajo contenido de sal y el rechazo, que es el agua con un mayor contenido de sales disueltas que el flujo de entrada (Fajardo, 2018).

Los tipos de agua que son tratadas para desalinización son de dos tipos: agua de mar y aguas salobres. Estas difieren en el hecho de que poseen menos cantidad de sales disueltas y provienen de pozos superficiales, subterráneos o aguas residuales depuradas, así como de acuíferos

que se encuentren en contacto directo con el mar. En la gráfica 1 se muestra el porcentaje de agua que es utilizado para procesos de desalinización de acuerdo con su origen:

### Gráfica 1.

*Porcentaje de origen del agua de alimentación en el proceso de desalinización a nivel mundial*



Nota. Adaptado de (Cabero García, 2015)

#### 2.1.2. Historia de la desalinización

A través de los años, el hombre se ha visto en la necesidad de aprovechar todos y cada uno de los recursos que se encuentran a su disposición como el agua dulce y el agua salada presentes en el planeta. En vista de esto, el ser humano ha buscado diferentes alternativas para afrontar el reto de separar las sales del agua o la purificación de esta por milenios. La desalinización es una tecnología con una amplia historia, las primeras referencias sobre la desalinización del agua datan del año 1500 A.C, y desde entonces, el proceso de desalinización ha ido captando la atención de diferentes disciplinas de la ciencia, siendo el primero de los procesos modernos de desalinización desarrollado a gran escala la desalación súbita multietapa (MSF), dejando obsoletas las técnicas de tubos sumergidos. Diferentes tecnologías tales como la destilación multietapa (MED) y la posterior invención de la ósmosis inversa (OI) han dejado ver la gran capacidad de remoción de

sales y la gran tecnología que pueden ofrecer, logrando que los procesos resulten eficientes a gran escala. La historia completa y detallada sobre la desalación se encuentra en el apéndice A.

### **2.1.3. Características fisicoquímicas del agua y su clasificación**

Para los procesos de desalinización es de vital importancia tener en cuenta la clasificación del agua que ha de tratarse, ya que esto determina directamente la tecnología a utilizar para la remoción de las sales presentes. Esta clasificación se da de acuerdo a diferentes parámetros fisicoquímicos que determinan la clase de agua que se está empleando, ya que crean una medida cuantificable de la concentración total que puede llegar a predecir las especies iónicas existentes. Los parámetros fisicoquímicos más relevantes al momento de hablar de aguas de mar y salobres son: la conductividad eléctrica, la salinidad, la dureza total, la alcalinidad total, la temperatura, el pH y la presencia de sodio, sulfatos y nitratos (Claudio Gómez, 2018).

Dicho esto, la información detallada acerca de cada una de las características mencionadas se encuentra en el apéndice A.

## **2.2. Breve descripción de las tecnologías de desalinización**

**La desalinización** es un proceso tecnológico que hace posible la eliminación de sales minerales del agua para convertirla en agua sin exceso de sales, o como se conoce comúnmente, como agua dulce (agua con pH entre 6,5 y 8,5 y un contenido de SDT menor a 1000 mg/L). Estos sistemas de desalinización varían en gran medida respecto a otras en su forma de implementación y sus características de utilización, ya que existe una gran diferencia entre estos métodos en aspectos tales como costo de operación, calidad del proceso y la capacidad de desalinización, energía consumida por el sistema desalinizador, entre muchas otras (Aedyr, 2019). Actualmente,

existen diferentes métodos de desalinización con variadas características de funcionamiento, capacidades de remoción de minerales y tipos de procesos que emplean principalmente para lograr tal desalinización del agua. En la tabla 1 se observan las clasificaciones de los distintos métodos más conocidos a nivel global, de acuerdo con variables tales como tipo de separación, energía que emplean y proceso unitario que realizan:

**Tabla 1.**

*Métodos de Desalinización Existentes en el Mercado*

Separación	Energía	Proceso	Método
Agua de sales	Térmica	Evaporación	Destilación súbita (flash)
			Destilación Multi-efecto
			Termocompresión de vapor
		Destilación solar	
		Cristalización	Congelación
			Formación de hidratos
Sales de agua	Mecánica	Filtración y evaporación	Destilación con membranas
		Evaporación	Compresión mecánica vapor
		Filtración	Ósmosis inversa
	Eléctrica	Filtración selectiva	Electrodialisis
	Química	Intercambio	Intercambio iónico

*Nota.* Adaptado de (Valero et al., 2001)

Los **métodos de desalinización** más comunes y que son utilizados alrededor del mundo en las plantas de desalinización son los siguientes:

**Ósmosis inversa (OI)**, el cual goza de ser el método más eficiente de desalinización gracias a su elevada remoción de minerales del agua a un bajo costo económico y energético. Este proceso consiste en tecnologías de membranas las cuales se encargan de eliminar la salinidad del agua por medio de fenómenos de difusión que permiten el paso de gases y moléculas sin carga

electrostática de bajo peso molecular, desde una región de alta concentración de sales y minerales hacia una más baja (J. HUESA WATER TECHNOLOGY, 2014). Estas membranas son capaces de remover un 99,5% de los iones presentes en el agua; y pueden operar con una salinidad máxima de alrededor de 45.000 ppm. La tasa de recuperación de este método se encuentra entre el 30 y el 80%, variando por condiciones tales como calidad del agua y presión de trabajo (Fajardo, 2018).

**Métodos de desalinización térmica**, los cuales se basan en la evaporación y condensación del agua con uso de la energía energética y principio bajo el cual operan sus dos principales representantes: **Destilación Multi-efecto (MED)**, proceso de vapor a baja presión el cual consta de una serie de tubos por los cuales fluye vapor de agua y sobre los cuales se rocía agua marina en su superficie exterior; de esta manera la película de agua marina formada sobre los tubos absorbe la energía del vapor interno, causando que este se condense formando agua pura. El rendimiento alcanzado por este método puede alcanzar los 16 kg de producto por cada kg de vapor de calentamiento, y es considerado como uno de los procesos más económicos de todos los existentes (Fajardo, 2018) y **Destilación Multi-etapa (MSF)**, proceso en el cual el agua marina se precalienta hasta una temperatura cercana a la de saturación y se disminuye la presión con lo que se produce una disminución en el punto de ebullición del agua, para lograr la evaporación y condensación del agua. Este método es uno de los procesos más desarrollados en cuanto a la obtención de agua con una alta pureza, sin embargo, requiere de grandes volúmenes de agua, junto con grandes concentraciones de químicos para el tratamiento de esta. Estos tipos de destilación se acoplan en refinerías y centrales eléctricas, donde el calor residual y la gran energía eléctrica se pueden aprovechar para dichos fines (Technologies, 2018).

**Electrodiálisis (ED)**, es un proceso no convencional el cual se basa en la migración de los iones presentes en el agua a través de membranas de intercambio iónico, las cuales permiten retener

estos iones y separarlos del agua; este intercambio se hace posible gracias a la presencia de dos electrodos los cuales son cargados por una fuerza electromotriz que permite el movimiento de los iones. Las membranas deben estar dispuestas de tal forma que se alternen de acuerdo con su carga, ya sea tratándose de una membrana de intercambio aniónica o catiónica, para que pueda hacerse efectiva la desalinización. Este método está restringido para aguas salobres que no superen el contenido de sales disueltas de 5.000 ppm, ya que el costo de utilización se incrementaría radicalmente con el uso de aguas marinas. Las tasas de recuperación habituales se encuentran entre un 75% y un 90%, y cuenta con la ventaja de ser un método bastante económico a comparación de los demás métodos (Germán E. Dévora-Isiordia et al., 2012).

En la tabla A.4. (apéndice A) se muestran los datos más relevantes de los métodos anteriormente mencionados.

De acuerdo con la información anteriormente proporcionada, se puede tener una idea acerca de los procesos de desalinización más comunes utilizados actualmente; sin embargo, en el apéndice A se encuentran de forma más detallada las características de cada uno de estos procesos acompañado de esquemas que ejemplifican gráficamente cada tecnología.

## Desionización electroquímica

### 3.1. Introducción

**La desionización electroquímica (EDI)**, es un proceso electroquímico que consiste en dos electrodos cargados eléctricamente compuestos de diferentes materiales que retienen los iones de sodio y cloro de la respectiva agua salada. Estas tecnologías utilizan cargas eléctricas para la eliminación de iones, es decir, un novedoso sistema aún en desarrollo, basados en dispositivos de almacenamiento electroquímico de energía que permiten la purificación de aguas salinas mientras almacenan energía de forma simultánea (Andrade, 2019). Este método se basa en la compensación de la carga electrostática de dos electrodos sumergidos en un electrolito por especies iónicas, por medio de las cuales se movilizan hacia la interface electrodo-electrolito y, en consecuencia, se eliminan de una corriente de agua de alimentación. Estos procesos de desionización electroquímica están condicionados por las características del contaminante que se alimenta (p. Ej., carga iónica y concentración inicial de iones), las condiciones del flujo de agua que se alimenta al sistema y las propiedades del electrodo (p. Ej., tamaño de poro, distribución del tamaño de los poros y el tipo de material) (S. Gómez-Biedma, E. Soria, 2002).

Los electrodos utilizan dos principales mecanismos para remover los iones de las sales disueltas: procesos faradaicos y no faradaicos, donde en el primero se llevan a cabo reacciones de oxidación y reducción, mientras que en el segundo se presenta el fenómeno de la doble capa eléctrica. El material con el cual está hecho el electrodo define el tipo de proceso que se lleva a cabo en su superficie, siendo así que los más conocidos para procesos no faradaicos son los carbones nanoporosos, debido a la alta área superficial que se encuentra dentro de estos mismos (Srimuk et al., 2020). Los dispositivos de desionización electroquímica inicialmente empleaban materiales a base de carbono como electrodos, sin embargo, tienen la desventaja de tener baja capacidad de remoción de iones y de ser ampliamente propensos a la corrosión que afecta la parte

cargada del carbón utilizado, lo que afecta directamente su tiempo de vida útil, por lo que se ha avanzado en la utilización de materiales faradaicos (Suss & Presser, 2018).

### **3.2. Antecedentes históricos edi**

Históricamente, la desionización capacitiva, también conocida en la literatura comercial como “CapDI”, ha sido denominada desmineralización electroquímica, proceso de electrosorción para la desalinización de agua. La fase inicial de su desarrollo se remonta al siglo XX a finales de 1960 y principios de los 70, cuando se llevó a cabo un trabajo usando electrodos basados en carbones porosos para lograr la electrosorción de iones de sal, introduciendo así el concepto de desmineralización electroquímica del agua. Un gran avance para la desionización capacitiva fue realizado a principios de la década de 1970 por Johnson et al., ya que publicaron importantes estudios, la formación de la doble-capa electroquímica y con respecto a los mecanismos bajo los cuales se realiza la retirada de iones en materiales porosos.

En los últimos años, se ha producido un aumento exponencial considerable en el número de estudios y publicaciones relacionadas con el desarrollo de esta tecnología debido a las grandes ventajas que presenta frente a las demás. No solo se han realizado avances en los materiales sino también en cuestiones como el diseño de los dispositivos de EDI, los parámetros energéticos y el modo de operación de dichos sistemas, viéndose una aplicación futura optimista (Ahmed & Tewari, 2018). La historia completa y detallada se puede observar en el apéndice B.

### **3.3. Fundamentos del EDI**

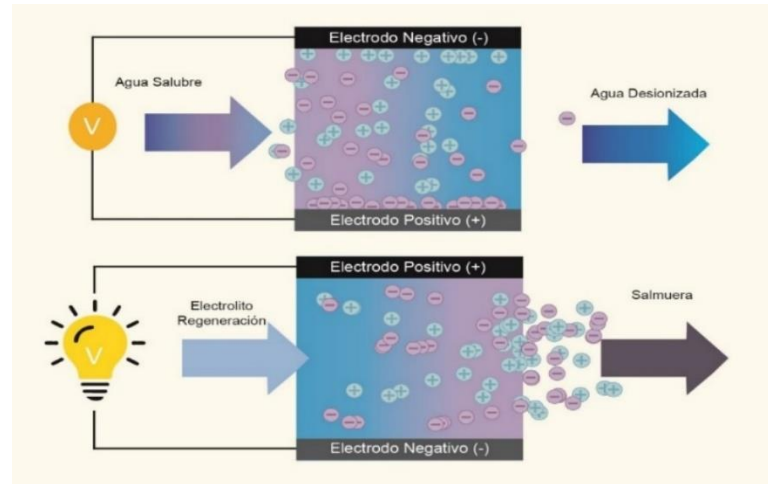
Los sistemas electroquímicos se basan fundamentalmente en la interacción entre un conductor electrónico (electrodo) y uno iónico (electrolito) mediante el envío de cargas en la

interfaz de estos. Para el electrodo, el medio de transporte de dicha carga se hará por medio de movimiento de electrones, mientras que para el electrolito se dará por el movimiento de los iones. Dicho esto, puede haber dos tipos principales de reacciones presentes en los electrodos; la primera ocurre cuando las cargas transferidas por medio de la interfaz electrodo-electrolito conducen a reacciones de oxidación y reducción, razón por la cual son gobernadas por la ley de Faraday, la cual habla de la relación proporcional entre la cantidad de reacción química causada por un flujo de corriente y la cantidad de carga aplicada en el proceso; estos son llamados faradaicos. De manera similar, en una celda EDI pueden ocurrir diferentes procesos, tales como la adsorción y desorción, con lo que se puede dar una variación en la estructura de la interfaz electrodo-electrolito al presentarse una variación del potencial o de la composición en la solución; estos son denominados procesos no faradaicos. Estos procesos influyen de manera directa en la eficiencia de una celda EDI, dando como resultado variaciones en la eficiencia de la adsorción. Es por esto, que resulta de suma importancia ahondar en el diseño y estructura de una celda de desionización electroquímica.

Las celdas de desionización electroquímica están constituidas por dos electrodos que permiten el intercambio iónico, apoyados en sus bases y dispuestos de forma paralela uno contra otro a una distancia pequeña. En este espacio se dispone un material aislado eléctricamente (comúnmente tela tejida/no tejida o mallas poliméricas) el cual cumple la función de posibilitar el paso únicamente de una especie iónica: las membranas de intercambio de aniones permiten únicamente el flujo de aniones, mientras que las de intercambio de cationes únicamente el de cationes. La corriente requerida por los electrodos es proveída por un colector de corriente de grafeno alimentado por una fuente externa, ya que de esta forma se impiden reacciones de corrosión que afecten la celda.

**Figura 1.**

*Esquema de funcionamiento de EDI: carga (Superior) y descarga (Inferior)*



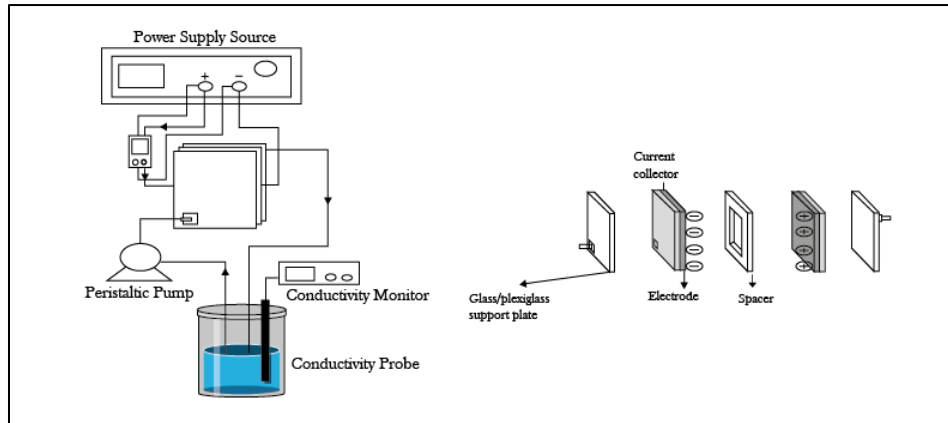
*Nota.* Diseño esquemático del funcionamiento de una celda EDI mediante adsorción de iones presentes en el electrolito. Adaptado de (Porada et al., 2013).

Estas celdas de desionización pueden ser configuradas en forma Batch (de un solo paso), en la cual se requieren de varias celdas para que el agua alimentada pase a través de los electrodos y sea llevada a la siguiente celda para repetir el proceso, o de forma cíclica, en la que, por medio del uso de una bomba peristáltica, es alimentada continuamente la misma solución una y otra vez en una misma celda. El proceso culmina cuando los electrodos no pueden adsorber más iones gracias a la condición de equilibrio, ya que todos los sitios de adsorción del material están ocupados por los iones, dando como resultado una constante en la conductividad de la solución. Estos electrodos pueden ser llevados a un proceso de regeneración y ser desionizados para ser utilizados nuevamente; dicho proceso se puede dar por medio de un cortocircuito entre electrodos, o por un cambio de polaridad en estos. El agua remanente de este proceso queda cargada con los iones de la separación anterior, por lo que es bombeada fuera de la celda, y aunque existe el riesgo

de que los iones sean reabsorbidos por los electrodos, normalmente se utiliza una presión de bombeo alta para evitar tal problema. En la figura 2 se presenta el funcionamiento de una celda de EDI funcionando en modo Batch o por lotes (Ahmed & Tewari, 2018).

### Figura 2.

*Proceso de experimentos de celdas EDI por lotes*



*Nota.* Esquema gráfico del funcionamiento de una celda EDI con sus respectivas partes. Adaptado de (Ahmed & Tewari, 2018)

### 3.4. Fenómenos relacionados con desionización electroquímica

La aplicación del EDI requiere de diferentes conceptos para su correcto entendimiento y aplicación, es por esto por lo que debe de hacerse claridad en dos temas fundamentales: el estudio del fenómeno que trata acerca de cómo un electrodo al cual se le aplica un voltaje es capaz de adsorber sales y el cómo cuantificar y analizar los datos que se obtengan de forma experimental. De esta forma, en esta sección se presentarán los conceptos teóricos que representan la base del EDI y los métodos utilizados para cuantificar y comprender los resultados obtenidos experimentalmente.

### **3.4.1. Comprensión de EDI utilizando el concepto de ventanas de voltaje operativo**

El rendimiento de una celda EDI depende principalmente de cómo se maneja el voltaje aplicado a los electrodos para que suceda la captura de iones presentes en la solución. Este voltaje está determinado por ventanas de voltaje operativos, las cuales permiten establecer rangos de potencial en los que los electrodos trabajan de forma óptima, ligándose con el valor de potencial de carga cero (PZC) el cual define el potencial óptimo de cada electrodo. Una vista más profunda de este tema se encuentra en el apéndice B.

### **3.4.2. Fundamentos de la carga-transferencia entre electrodos**

Un enfoque diferente para la optimización de una celda EDI se da a partir de la teoría clásica de la doble capa electrostática (EDL), la cual habla acerca de que la carga está relacionada con la carga electrónica del electrodo en disposición, y con la carga iónica (iones en la fase acuosa), compensándose exactamente entre sí. Dicho esto, el enfoque de la teoría EDL no se basa en la elección de las ventanas de voltaje con relación a un electrodo de referencia, sino en la cantidad de carga que debe transferirse de un electrodo a otro, y en las variaciones que se pueden presentar en las concentraciones de iones dentro de estos electrodos (estructura EDL) y la consecuente caída de voltaje local a través de la EDL, entendiéndose como un papel primordial el de las diferencias de voltaje local sobre el de los potenciales absolutos (Porada et al., 2013).

### **Procesos faradaicos y no faradaicos**

La circulación de electrones en los electrodos metálicos y de iones en el electrolito da como resultado un flujo de carga eléctrica conocido como corriente, la cual se genera gracias a dos procesos fundamentales: procesos de tipo faradaico y no faradaico. Los procesos faradaicos se basan en la transferencia directa de electrones entre la interface electrodo-electrolito por medio de reacciones de oxidación-reducción, siendo estos regidos bajo la ley de Faraday, la cual ratifica que la

cantidad de reacciones producidas en un electrodo es directamente proporcional a la intensidad de corriente presente. Por otra parte, en algunos rangos de potencial no ocurren reacciones de transferencia de carga a través de la interface ya que no son estables termodinámicamente, por lo que se presentan otros procesos tales como la adsorción y desorción.

### **3.5. Diseño de celdas y dispositivos EDI**

El diseño de una celda EDI es de gran importancia para definir el rendimiento que se desea obtener del proceso de desionización, ya que la disposición de los electrodos en la celda, y la forma en como estos interactúan con el electrolito pueden afectar la operación, tanto en temas técnicos como económicos. Dicho esto, las celdas se pueden clasificar de la siguiente forma:

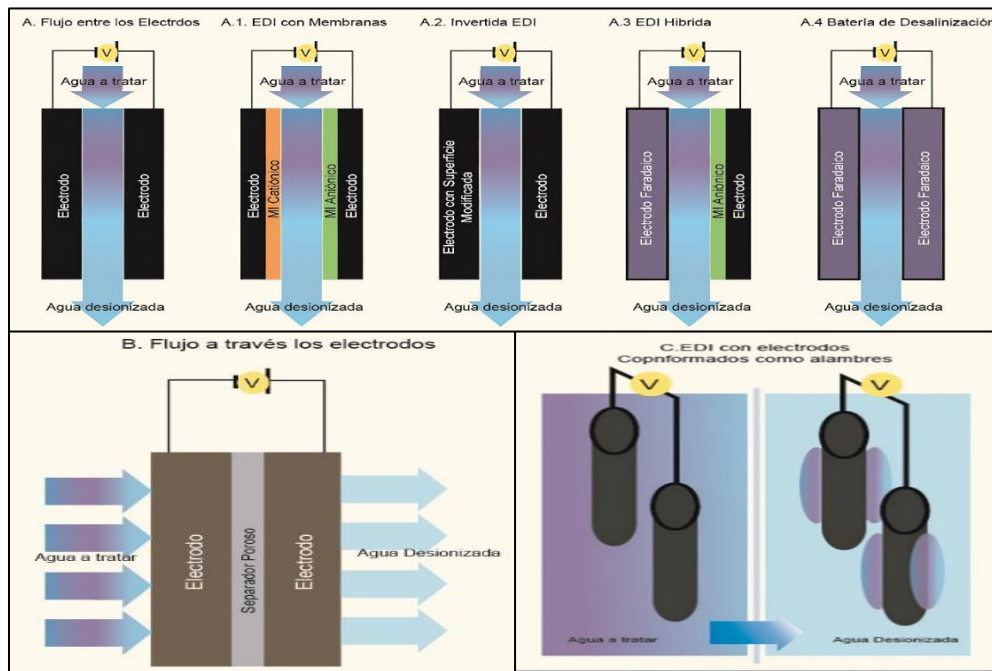
#### **3.5.1. Celdas con electrodos estáticos**

Estas celdas mantienen los electrodos estáticos permitiendo que el electrolito pase a través de estos en diferentes disposiciones. En la más simple disposición (A) se colocan dos electrodos paralelamente, y se permite el flujo del electrolito a través de estos, de tal forma que entren en contacto con una sola cara de estos. Las ventajas que ofrece este método sugieren que el diseño es el más simple y el más económico, debido a que su mantenimiento es sencillo. En otra disposición (B), se colocan los electrodos cerca de tal forma que se separen por un material poroso el cual permita el flujo del electrolito entre los dos electrodos, dando como resultado una celda más compacta en comparación con la celda A, lo cual reduce la resistencia de transferencia iónica; sin embargo, esta requiere de una mayor presión de flujo para hacer circular el agua a tratar. La última configuración, denominada desalinización por barras móviles (C), consiste en grupos de cables o finas barras que son dispuestas como pequeñas celdas a las cuales se les aplica un potencial con lo que se logra la retención de los iones, para posteriormente elevar los electrodos y sumergirlos en

aguas de concentrado para liberar los iones (Santos Santos, 2017). Las configuraciones de celda mencionadas son mostradas en la figura 3.

**Figura 3.**

*Esquemas de diferentes disposiciones de celdas EDI con electrodos estáticos*



*Nota.* A. Flujo entre electrodos, A.1. EDI con membranas, A.2. EDI invertido, A.3. EDI híbrido, A.4. Batería de desalinización, B. Flujo a través de los electrodos, C. EDI con electrodos conformados como alambres. Adaptado de (Santos Santos, 2017)

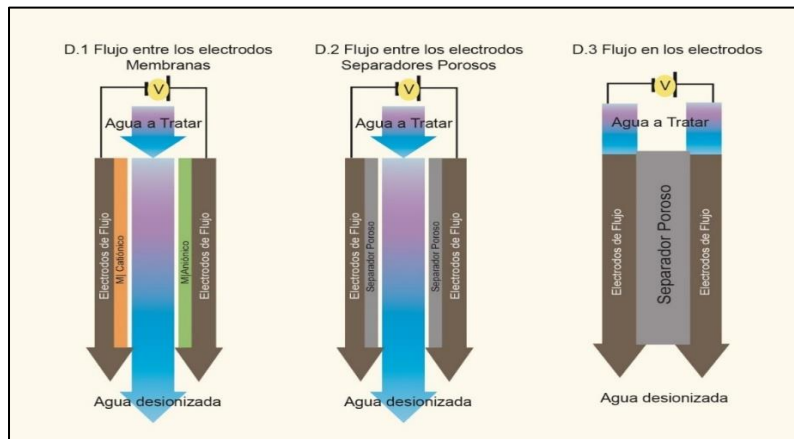
### 3.5.2. Celdas con electrodos de flujo

Estas celdas se basan en suspensiones de partículas de carbón activado que funcionan como ánodo y cátodo, las cuales son bombeadas a través del electrolito, formando así una suspensión de material. Cabe destacar, que esta configuración de celdas aún se encuentra en una etapa de desarrollo, por lo que se siguen buscando mejoras en su rendimiento. Las configuraciones de celda mencionadas son mostradas en la figura 4.

Para que la eficiencia del proceso aumente, es necesario colocar más de una celda en operación de forma conjunta, y la forma de conexión eléctrica entre estas celdas puede realizarse ya sea en serie o en paralelo. Para la conexión en serie se tiene que la densidad de corriente circulante es la misma en cada condensador, lo cual permite que el voltaje de trabajo sea más elevado y una densidad de corriente menor. Para la conexión en paralelo, los condensadores poseen la misma diferencia de potencial y se puede acumular una gran cantidad de carga suministrado pequeñas diferencias de voltaje. De esta forma, resulta más eficiente la implementación de la conexión en paralelo para los procesos EDI que la conexión en serie, ya que ofrece una capacitancia equivalente mayor (García-Quismondo et al., 2013).

#### Figura 4.

*Esquemas de las diferentes disposiciones de las celdas EDI con electrodos de flujo*



*Nota.* D.1. Flujo entre electrodos con membranas, D.2. Flujo entre electrodos separadores porosos, D.3. Flujo a través de los electrodos. Adaptado de (Santos Santos, 2017).

### 3.6. Modos de operación

Después de haber establecido la distribución de las celdas y la forma de conexión eléctrica del proceso, es necesario determinar el modo de operación que se utilizará para llevar a cabo la polarización de los electrodos, el cual se basa en fijar **el voltaje o la corriente** como **valores constantes**. Normalmente, las condiciones de operación son establecidas con voltajes constantes, en los cuales la concentración salina del electrolito expulsado disminuye rápidamente pero solo en un principio, mientras que en el resto de la etapa esta concentración aumenta nuevamente, por lo tanto, la máxima adsorción del proceso solo se logra en un breve periodo de tiempo. Dicho esto, a corriente constante se puede obtener una variación de potencial igual en toda la operación, aumentando el voltaje de forma lineal, similar a la carga de los supercondensadores; esto permite ajustar el nivel de la desalinización variando la densidad de corriente aplicada. Algunas ventajas de fijar la corriente como constante, es que se puede obtener un mayor control de las condiciones eléctricas del proceso y obtener un mayor rendimiento, ya que la cantidad de agua desionizada con respecto a agua a tratar introducida es mayor con este arreglo.

### 3.7. Prestaciones energéticas y de eficiencia

El método de desalinización EDI presenta grandes ventajas energéticas a comparación de otros métodos, ya que este se basa en el movimiento de los iones en relación con el medio acuoso presente, contrario a lo que sucede con las principales tecnologías de desalinización. Esto evita condiciones eléctricas con altos voltajes de operación y altas densidades de corrientes, sumado a que no requiere de altas presiones de operación para el movimiento de los fluidos.

Sobre la eficiencia energética a lo largo de los últimos años (2005-2020) se han realizado diferentes evaluaciones enfocadas en el consumo energético del proceso, que, a pesar de que han

vido pocas, han demostrado la gran eficiencia de la tecnología. Resultados presentados a mediados de 2005 por Farmer et al. dan como resultado un consumo de  $0,1 \text{ kWh/m}^3$  y una eficiencia de 90% al utilizar electrodos de aerogel de carbón y una solución de 1000 ppm de  $\text{NH}_4\text{CO}_4$ , y los presentados por Welgemoed et al. dan como resultado un consumo de  $0,6 \text{ kWh/m}^3$  y una eficiencia del 50% al utilizar agua salobre de 2000 ppm. Para años más recientes (2013-2016), se destacan los trabajos realizados por Demirer et al. y Zhao et al., ya que han logrado optimizar el proceso a tal punto de alcanzar niveles de consumo similares a los de la ósmosis inversa. Cabe destacar que la energía utilizada para el proceso se distribuye entre la electroadsorción de iones, la superación de resistencia del desionizador, la desorción de co-iones, fenómenos de intercambio de iones y reacciones faradaicas presentes.

### **3.8. Materiales EDLC utilizados en EDI**

Los supercondensadores, también conocidos como condensadores electroquímicos de doble capa o pseudocapacitores (EDLC) son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica capaces de almacenar una densidad de energía mucho mayor a comparación de los condensadores normales. Estos, poseen la capacidad de tener un alto grado de reversibilidad en los procesos de carga y descarga, sin afectar las prestaciones de capacidad de almacenamiento (Espacenet, 2020). Estos suponen grandes ventajas al momento de su instalación, ya que permiten modificar la concentración y el tipo de iones del electrolito con el objetivo de maximizar la conductividad iónica disminuyendo la resistencia a la transferencia, a comparación de los electrodos comúnmente utilizados, en los cuales la composición debe ir impuesta por el contenido salino de la disolución a tratar, lo que determinará la conductividad iónica del medio. Aparte de esto, permiten obtener

tiempos de carga y descarga menores en comparación con los materiales normalmente usados (Santos Santos, 2017).

Los electrodos empleados se componen de dos partes principales: el material activo y el colector de corriente. El primero, al estar en contacto directo con el electrolito, permite la migración de los iones hacia la superficie electroquímica. Estos materiales son los mayormente utilizados en la desalación del agua debido a las excelentes propiedades con las que cuentan como elevada área superficial específica, buena conductividad eléctrica y estabilidad química y física, además de ser materiales fáciles de procesar y de bajo costo.

### **3.8.1. Carbones activados**

Entre los carbones porosos se destacan los carbones activados (CAs), uno de los materiales de electrodo más usados comercialmente y más rentables en diversas aplicaciones, ya que cumplen muchas de las características idóneas requeridas para esta aplicación: poseen elevadas superficie específicas (SSA) (800-2000 m<sup>2</sup> /g) y amplias distribuciones de tamaños de poro (anchura < 100 nm), poseen por lo general una estructura porosa interconectada, tienen una buena conductividad eléctrica, son económicos (0,5-2 €/kg), abundantes, pueden proceder de fuentes renovables y su composición química es fácilmente modificable para obtener materiales más hidrófilos y estables químicamente. Hoy en día, es el material más común encontrado en los sistemas de tratamiento de agua y su uso ya está documentado en los primeros estudios sobre EDI en la década de 1960 y 1970.

Los CAs constituyen un conjunto de materiales de carbono porosos obtenidos mediante la carbonización y activación de precursores orgánicos lignocelulósicos como cáscaras de coco, madera, carbón, almidón o fuentes sintéticas como resinas, además pueden emplearse otros

materiales como polímeros, residuos de petróleo o breas de mesofase cuando se requiere la obtención de un carbón activado con unas propiedades específicas.

El aspecto más relevante al realizar un estudio de CA es su textura porosa, la cual viene determinada tanto por el precursor empleado como por el tipo de activación. La estructura porosa del carbón activado suele tener una amplia distribución de tamaño de poros, aunque para facilitar el estudio de estos se clasifican en tres grupos siguiendo las recomendaciones de la IUPAC: macroporos, ancho de poro superior a 50 [nm], mesoporos, ancho de poro comprendido entre 2 y 50 [nm] y microporos, ancho de poro menor a 2 [nm]; siendo los microporos los principales responsables del proceso de electroadsorción, ya que constituyen la mayor parte de la superficie interna del carbón activado.

### **3.8.2. Carbonos mesoporosos ordenados**

Los carbonos mesoporosos ordenados (CMOs) son materiales que poseen estructuras dispuestas de forma hexagonal o cúbica que permiten un alto transporte de iones a través de las redes porosas. Estos carbonos poseen la característica de tener superficies específicas (SSA) de valores muy altos, los cuales corresponden a rangos entre los 750 y 1500 m<sup>2</sup>/g de material (Porada et al., 2013).

Diferentes estudios realizados en torno a comparativas entre CMOs y CAs demuestran una enorme ventaja de los CMOs en cuanto al rendimiento del proceso, pudiendo denotar que la presencia de mesoporos en las estructuras aumenta la remoción de iones presentes en las soluciones, aún con CAs que poseen una SSA mayor que CMOs. Los tamaños de poro medio más recomendados para este tipo de materiales rondan los 3 nm (L. Li et al., 2009).

### 3.8.3. Aerogeles de carbono

Los aerogeles de carbono son materiales con estructuras porosas integradas por partículas nanométricas de tamaño variable agrupadas en ramificaciones, las cuales poseen bajas densidades, altas porosidades en su estructura y cuentan con propiedades interesantes tales como bajas conductividades térmicas o la elevada conductividad eléctrica.

Con respecto a las propiedades texturales, los aerogeles de carbono presentan una superficie específica entre 500 y 750 m<sup>2</sup>/g para aerogeles pirolizados y hasta más de 3000 m<sup>2</sup>/g para aerogeles activados. En cuanto al tamaño de poro, podemos encontrar distribuciones que pueden ir de los 3 a los 15 nm. En el rango de los macroporos, se pueden encontrar tamaños de los 60 a más de 100 nm dependiendo del procedimiento de secado del gel, rango en el cual los tamaños de poro son óptimos para el almacenamiento de iones ya que las capas dobles eléctricas no se superponen.

Con lo anterior, podemos observar que, el interés por este material radica en la posibilidad de controlar su textura y propiedades haciendo uso y manejo de los parámetros de síntesis como: la naturaleza y concentración de los precursores, las condiciones de polimerización y curado de los hidrogeles, las condiciones de secado y las condiciones de activación de los aerogeles resultantes, teniendo en cuenta la influencia que tienen estos parámetros en la eficacia electroadsorptiva del material.

### 3.8.4. Carbones derivados de carburos

Los carbones derivados de carburos (CDC) son materiales sintetizados de forma que su estructura presente únicamente microporos distribuidos estrechamente los cuales estarán ordenados de forma aleatoria, a diferencia de la estructura ordenada de los CMO. Estos materiales son fabricados grabando polvos de carburo en cloro gaseoso a temperaturas en el rango entre 200

°C a 1200 °C, o también a partir de monolitos, fibras o películas delgadas. Este tipo de fabricaciones produce materiales con valores altos de SSA que pueden alcanzar los 3200 m<sup>2</sup>/g. A pesar de tener valores tan altos de SSA, estos materiales presentan problemas al ser utilizados en EDI ya que, experimentalmente, los microporos no son los más convenientes para estos procesos: sin embargo, estudios recientes han demostrado que tamaños de poro de 1 nm pueden ser beneficiosos para la adsorción de sales (Zou et al., 2008).

### **3.8.5. Nanotubos de carbono y grafeno**

Los nanotubos de carbono (NTC) son láminas de grafeno enrolladas sobre sí mismas las cuales poseen nanoestructuras compuestas exclusivamente por átomos de carbono, caracterizadas principalmente por tener su área de adsorción expuesta al exterior, lo que resulta conveniente para la cinética de electroadsorción. Su aplicación en la desalinización electroquímica data desde el 2005 cuando se sintetizaron por vez primera electrodos basados en nanotubos de carbono multipared MWCNT.

A lo largo de los años se han llevado a cabo diversos trabajos empleando electrodos conformados por CNT, en todos ellos, los valores de capacitancia o CEA son en general más elevados que los de otros materiales de carbono con excepción del grafeno. Entre todos los estudios revisados, llama especialmente la atención el comportamiento electroadsorptivo de un electrodo compuesto de CNT y quitosano (CHS) montado sobre colector de Ti, por ser con diferencia el que mayor CEAN (valor de 0,15 mg/(g ppm V)), casi el doble de lo obtenido con el mejor material a base de grafeno. También es de los materiales basados en CNT el que mejor cinética de adsorción presenta, con un valor de  $8 \cdot 10^{-3}$  mg/(g ppm V s)). Teniendo en cuenta que estos materiales presentan una superficie específica menor que otros oscilando entre los 192 y 651 m<sup>2</sup>/g, resulta de crucial importancia su conductividad eléctrica, pues al tener una elevada conductividad, la

densidad superficial de cargas es más elevada que en otros materiales, lo que permite albergar mayor concentración de iones en la doble capa eléctrica por unidad de superficie.

### **3.8.6. Negro de carbón**

El negro de carbón (NC) es un material producido mediante combustiones incompletas en los productos derivados del petróleo, el cual se compone de numerosas nanopartículas de carbono densas. Este material posee una relación de superficie/volumen alto y un SSA bajo ( $<120 \text{ m}^2/\text{g}$ ) y posee una conductividad eléctrica alta, por lo que es utilizado como recubrimiento en los electrodos compuestos de carbonos porosos. El agregar un recubrimiento de NC en electrodos hechos a partir de CA aumenta de manera significativa la eficiencia de las celdas EDI; sin embargo, el utilizar NC como materia prima disminuye radicalmente la adsorción de iones presentes en los electrolitos, ya que la baja SSA no permite una apropiada retención de iones en su estructura.

En la tabla B.1. (apéndice B) se muestra un resumen de los rendimientos obtenidos en diferentes experimentos teniendo como determinante la masa adsorbida de sal con respecto a la masa del electrodo.

## **3.9. Materiales faradaicos utilizados en EDI**

Es bien sabido que los materiales para electrodos con funcionamiento no faradaico han sido ampliamente estudiados y aplicados en la historia del EDI, tal como el caso de los carbonos, debido a sus propiedades de remoción de iones; sin embargo, en los últimos años se ha optado por una nueva clase de materiales de almacenamiento de iones, denominados electrodos faradaicos. Estos materiales tienen características que aumentan el rendimiento de remoción en las celdas EDI hasta tres veces en comparación con los clásicos electrodos de carbonos. Estos materiales se dividen en tres categorías: materiales de captura de  $\text{Na}^+$ , materiales de captura de  $\text{Cl}^-$  y materiales de con arquitecturas especiales para la captura de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  (Q. Li et al., 2020).

### 3.9.1. Materiales de electrodos faradaicos de captura de $\text{Na}^+$

Estos materiales están especializados en la captura de iones  $\text{Na}^+$  gracias a sus propiedades fisicoquímicas; dentro de estos materiales se pueden encontrar los compuestos de óxido de magnesio, titanio, vanadio, compuestos de tipo polianiónico y hexacianometalatos metálicos, siendo estos últimos dos los que exhiben una mayor capacidad de remoción en celdas EDI.

#### 1. Compuestos de tipo polianiónico

Los compuestos de tipo polianiónico son materiales ventajosos debido a su diversa morfología y estructura, excelente estabilidad térmica y oxidativa, además de la capacidad que tienen para ajustar el voltaje redox específico. Los compuestos más populares de tipo polianiónico utilizados como electrodos para aplicaciones de EDI son el conductor superiónico de sodio fosfatos de tipo NASICON ( $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$  y  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ ), pirofosfato férrico de sodio ( $\text{Na}_2\text{FeP}_2\text{O}_7$ ) y fosfato férrico ( $\text{FePO}_4$ ) (Chen et al., 2020).

- **Fosfatos tipo NASICON.**

Estos materiales son de gran relevancia gracias a la conductividad iónica y estabilidad estructural que poseen. Su fórmula química se expresa como  $\text{Na}_x\text{M}_2(\text{XO}_4)_3$  (M es Ti, Fe, V o Nb, etc.; X es P, S, Mo, W o As, etc.; x es 0–4) con una estructura de octaedros  $\text{MO}_6$  y tetraedros  $\text{XO}_4$  que permite crear caminos de difusión para los iones  $\text{Na}^+$ . En la actualidad, el fosfato tipo Nasicon más estudiado para su aplicación en electros EDI es el  $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$ .

El fosfato  $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$  (NTP) cuenta con una estructura 3D en la que los grupos de octaedros de  $\text{TiO}_6$  están conectados con los tetraedros de  $\text{PO}_4$  mediante átomos de oxígeno compartidos en las esquinas, formando grandes intersticios espaciosos. Gracias a diferentes pruebas realizadas para determinar el rendimiento de los electrodos basados en este material se

pudo observar grandes mesetas de voltaje carga/descarga debido a su baja conductividad electrónica, lo cual afecta negativamente el proceso. A partir de esto, se buscó combinar el precursor de NTP con óxido de grafeno (rGO), solucionando el problema y mejorando el rendimiento del proceso, logrando una alta capacidad de remoción de sal de 140 mg/g, y manteniendo en 86% la capacidad después de 100 ciclos en 1000 mg/L de solución de alimentación de NaCl, mientras que el puro NTP solo mostró una capacidad inicial de 112 mg/g con una retención del 63% (Galleguillos et al., 2020).

## 2. Hexacianometalatos metálicos

Los hexacianometalatos metálicos (MHCF), también denominados análogos del azul de Prusia, tienen la fórmula  $A_xR[R'(CN)_6]$  ( $A=Na, K$ ;  $R$  y  $R' = Fe, Co, Ni, Mn$ ;  $x= 0-2$ ) y poseen una estructura cúbica centrada en las caras. Los grandes canales a lo largo de las direcciones [001] permiten la inserción/extracción rápida de varios cationes, como  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , etc., que son los principales iones de metales alcalinos en el agua de mar. De este modo se puede destacar que los hexacianometalatos metálicos no son tóxicos, son económicos e insolubles en agua. Por lo tanto, los hexacianometalatos metálicos se consideran candidatos prometedores para electrodos EDI. Para estudiar a fondo el mecanismo de captura de iones, Vafakhah et al. llevo a cabo la medición de XRD situ para una  $FeFe(CN)_6$ /reducida aerogel de óxido de grafeno ( $FeFe(CN)_6$ /RGA) de electrodo, que proporciona una visión de los cambios de celosía en tiempo real durante el proceso de carga-descarga. La celda desarrollada exhibió una notable capacidad de eliminación de sal de 130 mg/g a 100 mA/g (Buser et al., 1977). En resumen, los hexacianometalatos metálicos son materiales atractivos para los electrodos EDI debido a que su estructura permite una rápida inserción/extracción de  $Na^+$ , además de su alta capacidad de eliminación de sal y su bajo consumo de energía. Actualmente, su rendimiento se podría mejorar

aún más a través de estrategias, como la disminución del agua cristalizada en las estructuras de los hexacianometalatos metálicos, sin embargo, sigue siendo un desafío y necesita más atención e investigaciones.

### **3.9.2. Materiales de electrodos faradaicos de captura de Cl<sup>-</sup>**

Estos materiales surgen como una opción prometedora a la clásica remoción de Cl<sup>-</sup> por vía química, dando como resultado sistemas más económicos que no perjudican en gran medida al medio ambiente y requieren un menor gasto energético. A pesar de esto, solo unos escasos materiales han sido identificados con las suficientes características para ser candidatos óptimos, entre los cuales se encuentran el Bi y la Ag, reportados como materiales de almacenamiento que operan con reacciones de conversión.

#### **1. Ag/AgCl**

El material Ag/AgCl es uno de los materiales más estudiados en cuanto a remoción de iones Cl<sup>-</sup> ya que cuenta con características únicas para el proceso. Este material exhibe una amplia estabilidad potencial y resistencia a la corrosión, y posee una alta capacidad teórica de 248 mA h/g para la captura de iones Cl<sup>-</sup>. Debido a su naturaleza de remoción de iones, este material es utilizado como electrodo para celdas de desionización de aniones logrando bajos consumos de celda de hasta 0,2 V. Debido a que el AgCl es un material aislante, es necesario que el Ag/AgCl sea diseñado en forma de nanopartículas o en combinación con materiales de alta conductividad para no afectar la conductividad del proceso y facilitar la reacción presente entre el electrodo y el electrolito. De esta forma, los diferentes avances en celdas de desionización de Ag/AgCl muestran resultados prometedores, tales como capacidades de desalinización de 85 mg/g en concentraciones iniciales de 0,5 M de NaCl cuando se combina con electrodos de CEM y de 105 mg/g en

concentraciones iniciales de 2500 ppm de NaCl cuando se combina con electrodos combinados de  $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$  y rGO para la captura de  $\text{Na}^+$ .

A pesar de las altas eficiencias que se obtienen con este material, se presentan diferentes complicaciones en su aplicación ya que el costo de la plata es excesivo y esta tiende a disolverse con gran facilidad en el agua de mar, esto sumado a la creación de complejos de cloruro de Ag que reaccionan con las altas concentraciones de  $\text{Cl}^-$  presentes en el agua, dando como resultado rastros de plata en el agua ya tratada, exponiendo la salud de aquellos que la consumen; es por esto que es de vital importancia la técnica de fabricación de los electrodos conforme al material de composición (Q. Li et al., 2020).

### 3.9.3. Materiales de electrodos faradaicos de captura de $\text{Na}^+$ y $\text{Cl}^-$

Esta clase de materiales de estructura 2D ha surgido recientemente como materiales prometedores para su aplicación en electrodos en celdas EDI gracias a sus capacidades de inserción entre capas, lo cual aumenta el rendimiento y la eficiencia del proceso. Entre estos materiales se encuentran los Dichalcogenuros de metales de transición, los polímeros activos redox y los MXenes, los cuales son de gran relevancia gracias a sus altas capacidades de remoción de iones.

#### 1. MXenes

Tal como lo describen Naguib y Mochalin (2014) en su artículo “MXenes: A New Family of Two-Dimensional Materials”, “los MXenes son materiales que cuentan con una estructura 2D y que tienen la fórmula  $\text{M}_{n+1}\text{X}_n\text{T}_x$  ( $n = 1, 2$  o  $3$ ; M significa metal de transición como Mo, Ti o V, etc.; X denota C y/o N, y T representa el grupo terminal de la superficie como  $-\text{OH}$  o  $-\text{F}$ )”. Cuentan con una alta hidrofilia gracias a los grupos funcionales que poseen en la superficie de su estructura

y son capaces de realizar procesos reversibles de inserción y extracción de iones junto con una pseudocapacitancia óptima para los procesos de almacenamiento de energía (Naguib et al., 2014).

Esta clase de materiales surgen como materiales de electrodos en las celdas EDI para captura de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  gracias a sus características de inserción de iones entre las diferentes capas del material junto con una gran reversibilidad en el proceso de inserción/extracción de los iones. Adicional a esto, estudios recientes han demostrado que el apilamiento entre capas de MXenes produce estructuras 3D con abundantes grupos superficiales, lo cual crea una estructura porosa que facilita aún más la inserción y extracción de iones aumentando la capacidad de remoción de sales drásticamente, como lo mostrado por Bao et al. (Bao et al., 2018) apilando capas delgadas de  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXenes con áreas superficiales de  $293\text{m}^2/\text{g}$  y obteniendo una capacidad de desalinización de  $45\text{mg}/\text{g}$  (Q. Li et al., 2020).

Otros experimentos han sido desarrollados para construir celdas híbridas las cuales utilizan electrodos de nanotubos de carbono junto a electrodos Faradaicos, tal como el desarrollado por Srimuk et al. (Srimuk et al., 2020) el cual diseñó una celda EDI con dos electrodos  $\text{Mo}_{1.33}\text{C}$  - NTC idénticos, obteniendo una capacidad de desalinización de  $15\text{mg}/\text{g}$  con una eficiencia de carga del 95% en una solución de concentración inicial de  $0,6\text{ M}$  de  $\text{NaCl}$ .

### **3.10. Propuesta de sistema de materiales**

En las últimas décadas, la tecnología EDI ha visto un gran avance en el rendimiento de desalinización que puede alcanzar gracias a las variaciones realizadas en su estructura y funcionamiento, tal como lo es la gran variedad de materiales carbonosos que son utilizados para la creación de electrodos de desionización gracias a sus características de elevada área superficial específica, buena conductividad eléctrica, estabilidad química y física y de ser materiales fáciles

de procesar y de bajo coste. Sin embargo, hoy en día los estudios están redirigidos a los materiales para electrodos faradaicos.

Este nuevo direccionamiento en los materiales de los electrodos se basa en el funcionamiento de recolección de iones que tiene el material; mientras que los carbonos nanoporosos almacenan de forma capacitiva los iones de sal presentes en la solución a lo largo de la EDL, en los electrodos de intercalación los iones son almacenados dentro del material en sitios cristalográficos o entre planos atómicos. Esto permite acceder a una mayor capacidad de almacenamiento de sal gracias a que los iones son retenidos en el interior del material, esto operando a voltajes de celda más bajos, análogo a la mayor densidad de energía lograda por los electrodos faradaicos.

De esta forma, el diseño de una celda EDI se basa principalmente en la correcta elección del material del electrodo, debido a que con esto se definen parámetros como tiempo de remoción, concentración inicial de sales en la solución, tipo de sales que se tratarán y el presupuesto con el cual se va a trabajar, entre otros tantos factores que intervienen en el funcionamiento de la celda. Es por esto, que la predicción por parte de la academia sobre nuevos materiales para su utilización como electrodos en celdas EDI es de gran importancia para las tecnologías futuras. Sin embargo, una celda EDI también debe tener definidos parámetros tales como el diseño de los electrodos y su disposición, los modos de operación con los que trabaja y los mínimos estándares de eficiencia que se esperan al momento de realizar la operación.

Tal como lo visto en los capítulos 3.6, existen diferentes tipos de diseño de celda, pasando por electrodos fijos y electrodos de flujo, variando la formación de las estructuras que almacenan los iones de la solución. Debido a que los materiales de tipo faradaico y carbonoso presentan ventajas el uno sobre el otro, resulta adecuado proponer en primer lugar un diseño de celda de tipo

híbrido como lo presentado en la figura 3, en la cual se observa como el electrolito pasa por medio de un electrodo faradaico y uno de material carbonoso, esto con el fin de poner disponer de una gran cantidad de materiales sin importar el tipo de proceso que presenten, ya que a pesar de que los electrodos faradaicos son capaces de alcanzar capacidades de remoción de hasta 140 mg/g de NaCl o mayores, gracias a sus estructuras internas, los tiempos de eliminación y los costos de fabricación son elevados, sobre todo si se requiere a nivel industrial.

Este primer sistema de materiales contiene como material faradaico los compuestos de tipo Polianiónico, específicamente fosfato tipo Nasicon  $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$ , combinado con un electrodo comercial de carbono activado (CA), esto junto con colectores de corriente de grafito, los cuales irán directamente conectados a la unidad de poder. Estas elecciones se fundamentan en estudios similares realizados por Qian Li. (Q. Li et al., 2020) en donde se registran capacidades de remoción de alrededor de 150 mg/g en concentraciones iniciales de hasta 30.000 mg/L con una combinación de electrodos similar a la propuesta. Para aumentar la eficiencia del proceso, se debe disponer de más celdas conjuntas conectadas de forma paralela, ya que con esto se puede acumular una gran cantidad de carga suministrando pequeñas diferencias de voltaje. Cabe resaltar que esta configuración permite superar el problema principal del EDI el cual no permite remover la suficiente cantidad de sales si la concentración inicial en el soluto es mayor a 10.000 mg/L, por lo que este sistema puede llegar a utilizarse en aguas con rangos de concentración entre 500 – 30.000 mg/L de NaCl. Una posible variación con respecto al sistema de materiales mencionado consiste en un electrodo de fosfato tipo Nasicon NTP en combinación con carbono derivado de una estructura metalorgánica paralelo a un electrodo comercial de carbono activado, específicamente NTP/C//CA HEDI, la cual muestra resultados notables con una capacidad de eliminación de sal alta de 167,4 mg/g y una tasa de remoción de 11 mg/g\*min en 1000 mg/L de solución de NaCl.

Como segunda opción, se propone un sistema compuesto de electrodos fijos formados por  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXenes en una celda de tipo faradaica como lo presentado en la figura 3 y colectores de corriente de grafito, la cual esté diseñada en paralelo en conexión con las demás celdas. Esto se plantea gracias a las propiedades observadas en este tipo de material como la habilidad de captación de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  junto con una gran reversibilidad en el proceso de inserción/extracción de los iones. El apilamiento de diferentes capas de este material produce una estructura 3D que mejora el rendimiento del proceso. Un diseño similar realizado por Wang, X. (Q. Li et al., 2020) arrojó como resultado capacidades de remoción de hasta 45 mg/g en concentraciones iniciales de hasta 10.000 mg/L de NaCl, y de 20 mg/g en concentraciones iniciales de 30.000 mg/L de NaCl. Una variación a esta disposición es el diseño de una celda híbrida combinando un electrodo de  $\text{Mo}_{1.33}\text{C}$  MXenes junto con un electrodo de carbono NTC, dando como resultado un conjunto más económico dirigido a remoción de sales presentes en agua salobres; concentraciones de NaCl menores que la alternativa anterior, pero suficientes para el tipo de agua que se desee.

## Conclusiones

La técnica EDI es una tecnología emergente que cuenta con un gran potencial para avanzar como tecnología de desalinización industrial debido a que presenta características y capacidades de remoción de sal que igualan o superan a las más utilizadas actualmente, contando con la característica adicional de capacidad de almacenamiento de energía gracias a su proceso electroquímico interno.

Una celda electroquímica es capaz de presentar diferentes mecanismos de remoción de iones gracias al tipo de material que sea utilizado como electrodo, variando entre materiales supercapacitores, faradaicos o híbridos, los cuales presentan propiedades únicas que varían de acuerdo al requerimiento del proceso.

Los materiales más utilizados hasta la fecha como electrodos de remoción de iones son los supercapacitores, específicamente los materiales carbonosos, ya que estos cuentan con una alta área superficial y bajo costo que permiten su viabilidad; sin embargo, los últimos avances en los materiales faradaicos muestran las grandes ventajas en cuanto a rendimiento y estabilidad del proceso que poseen, gracias a sus estructuras internas que permiten una inserción/desorción de iones más rápida y eficiente.

Gracias a los diversos estudios realizados en las últimas décadas, se ha permitido identificar los materiales que exhiben las mejores propiedades en cuanto a rendimiento, siendo los arreglos de celda más representativos el fosfato tipo Nasicon  $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$  combinado con carbono derivado de un compuesto metal-orgánico y un electrodo comercial de carbono activado (CA), y el  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXenes utilizado como base para la formación de dos electrodos de una misma celda.

**Referencias bibliográficas**

- Aedyr. (2019). *¿Qué es la desalación de agua?* - Aedyr. <https://aedyr.com/que-es-desalacion-agua/>
- Ahmed, M. A., & Tewari, S. (2018). Capacitive deionization: Processes, materials and state of the technology. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 813(April), 178–192. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.02.024>
- Andrade, R. de O. (2019). *Para extraer la sal del agua: Revista Pesquisa Fapesp*. <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/para-extraer-la-sal-del-agua/>
- Bao, W., Tang, X., Guo, X., Choi, S., Wang, C., Gogotsi, Y., & Wang, G. (2018). Porous Cryo-Dried MXene for Efficient Capacitive Deionization. *Joule*, 2(4), 778–787. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.02.018>
- Buser, H. J., Ludi, A., Schwarzenbach, D., & Petter, W. (1977). The Crystal Structure of Prussian Blue:  $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ . *Inorganic Chemistry*, 16(11), 2704–2710. <https://doi.org/10.1021/ic50177a008>
- Cabero García, D. J. (2015). *PROCESO DE DESALACION DE AGUA DE MAR MEDIANTE UN SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA DE MUY ALTA CONVERSION EN TRES ETAPAS CON RECIRCULACION DE PERMEADO Y DOBLE SISTEMA DE RECUPERACION DE ENERGIA*. [https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/18530/TESIS\\_CABERO\\_GARCIA\\_JULEN.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/18530/TESIS_CABERO_GARCIA_JULEN.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Chen, M., Liu, Q., Zhang, Y., Xing, G., Chou, S.-L., & Tang, Y. (2020). *Emerging polyanionic and organic compounds for high energy density, non-aqueous potassium-ion batteries*.

<https://doi.org/10.1039/c9ta11221a>

Claudio Gómez, O. (2018). *Desalinización De Agua Para Aplicaciones De Potabilización Mediante El Desarrollo De Tecnología Solar Sustentable*. 12–50.

Dévora-Isiordia, Germán E., González Enríquez, R., & Ponce Fernández, N. E. (2012). Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México. *Ra Ximhai*, 57–70.  
<https://doi.org/10.35197/rx.08.02.e.2012.05.gd>

Dévora-Isiordia, Germán Eduardo. (2013). *Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México*. 2013.  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222013000300002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000300002)

Espacenet. (2020). Espacenet Superconductor. In *Espacenet*.  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/023677461/publication/US2800616A?q=pn%3DUS2800616>

Fajardo, A. (2018). Desalinización del agua ¿una alternativa sostenible para la potabilización del agua? *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Fundación Aquae. (2018). *Causas de la escasez de agua en el mundo*.  
<https://www.fundacionaquae.org>. <https://www.fundacionaquae.org/escasez-de-agua-en-el-mundo-naciones-unidas-advierte-que-la-demanda-crecera-hasta-un-30-por-ciento-en-2050/>

Galleguillos, F., Cáceres, L., Maxwell, L., & Soliz, Á. (2020). Electrochemical ion pumping device for blue energy recovery: Mixing entropy battery. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(16), 4–10. <https://doi.org/10.3390/app10165537>

García-Quismondo, E., Santos, C., Lado, J., Palma, J., & Anderson, M. A. (2013). Optimizing the

energy efficiency of capacitive deionization reactors working under real-world conditions. *Environmental Science and Technology*, 47(20), 11866–11872. <https://doi.org/10.1021/es4021603>

J. HUESA WATER TECHNOLOGY. (2014). *Ósmosis Inversa* | *J. Huesa Water Technology - Tratamiento de aguas*. <https://jhuesa.com/tecnologias/osmosis-inversa>

Li, L., Zou, L., Song, H., & Morris, G. (2009). Ordered mesoporous carbons synthesized by a modified sol-gel process for electrosorptive removal of sodium chloride. *Carbon*, 47(3), 775–781. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.11.012>

Li, Q., Zheng, Y., Xiao, D., Or, T., Gao, R., Li, Z., Feng, M., Shui, L., Zhou, G., Wang, X., & Chen, Z. (2020). Faradaic Electrodes Open a New Era for Capacitive Deionization. *Advanced Science*, 7(22). <https://doi.org/10.1002/advs.202002213>

Naguib, M., Mochalin, V. N., Barsoum, M. W., & Gogotsi, Y. (2014). 25th anniversary article: MXenes: A new family of two-dimensional materials. *Advanced Materials*, 26(7), 992–1005. <https://doi.org/10.1002/adma.201304138>

Porada, S., Zhao, R., Van Der Wal, A., Presser, V., & Biesheuvel, P. M. (2013). Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization. *Progress in Materials Science*, 58(8), 1388–1442. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.03.005>

S. Gómez-Biedma, E. Soria, M. V. (2002). Análisis electroquímico. *Revista de Diagnóstico Biológico*, 51, 18–27. [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-79732002000100005](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-79732002000100005)

Santos Santos, C. (2017). *Estudio de la Desionización Capacitiva para el Tratamiento de Aguas*

*Salobres : Evaluación de Prestaciones y Eficiencia Energética.*

Sistema de Información Ambiental de Colombia- SIAC. (2011). Demanda agua - IDEAM.

*MINAMBIENTE*, 1, 1. <http://www.siac.gov.co/demandaagua>

Srimuk, P., Su, X., Yoon, J., Aurbach, D., & Presser, V. (2020). Charge-transfer materials for electrochemical water desalination, ion separation and the recovery of elements. *Nature Reviews Materials*, 5(7), 517–538. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0193-1>

Suss, M. E., & Presser, V. (2018). Water Desalination with Energy Storage Electrode Materials. *Joule*, 2(1), 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.12.010>

Technologies, I. (2018). *Desalinización térmica (MED y MVC)*. [https://www.ide-tech.com/es/solutions/desalinizacion/desalinizacion-termica-med-y-mvc-soluciones-de-desalinizacion-termica-para-agua-de-mar/?data=item\\_1](https://www.ide-tech.com/es/solutions/desalinizacion/desalinizacion-termica-med-y-mvc-soluciones-de-desalinizacion-termica-para-agua-de-mar/?data=item_1)

UNESCO. (2015). El Crecimiento Insostenible Y La Creciente Demanda Mundial De Agua. In *Wwdr*. <http://ggmn.e-id.nl/ggmn/GlobalOverview.html>

Valero, A., Uche, J., & Serra, L. (2001). La Desalación como alternativa al PHN. *CIRCE, Universidad de Zaragoza*. <http://circe.cps.unizar.es>

Villanueva, M. (2014). *Historia de la desalinización del agua | Fundación Aquae*. <https://www.fundacionaquae.org/historia-de-la-desalinizacion-del-agua/>

Zou, L., Li, L., Song, H., & Morris, G. (2008). Using mesoporous carbon electrodes for brackish water desalination. *Water Research*, 42(8–9), 2340–2348. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.12.022>

## Apéndices

### Apéndice A. Información correspondiente a la búsqueda de datos

#### ➤ Historia de la desalinización

A través de los años, el hombre se ha visto en la necesidad de aprovechar todos y cada uno de los recursos que se encuentran a su disposición como el agua dulce y el agua salada presentes en el planeta. En vista de esto, el ser humano ha buscado diferentes alternativas para afrontar el reto de separar las sales del agua o la purificación de esta por milenios.

La desalinización es una tecnología con una amplia historia. Las primeras referencias sobre la desalinización del agua datan de hace muchos siglos como en escritos del viejo testamento sobre el año 1500 A.C. incluso desde la prehistoria ya que se podían visualizar los principios de la separación de sales en el comportamiento cíclico del agua, específicamente en la evaporación tanto de los mares como de los océanos por acción de la radiación del sol, formándose nubes que posteriormente causarían precipitaciones llenas de agua limpia sin sales ni impurezas. Más adelante, se logró reemplazar la energía emitida por el sol con fuego, apareciendo de este modo el primer método de desalinización térmica (Delgado García, 2007).

En la antigua Grecia, los experimentos a manos de filósofos presocráticos como Tales de Mileto y Demócrito fueron los primeros estudios para el desarrollo de bases realmente sólidas para el proceso de desalinización pues estas mentes brillantes describieron un proceso de obtención de agua dulce a partir de la filtración del agua de mar a través de la tierra. Posteriormente, Aristóteles analizó la posibilidad de una desalación simple fabricando el primer evaporador conocido (Mercé & Acuamed, 2016).

Con el paso del tiempo, el proceso de desalinización fue captando más atención, de manera que su estudio se realizó de forma más frecuente y detallada. La principal causa del acelerado interés de los científicos por la desalación del agua de mar, fueron los estudios geográficos, debido a los viajes marítimos extensos a causa del comercio de la época y la necesidad de abastecer a las tripulaciones con agua potable conduciendo al uso de alambiques, dispositivos con mecanismo de destilación de líquidos que consistía en calentar el líquido a través de la evaporación, para posteriormente condensarlo mediante un enfriamiento. Cabe resaltar que el médico Gauthier es el considerado el padre de la desalinización luego de introducir el sistema de destilación del alambique en 1717.

En la segunda mitad del siglo XIX, se presentaron progresos importantes sobre los métodos de desalinización cuyas bases se centran en energía térmica, como la destilación, congelación o evaporación solar. Ante todo, para el año 1869 se otorgó en Inglaterra la primera patente para un proceso de desalación seguido del año 1872 donde el científico sueco Carlos Wilson construyó la primera planta de destilación ubicada en una explotación minera en las salinas de Chile, con una producción de 22,5 m<sup>3</sup>/día y que abarcaba un espacio de 4.757 m<sup>2</sup>, y aunque no tenía un rendimiento muy alto, se convirtió en la primera alternativa para abastecer de agua potable a la comunidad minera de esa zona (Villanueva, 2014).

No obstante, a mediados del siglo XX en EE. UU, el primero de los procesos modernos de desalación desarrollado a gran escala fue la desalación súbita multietapa (MSF), dejando obsoletas las técnicas de tubos sumergidos. Aunque la destilación multietapa (MED) era conocida y tenía el potencial de ser más eficiente, sin embargo, conseguir que el proceso fuese eficiente a gran escala era el reto y no fue hasta 1959 cuando se construyó la primera instalación de MED en Aruba.

La historia de la desalinización del agua nos lleva ahora a los años 60. En esa década, Loeb y Sourirajan crearon una membrana semipermeable de acetato de celulosa, membrana capaz de rechazar sales y permitir el paso de agua a través de ella con un flujo razonable y presiones elevadas, lo que abrió el paso a la técnica que revolucionó todo el proceso de la desalinización: la ósmosis inversa (Osuji, 2017). Sin embargo, años antes, más específicamente en 1931 se acuñó el término ósmosis inversa y se patentó el proceso como método de desalación de agua (Osuji, 2017).

A partir de esta innovación, inicia el recorrido de las tecnologías de desalinización por membranas, en 1965 se inauguró la primera instalación comercial de desalación por ósmosis inversa en California en la planta desaladora de agua salobre de Coalinga. No es hasta nueve años más tarde que entra en funcionamiento la primera planta desaladora de OI para agua de mar en Bermuda, cabe destacar que la primera planta desaladora de España fue construida en Lanzarote en 1964 (Buenaventura, 2015).

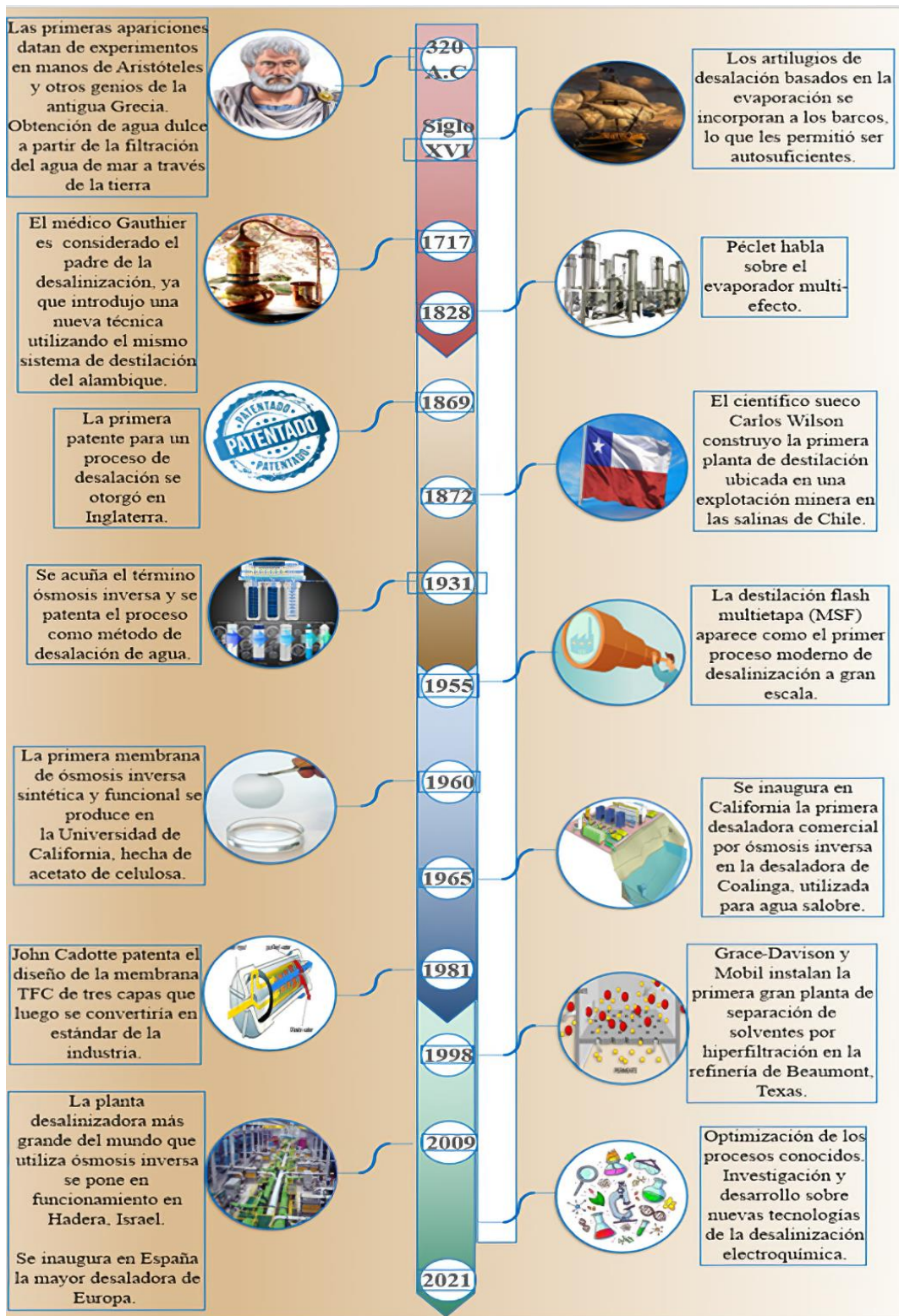
Un avance importante para la química de las membranas que ha hecho posible la aplicación de membranas de ósmosis inversa es el desarrollo de la arquitectura del compuesto de película delgada (TFC). Para 1981, John Cadotte patenta el diseño de la membrana TFC de tres capas que se convirtió en estándar de la industria. La capa proporciona una alta permeabilidad al tiempo que mantiene la selectividad por el agua. Estos avances mejoraron rápidamente la sostenibilidad y aumentaron exponencialmente la implementación de membranas para la desalinización de agua de mar y agua salobre, poniéndose en funcionamiento la planta desalinizadora más grande del mundo en Hadera, Israel para el año 2009 (Buenaventura, 2015).

Si bien es cierto que transformar el agua salada en agua potable ha sido todo un desafío, las tecnologías de desalación térmica y desalación por membrana evolucionan día a día de forma

conjunta hacia la búsqueda de una mayor eficiencia energética y un menor coste a través de avances tecnológicos, el aprovechamiento de economías de escala, la optimización de los distintos procesos y el descubrimiento de nuevas tecnologías enfocadas a la electroquímica.

**Figura A.1.**

*Cronología sobre los aspectos más relevantes de la historia de la desalinización*



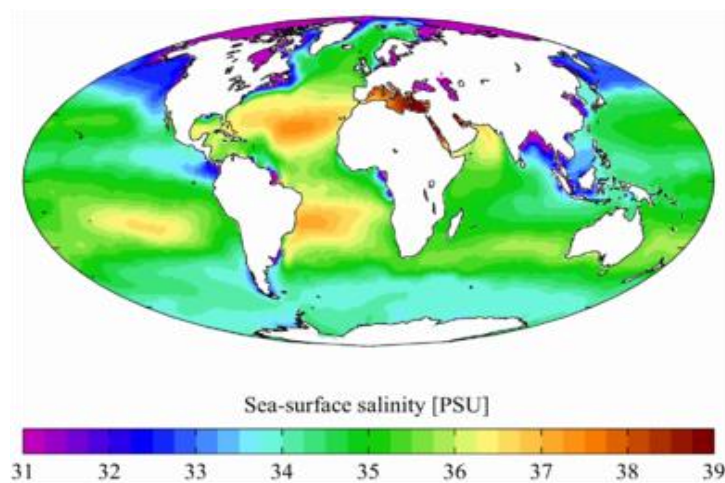
## Principales características fisicoquímicas del agua

### ➤ Salinidad

La salinidad es una propiedad que mide la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT) presentes en el agua de mar, la cual varía de acuerdo con la región marina que se esté analizando. Este término tiene sus orígenes en el siglo XIX gracias a los estudios realizados por el físico suizo Alexander Marcet, el cual logró determinar que las concentraciones de los iones principales presentes en el agua permanecían constantes a lo largo de las zonas, y que lo que variaba era la cantidad total de sales. Para el año 1865, el físico danés Georg Forchhammer introdujo el término de salinidad, ratificando las ideas expuestas por el físico Marcet e identificando 27 elementos que tienen mayor presencia en el agua de mar, tales como lo son los cloruros, sodio, calcio, potasio, magnesio y sulfatos (Fajardo, 2018).

### Figura A.2.

*Salinidad media anual superficial para los océanos, en unidades prácticas de salinidad (PSU) o gramos de sal por litro*



*Nota.* Adaptado de: Atlas oceánico mundial 2001 (*ATLAS OCÉANO MUNDIAL 2001*, 2007)

Estos sólidos disueltos totales son sustancias que pueden ser de tipo orgánico e inorgánico, que son solubles en el agua y que no logran ser retenidos de manera simple por materiales filtrantes que entren en contacto con el fluido. Los SDT son la diferencia entre los sólidos totales (TS) menos los sólidos suspendidos totales (TSS) y son reportados usualmente en mg/l. (Claudio Gómez, 2018) En la tabla A.1. se presenta la clasificación del agua de acuerdo con el contenido de sólidos disueltos totales.

**Tabla A.1.**

*Clasificación del tipo de agua basada en el contenido de salinidad*

<b>Tipo de agua</b>	<b>Sólidos disueltos totales (SDT) (ppm)</b>	<b>Anotación</b>
Agua dulce	Hasta 1.500	Composición química variable
Agua salobre	1.500-10.000	Composición química variable
Agua salada	>10.000	Composición química variable
Agua de mar	10.000-45.000	Composición química constante
Agua de mar estándar	35.000	Composición química constante

*Nota.* Adaptado de (Micale et al., 2009)

### ➤ **Balance iónico**

La existencia de diferentes sales en disolución en el agua da lugar a la propiedad química conocida como salinidad y en el que se pueden destacar los carbonatos, sulfatos y cloruros como las sales más abundantes. Estas sales son formadas mediante interacciones entre diferentes iones, ya sea entre cationes con carga positiva o aniones con carga negativa, los cuales siguen la ley de Marquet que habla acerca de los iones conservativos debido a que la proporción de estos es constante. Los iones que se pueden encontrar en mayor proporción en el agua de mar son el cloro, calcio, sodio, sulfato, potasio y magnesio; en la tabla A.2. se puede observar el porcentaje de los

iones más representativos en el agua de mar de acuerdo con mediciones realizadas por William Dittmar y Lyman y Fleming (Cabero García, 2015).

**Tabla A.2.**

*Porcentajes de los principales iones presentes en el agua de mar según W. Dittmar y Lyman & Fleming*

<b>Ion</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>W. Dittmar (1884)</b>	<b>Lyman &amp; Fleming (1940)</b>
Potasio	K <sup>+</sup>	1,13%	1,10%
Sodio	Na <sup>+</sup>	30,66%	30,70%
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	3,65%	3,70%
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	1,17%	1,16%
Estroncio	Sr <sup>2+</sup>	-	0,04%
Bicarbonato	KHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,30%	0,41%
Cloruro	Cl <sup>-</sup>	50,02%	55,19%
Sulfato	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,71%	7,70%

*Nota.* Adaptado de (Fajardo, 2018)

### ➤ **Temperatura**

La temperatura del agua de mar es tal vez, junto a la salinidad, la propiedad más valiosa a la hora de adentrarse en el diseño de un sistema de desalinización. Del mismo modo que la salinidad, la temperatura presenta valores variados en función de la localización, pero, además, cambia de acuerdo a la época del año en la que es tomada la muestra y realizada la medida.

En consecuencia, la temperatura es la medida de la energía cinética de las moléculas que expresa la cantidad de calor que contiene una solución, mediante grados Kelvin (K) o grados Celsius (°C). Viéndolo de esta manera, las variaciones de temperatura afectan a la solubilidad de sales y gases en agua y en general a todas sus propiedades, tanto químicas como microbiológicas

pues tanto los mares como los océanos presentan grandes diferencias de temperatura entre las aguas profundas y las aguas superficiales.

Comúnmente, cuando se va a implementar un proceso de desalinización de agua de mar, el agua requerida para el proceso se toma de zonas costeras, a profundidades que varían entre 0 y los 25 metros. En seguida, se observan las temperaturas mínimas y máximas de los principales mares, en zonas cercanas a la costa. En la tabla A.3. se presentan las temperaturas máximas y mínimas en las zonas costeras de los principales mares del mundo. Para la medición de estos datos se hizo uso de estaciones de marea, una red de boyas y mediciones satelitales que se encargan de monitorear el comportamiento de los océanos, mares y lagos (Cabero García, 2015).

**Tabla A.3.**

*Temperaturas máximas y mínimas en las zonas costeras de los principales mares del mundo*

Zona	Temperatura (°C)	
	Mínima	Máxima
<b>Mar Mediterráneo</b>	11	28
<b>Mar del Norte</b>	-1,6	17
<b>Océano Atlántico Central</b>	10	27,5
<b>Océano Atlántico Sur</b>	10	27,5
<b>Mar de Arabia</b>	20	30
<b>Océano Indico</b>	11	30
<b>Mares de Australia</b>	11	29
<b>Océano pacifico</b>	10	29,8

*Nota.* Adaptado de (National Oceanic and Atmospheric Administration, n.d.)

➤ **pH**

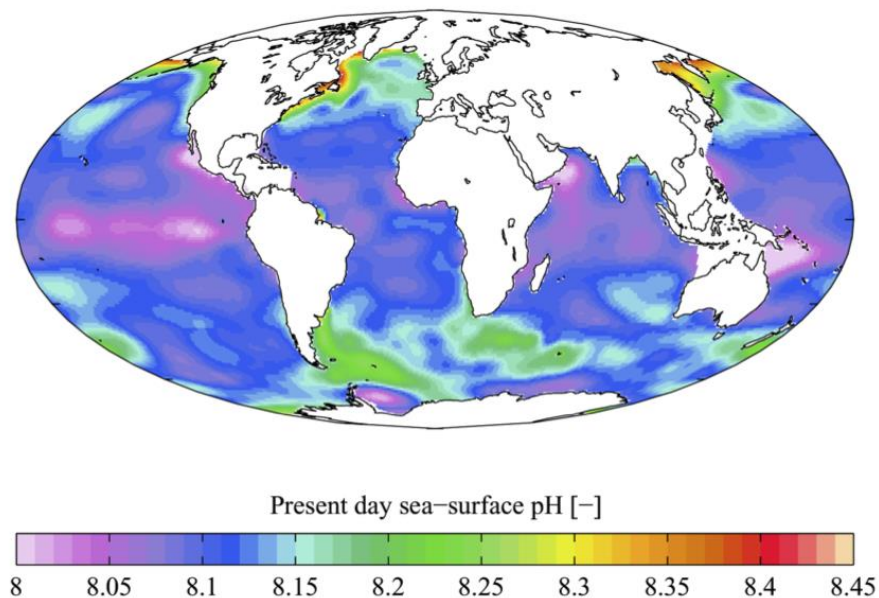
El pH señala el grado de acidez o basicidad de una sustancia o solución y es medido en una escala que va del 0 al 14, siendo 7 el valor medio. La información cuantitativa dada por el valor del pH indica la concentración de iones hidronio ( $H_3O^+$ ) e hidroxilo ( $OH^-$ ). Valores por debajo de

7 indican soluciones ácidas, valores por encima indican soluciones básicas o alcalinas y el valor medio corresponde a soluciones neutras.

En el caso del agua marina, el pH es una forma de medir su tendencia al desequilibrio. El pH típico del agua de mar está alrededor de 8, aunque puede variar en función de la temperatura, salinidad y presión o profundidad, pero no se aleja más de una unidad gracias a la capacidad de equilibrio que tienen los mares y océanos. Por tanto, el mar se caracteriza por ser moderadamente alcalino ya que su pH suele estar entre 7,4 y 8,5 tal y como puede verse en la figura A.3.

**Figura A.3.**

*pH superficial del agua marina en el año 2015*



*Nota.* Adaptado de (Giménez Font, 2015)

Conforme con lo estudiado por Giménez, son varios los factores que mantienen el pH del mar en constante cambio y pueden afectar todo el comportamiento de este; por ejemplo, la absorción de CO<sub>2</sub>, las emisiones de gases de la flora marina, los desechos de los animales y los

desechos del ser humano. En vista de esto, el valor del pH es un dato de interés en la oceanografía química desde cualquier punto de vista que se considere, así como un parámetro importante para comprobar la eficacia de los tratamientos de agua y los procesos de separación como con membranas, por lo que se ha hecho clásica la técnica de su registro, a la vez que se toman otros datos de importancia, tales como temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, entre otros (Fajardo, 2018).

#### Figura A.4.

*Diagrama de las principales características del agua*

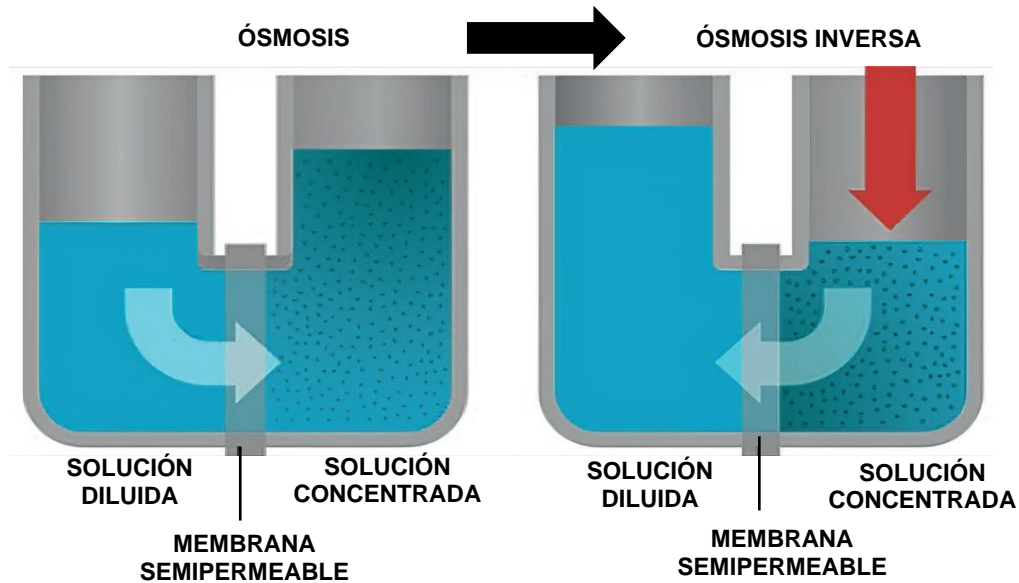


#### Principales métodos de desalinización utilizados actualmente

➤ **Ósmosis inversa (OI)**

El proceso de la ósmosis es un proceso de carácter natural que se presenta en los tejidos de las plantas y los animales, en el cual se da una transferencia de materia entre dos soluciones con diferentes concentraciones. Este intercambio se da a través de una membrana que permite únicamente el paso del solvente, mas no del soluto, dándose desde la solución con menor concentración hacia la más concentrada. A partir de esto, se da una diferencia de altura entre los dos fluidos, lo que da lugar a una diferencia de presión, denominada presión osmótica. Si se aplica una presión externa de una magnitud mayor a la presión osmótica, se dará el mismo proceso de forma contraria, haciendo que el solvente circule desde la solución con mayor concentración hacia la menos concentrada, proviniendo de ahí su nombre (Álvarez & Benavides, 2013).

Este el método goza de ser el más eficiente método de desalinización gracias a su elevada remoción de minerales del agua a un bajo costo económico y energético. Explicando este proceso de una forma más técnica, este consiste en tecnologías de membranas las cuales se encargan de eliminar la salinidad del agua por medio de fenómenos de difusión que permiten el paso de gases y moléculas sin carga electrostática de bajo peso molecular, desde una región de alta concentración de sales y minerales hacia una más baja (J. HUESA WATER TECHNOLOGY, 2014). Estas membranas son capaces de remover un 99,5% de los iones presentes en el agua; y pueden operar con una salinidad máxima de alrededor de 45.000 ppm. La tasa de recuperación de este método se encuentra entre el 30 y el 80%, variando por condiciones tales como calidad del agua y presión de trabajo (Fajardo, 2018).

**Figura A.5.***Proceso de Osmosis Inversa*

*Nota.* La aplicación de una presión externa en la solución concentrada permite que se dé el proceso de ósmosis inversa. Adaptado de (J. HUESA WATER TECHNOLOGY, 2014)

### ➤ Métodos de desalinización térmica

Los cuales se basan en la evaporación y condensación del agua con uso de la energía energética y principio bajo el cual operan sus dos principales representantes:

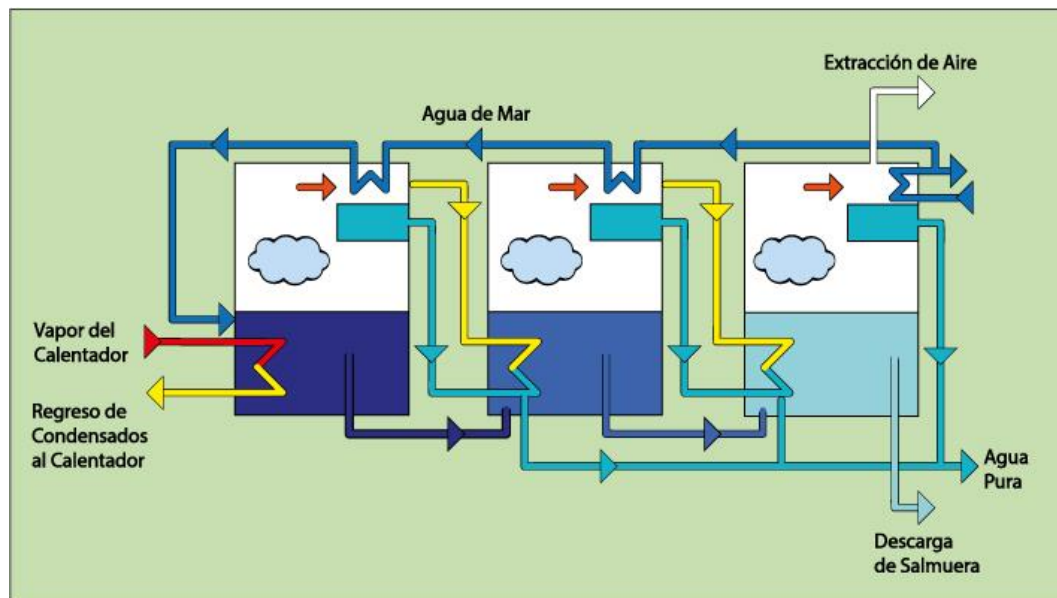
**Destilación Multi-efecto (MED)**, proceso de vapor a baja presión el cual consta de una serie de tubos por los cuales fluye vapor de agua y sobre los cuales se rocía agua marina en su superficie exterior; de esta manera la película de agua marina formada sobre los tubos absorbe la energía del vapor interno, causando que este se condense formando agua pura. Este proceso es el más antiguo utilizado a nivel industrial en desalinización, ya que sus patentes datan de 1840, y ha sido ampliamente comercializado en diferentes presentaciones (Cabero García, 2015).

Este proceso comienza con la evaporación del agua de mar mediante uso de vapor entre 70°C y 80°C, el cual será utilizado en la siguiente etapa con una presión y temperatura menor. Dichas etapas son conocidas como efectos, los cuales determinan la eficiencia y duración del proceso; entre mayor sea el número de efectos mayor será la eficiencia. La salmuera proveniente de este primer efecto es rociada sobre la superficie de diferentes tubos evaporadores con la finalidad de repetir el proceso de evaporación. Finalmente, se obtiene agua desalinizada al condensar dicho vapor proveniente de los anteriores efectos (Buros, 2000).

La eficiencia térmica del proceso depende del número de efectos que se empleen en el proceso, siendo entre 8 y 16 el número común para plantas industriales que utilizan la tecnología de MED. El rendimiento alcanzado por este método puede alcanzar los 16 kg de producto por cada kg de vapor de calentamiento y es considerado como uno de los procesos más económicos de todos los existentes (Fajardo, 2018)

### Figura A.6.

*Esquema de un proceso de destilación multi-efecto (MED)*



**Nota.** Se observan los diferentes efectos desde los cuales es extraída el agua pura. Adaptado de (Pérez Gómez & Fernández Baco, 2017)

**Destilación Multi-etapa (MSF)**, proceso en el cual el agua marina se precalienta hasta una temperatura cercana a la de saturación y se disminuye la presión con lo que se produce una disminución en el punto de ebullición del agua, para lograr la evaporación y condensación del agua.

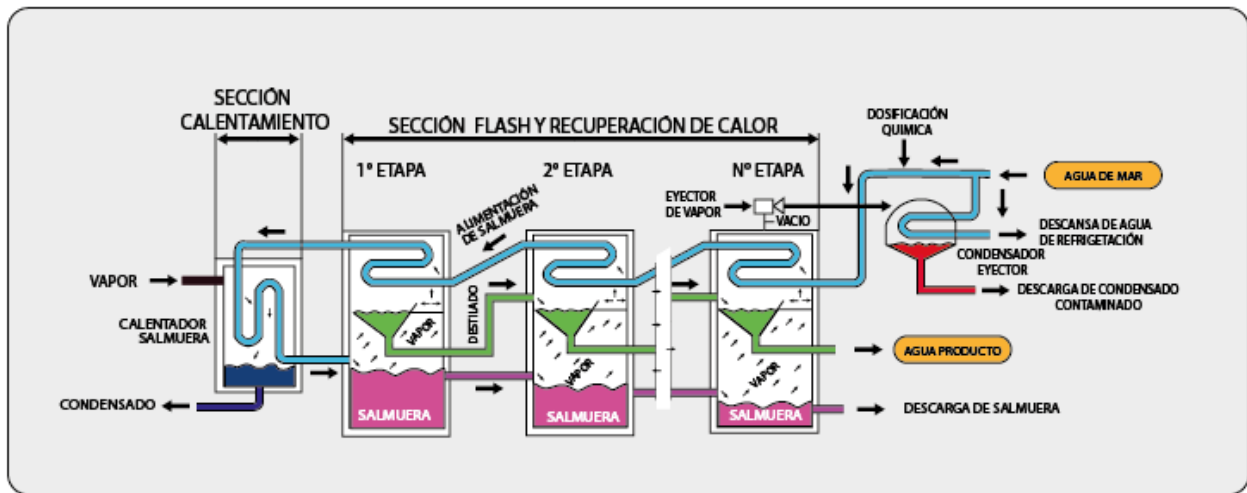
El proceso comienza con el agua de mar previamente calentada en un tanque con una fuente externa hasta una temperatura cercana a la de saturación, introduciéndose en la primera cámara del evaporador en el cual ocurre una caída de presión por debajo de la de saturación, lo cual provoca la evaporación de una parte del agua. Este vapor es llevado a través de mallas separadoras de gotas, denominadas demisters, las cuales eliminan las gotas líquidas de salmuera que no hayan sido evaporadas en la etapa previa. Posteriormente, este vapor es condensado en el haz tubular que transporta el agua de mar hacia el recalentador de salmuera, recogándose este como agua producto. La etapa siguiente está diseñada con una presión inferior que la etapa anterior, con lo cual vuelve a ocurrir el proceso de evaporación y condensación, lo cual ocurrirá en las demás etapas. El número de etapas comunes que utilizan las plantas con procesos MSF es de 40 etapas (Cabero García, 2015).

Este proceso ha evolucionado desde sus inicios en los años 50, mejorando su rendimiento y aumentando la capacidad de remoción de sales. Este método es uno de los procesos más desarrollados en cuanto a la obtención de agua con una alta pureza, sin embargo, requiere de grandes volúmenes de agua, junto con grandes concentraciones de químicos para el tratamiento de

esta. Estos tipos de destilación se acoplan en refinerías y centrales eléctricas, donde el calor residual y la gran energía eléctrica se pueden aprovechar para dichos fines (Technologies, 2018).

**Figura A.7.**

*Esquema de un proceso de destilación multi-etapa (MSF)*



*Nota.* Se observan las diferentes etapas desde las cuales es extraída el agua. Adaptado de (Ros Moreno, 2011)

### ➤ **Electrodialísis (ED)**

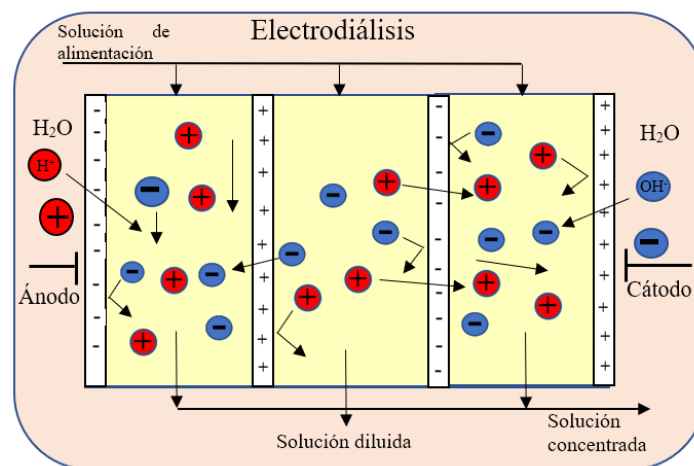
Este es un proceso no convencional el cual se basa en la migración de los iones presentes en el agua a través de membranas de intercambio iónico, las cuales permiten retener estos iones y separarlos del agua; este intercambio se hace posible gracias a la presencia de dos electrodos los cuales son cargados por una fuerza electromotriz que permite el movimiento de los iones. Las membranas deben estar dispuestas de tal forma que se alternen de acuerdo con su carga, ya sea tratándose de una membrana de intercambio aniónica o catiónica, para que pueda hacerse efectiva la desalinización.

El proceso comienza con un diferencial de potencial eléctrico aplicado en los electrodos. El agua salada es conducida entre los espacios formados por las membranas, de tal forma que un compartimiento se encarga de disminuir la concentración de las sales, mientras que el otro absorbe dichas sales de los compartimientos contiguos, todo esto gracias a la transferencia de carga iónica que sucede a través de las membranas de intercambio. Las membranas deben estar intercaladas de acuerdo con su función de transferencia, ya que de esta forma permiten que haya espacios intermedios con agua desalinizada (Fajardo, 2018).

Este método está restringido para aguas salobres que no superen el contenido de sales disueltas de 5.000 ppm, ya que el costo de utilización de este método está ligado directamente con el contenido de SDT del agua, por lo que este costo se incrementaría radicalmente con el uso de aguas marinas. Las tasas de recuperación habituales se encuentran entre un 75% y un 90%, y cuenta con la ventaja de ser un método bastante económico a comparación de los demás métodos. Existen varios problemas como aparición de incrustaciones en las membranas que dificultan este proceso, y hacen que su coste de operación aumente (Germán E. Dévora-Isiordia et al., 2012).

### Figura A.8.

*Descripción esquemática del proceso de Electrodialisis Inversa*



Nota. Adaptado de (Ros Moreno, 2011)

**Tabla A.4.**

*Criterios de Operación de Diferentes Tecnologías de Desalinización.*

Aspectos del proceso	ESME	ED	OI	
			1 Paso	2 Paso
Estado comercial	Completamente desarrollado	Desarrollo más reciente	Desarrollado	
Producción instalada	3.520 plantas	497 plantas	4.000 plantas	
Capacidad máxima	45.000 m <sup>3</sup> /d	18.000 m <sup>3</sup> /d	9.000 m <sup>3</sup> /d	
Plazo de instalación	24 meses	18-24 meses	18 meses	
Fabricantes	Amplia competencia	Pocos en el mercado	Amplia competencia	
Consumo de energía	3-6 kWh/m <sup>3</sup>	1,5-2,5 kWh/m <sup>3</sup>	0,2- 2 kWh/m <sup>3</sup>	2-6 kWh/m <sup>3</sup>
Temperatura máxima	90-120 °C	70-75 °C	40-45 °C	40-45 °C
Calidad del agua producto (STD)	< 40 mg/L	< 40 mg/L	< 40 mg/L	< 40 mg/L
Necesidades de mantenimiento	Limpiezas 2-4 veces por año	Limpiezas 0,5-2 veces por año	Limpiezas 1-2 veces por año	
Sensibilidad al agua mar	Media	Reducida	Alta. Mayor control de membranas	
Pretratamiento	Moderado	Simple	Exigente	
Influencia en la operación	Alta incidencia. Corrosión e incrustación	Baja - Media	Alta. Incidencia en la vida de las membranas	
Tipo de energía	Térmica	Eléctrica	Eléctrica	
Posibilidad de ampliación	Difícil	Fácil	Fácil	
Superficie de instalación	Mucha	Poca	Poca	
Costo USD/m <sup>3</sup> tratado	1,68	0,32	0,76 - 1,32	
Desalación con agua de mar	SI	NO	SI	

**Nota.** ESME: Evaporación Súbita de Múltiple Etapa, ED: Electrodiálisis, OI: Osmosis Inversa. Adaptado de (Thomas, 1997)

**Apéndice B. Información complementaria sobre EDI**

➤ **Antecedentes históricos de EDI**

Históricamente, la desionización electroquímica, también conocida como desalación capacitiva o en la literatura comercial como "CapDI", ha sido denominada desmineralización electroquímica, proceso de electrosorción para la desalinización de agua. La fase inicial de su desarrollo se remonta al siglo XX a finales de 1960 y principios de los 70, cuando los grupos de investigación de Blair y Murphy llevaron a cabo un trabajo pionero usando electrodos basados en carbones porosos para llevar a cabo la electrosorción de iones de sal, introduciendo así el concepto de desmineralización electroquímica del agua.

Durante ese período, los electrodos se clasificaron en tipos que responden a cationes y aniones según su "capacidad de respuesta a los iones", y se asumió que los iones solo podían eliminarse del agua cuando los grupos químicos específicos presentes en la superficie pudieran sufrir reducción u oxidación, seguido de la creación de un enlace iónico entre el ion en solución y el grupo ionizado en la superficie del carbono. Según los estudios, durante esta fase del desarrollo de EDI se centró mucho la atención en el desarrollo de un método para distinguir entre la naturaleza selectiva de cationes y aniones de los electrodos, y en la preparación de un electrodo sensible a aniones, por ejemplo, mediante la incorporación de moléculas orgánicas (Zhao, 2013).

Años más tarde, se inició la discusión sobre el grado de adsorción de iones en ausencia de una diferencia de voltaje externa y se intentó explicar el mecanismo fundamental de la eliminación de iones por EDI, haciendo un estudio exhaustivo del mecanismo de la "desmineralización electroquímica" utilizando análisis coulométrico y de balance de masa de Evans y Hamilton.

En 1968, un estudio de Reid et al. demostró la relevancia comercial y el funcionamiento a largo plazo de una unidad de desmineralización sin una pérdida sustancial de la capacidad de adsorción de sal a lo largo del tiempo. Además, se logró demostrar que además de los iones de sodio y cloruro, los iones de calcio, magnesio, sulfato, nitrato y fosfato pueden eliminarse eficazmente (Qi & Koenig, 2017).

Un gran avance para la desionización electroquímica fue realizado a principios de la década de 1970 por Johnson et al., ya que publicaron importantes estudios teóricos y matemáticos sobre los procesos de desionización, la formación de la doble-capa electroquímica y sobre los mecanismos bajo los cuales se lleva a cabo la retirada de iones en materiales porosos. A partir de 1990, el EDI atrajo más interés debido al desarrollo de nuevos materiales para electrodos, como aerogeles de carbono y nanotubos de carbono, al mismo tiempo que se publicó el primer análisis teórico sobre el consumo de energía usando  $\text{NH}_4\text{ClO}_3$  en medio acuoso, poniéndose en evidencia el bajo requerimiento energético que suponía realizar la desionización mediante EDI (Santos Santos, 2017).

En los últimos años, se ha producido un aumento exponencial considerable en el número de estudios y publicaciones relacionadas con el desarrollo de esta tecnología debido a las grandes ventajas que presenta frente a las demás. No solo se han realizado avances en los materiales sino también en cuestiones como el diseño de los dispositivos de EDI, los parámetros energéticos y el modo de operación de dichos sistemas, viéndose aplicación futura optimista (Ahmed & Tewari, 2018).

➤ **Comprensión de EDI utilizando el concepto de ventanas de voltaje operativo**

El rendimiento de adsorción de los electrodos en una celda EDI se basa principalmente en cómo se maneja el voltaje aplicado a los electrodos de esta, ya que este define en primera instancia la calidad del proceso. Dicho esto, es necesario contar con un potencial de referencia, o una ventana de voltaje, los cuales permitan colocar de manera apropiada el potencial del electrodo y de esta forma optimizar la adsorción iónica y disminuir la presencia de reacciones faradaicas parásitas.

El potencial de carga cero (PZC) está definido como el valor de pH que permite que la carga neta total presente en la superficie del material sea neutra, teniendo este el mismo número de sitios positivos y negativos presentes. Este concepto se liga fuertemente al potencial óptimo de cada electrodo, ya que cada material posee un diferente PZC, y puede ser modificado mediante reacciones de oxidación o reducción, dando como resultado una mejora en el rendimiento del proceso EDI (Amaringo Villa, 2013). La modificación del PZC se puede realizar dependiendo del tipo de carga que posea el electrodo; si el electrodo es positivo se busca su reducción para que con ello su PZC se desplace negativamente, y si este es negativo, se buscara la oxidación para con ello desplazar el PZC positivamente. La aplicación de una diferencia de voltaje en el sistema EDI dará como resultado una ventana de potencial con una adsorción de iones de signo contrario predominante, gracias a los cambios de voltaje introducidos en ambos electrodos (Porada et al., 2013).

➤ **Modelado basado en isotermas**

Otro enfoque importante para el correcto diseño de las celdas EDI es la cuantificación de los datos experimentales en la adsorción de sales en los electrodos en función de la concentración

de sales remanente en la solución, mediante el uso de diferentes isothermas de adsorción, como las basadas en la ecuación de Langmuir o Freundlich. Basándonos en la isoterma de adsorción de Freundlich, está se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{x}{m} = Kc^{1/n}$$

Donde

- $x$  es la masa del adsorbato
- $m$  es la masa del adsorbente a disposición
- $c$  es la concentración de equilibrio del adsorbato en disolución
- $K$  y  $n$  son constantes para una relación de adsorbato y adsorbente a una determinada temperatura.

Los parámetros ajustados tales como la constante  $K$  sirven para la obtención de información sobre la energía de interacción entre ion y sustrato; así mismo, las isothermas ajustadas pueden servir como método de extracción de información y predicción de la adsorción de otros valores de la fuerza iónica del depósito.

Con respecto a la ecuación de Langmuir, esta se define de la siguiente forma:

$$\theta = \frac{V}{V_m} = \frac{\alpha P}{1 + \alpha P}$$

Donde

- $\theta$  es la fracción de cobertura de la superficie
- $V$  es el volumen del gas adsorbido por el sólido
- $V_m$  es el volumen de moléculas monocapa de gas que cubren toda la superficie del sólido y completamente ocupado por el adsorbente
- $\alpha$  es la constante de adsorción de Langmuir

- $P$  es la presión parcial del adsorbente

Esta ecuación es utilizada principalmente para determinar la adsorción que se tiene sobre una superficie sólida de acuerdo a un gas presente, relacionando la adsorción del material con la presión del gas a una temperatura constante (Langmuir, 1961).

**Tabla B.1.**

*Resumen del rendimiento de adsorción de sal informado para diferentes materiales de electrodos aplicados para EDIs*

Primer autor/revista/año de publicación	Material de carbono	Condiciones experimentales				Sal adsorción (mg/g)
		Sal inicial concentración (mg/L)	Caída Voltaje (V)	Carbón contenido (%)	Modo operacional	
JC Farmer / J. Electrochem. Soc./1996	Aerogel de carbono	50	1,2	nd	BM EDI	1,4
	Aerogel de carbono	500	1,2	nd	BM EDI	2,9
MW Ryoo / Agua Investigación / 2003	Ti-O activado en tela de carbono	5844	1	nd	BM EDI	4,3
K. DI /Materiales Cartas / 2005	Nanotubos de carbono de paredes múltiples	3000	1,2	nd	BM EDI	1,7
XZ Wang / Electrochem. Letra de estado sólido/2006	Nanotubos de carbono-nanofibras	110	1,2	100	BM EDI	3,3
L. Zou / Investigación sobre el agua/ 2008	Carbono mesoporoso ordenado	25	1,2	78	BM EDI	0,68
L. Li / Carbono / 2009	Carbono mesoporoso ordenado	50	0,8	78	BM EDI	0,93
H. Li / Revista de química de materiales/ 2009	Grafeno	25	2	100	BM EDI	1,8
YJ Km / Sep. Purif. Técnica/2010	Carbón activado	200	1,5	nd	SP EDI	3,7
	Carbón activado	200	1,5	nd	SP O-MEDI	5,3
R. Zhao/J. Phys. Chem. Lett./ 2010	Electrodo comercial de	292	1,2	nd	SP EDI	10,9 <sup>b</sup>
		1170	1,4	nd		13,0 <sup>b</sup>

**Tabla B.1.**

*Resumen del rendimiento de adsorción de sal informado para diferentes materiales de electrodos aplicados para EDIs*

Primer autor/revista/año de publicación	Material de carbono	Condiciones experimentales				Sal adsorción (mg/g)
		Sal inicial concentración (mg/L)	Caída Voltaje (V)	Carbón contenido (%)	Modo operacional	
H. Li/Env. Sci. & Techn./ 2010	carbono activado Nano escamas similares al grafeno	25	2	80	BM EDI	1,3
H. Li/J. Electroanal. Chem./ 2011	Nanotubos de carbono de pared simple	23	2	70	BM EDI	0,75
P. M. Biesheuvel/J. Colloid Inter. Sci./2011	Electrodo comercial de carbono activado	292	1,2	nd	SP EDI	10,5
		292	1,2	nd	SP O-MEDI	12,8
		292	1,2	nd	SP r-MEDI	14,2
J. Yang/Desalination/2011	Carbón activado de MnO <sub>2</sub>	25	1,2	nd	BM EDI	1
G. Wang/Electrochimica Acta/2012	Telas de Nano fibra de carbono	95	1,6	100	BM EDI	4,6
B. Jia/Chemical Physics Letters/2012	Nano hojas de grafito sulfonadas	250	2	72	BM EDI	8,6
D. Zhang/J. Mat. Chemistry/ 2012	Nanotubos de Grafeno-carbono	29	2	90	BM EDI	1,4
H. Li/Journal of Materials Chemistry/2012	Grafeno reducido óxido-AC	50	1,2	nd	BM EDI	2,9
Z. Peng/Journal of Materials Chemistry/2012	Carbono ordenado mesoporoso - CNT	46	1,2	80	BM EDI	0,63
M. E. Suss/Energy Environ. Science/2012	Aerogel de carbono monolitos	2922	1,5	100	BM EDI	9,6
Z. Wang/Desalination/2012	Grafito reducido oxidate-resol	SSSS	2	80	BM EDI	3,2
S. Porada/ACS Applied Materials & Interfaces/2012 n	Carbón activado (Norit DLC Super 50)	292	1,2	85	SP EDI	6,9
		292	1,4	85		8,4
		292	1,2	85	SP EDI	12,4

**Tabla B.1.**

*Resumen del rendimiento de adsorción de sal informado para diferentes materiales de electrodos aplicados para EDIs*

Primer autor/revista/año de publicación	Material de carbono	Condiciones experimentales				Sal adsorción (mg/g)
		Sal inicial concentración (mg/L)	Caída Voltaje (V)	Carbón contenido (%)	Modo operacional	
	Carbono derivado de carburo	292	1,4	85		14,9
	Norit DLC Super 50 (no publicado)	25	1,4	85	SP EDI	6,1

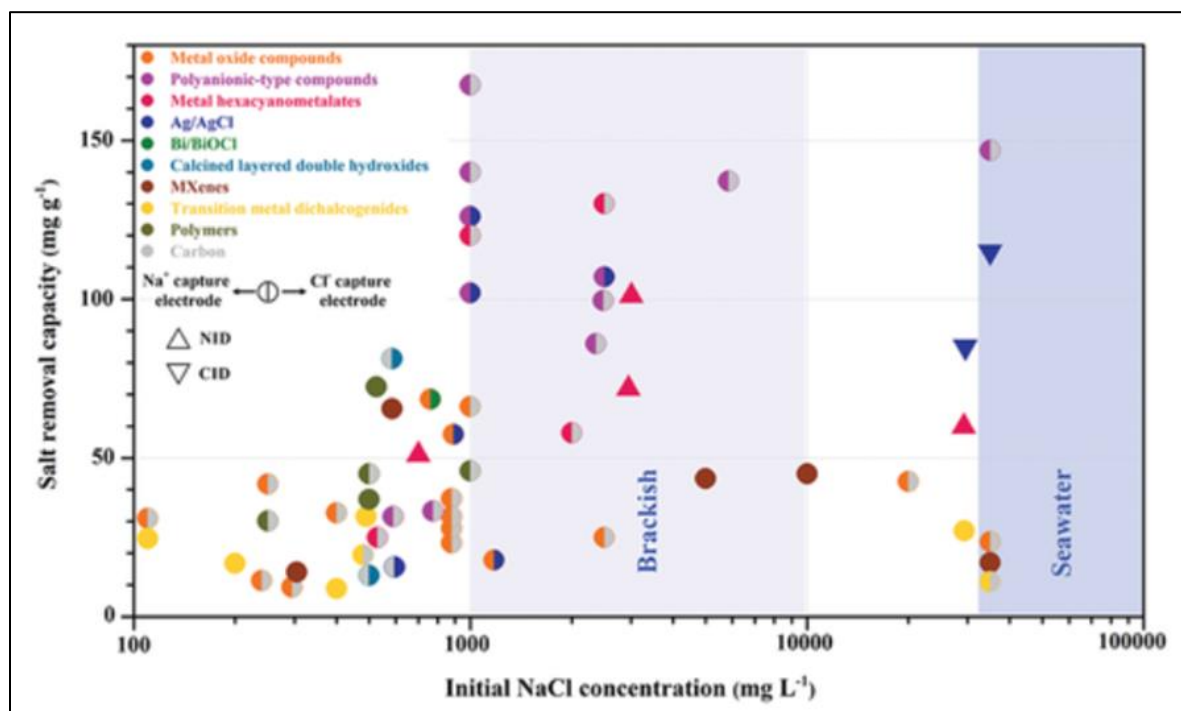
<sup>a</sup> Todos los experimentos utilizan soluciones de NaCl. SP: un solo paso; BM: modelo por lotes, nd: sin datos. Para SP, la salinidad dada es la salinidad de entrada; 0-MEDI: EDI incluyendo membranas de intercambio iónico, con liberación de iones a voltaje de celda cero; r-MEDI: con liberación de iones en voltaje invertido.

<sup>b</sup> Después de la corrección másica del electrodo por 10,6/8,5 g/g.

*Nota.* Adaptado de (Jia & Zhang, 2016)

## Gráfica 2.

*Comparación de la capacidad de eliminación de sal de celdas EDI basadas en electrodos Faradaicos representativas en solución de NaCl de diferente concentración*



*Nota.* Adaptado de (Q. Li et al., 2020)

**Referencias bibliográficas**

- Ahmed, M. A., & Tewari, S. (2018). Capacitive deionization: Processes, materials and state of the technology. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 813(April), 178–192. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.02.024>
- Álvarez, G. S., & Benavides, M. S. (2013). *Desalación de agua de mar mediante sistema Osmosis Inversa y Energía Fotovoltaica para provisión de agua potable en Isla Damas, Región de Coquimbo*. <http://www.cazalac.org>
- Amaringo Villa, F. A. (2013). Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 27. <https://doi.org/10.22490/21456453.982>
- ATLAS OCEANO MUNDIAL 2001. (2007). <https://web.archive.org/web/20070302215521/http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/>
- Buenaventura, A. (2015). *Breve historia de la desalación - ABENGOA*. <http://www.laenergiadelcambio.com/breve-historia-de-la-desalacion/>
- Buros, O. K. (2000). The ABCs of Desalting. *International Desalination Association, Topsfield, Mass*, 2, 1–32. [http://www.water.ca.gov/pubs/surfacewater/abcs\\_of\\_desalting/abcs\\_of\\_desalting.pdf](http://www.water.ca.gov/pubs/surfacewater/abcs_of_desalting/abcs_of_desalting.pdf)
- Cabero García, D. J. (2015). *PROCESO DE DESALACION DE AGUA DE MAR MEDIANTE UN SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA DE MUY ALTA CONVERSION EN TRES ETAPAS CON RECIRCULACION DE PERMEADO Y DOBLE SISTEMA DE RECUPERACION DE ENERGIA*.

[https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/18530/TESIS\\_CABERO\\_GARCIA\\_JULEN.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/18530/TESIS_CABERO_GARCIA_JULEN.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Claudio Gómez, O. (2018). *Desalinización De Agua Para Aplicaciones De Potabilización Mediante El Desarrollo De Tecnología Solar Sustentable*. 12–50.

Delgado García, D. V. (2007). *Análisis comparativo de los procesos de desalinización del agua: destilación súbita por efecto Flash (MSF) frente ósmosis inversa (OI), bajo la metodología de evaluación de ciclo de vida*.  
<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/13424/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Dévora-Isiordia, G. E., González Enríquez, R., & Ponce Fernández, N. E. (2012). Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México. *Ra Ximhai*, 57–70.  
<https://doi.org/10.35197/rx.08.02.e.2012.05.gd>

Fajardo, A. (2018). Desalinización del agua ¿una alternativa sostenible para la potabilización del agua? *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Giménez Font, X. (2015). *El mar es básico | Química, aire y ambiente | SciLogs | Investigación y Ciencia*. <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/39/posts/el-mar-es-basico-13433>

J. HUESA WATER TECHNOLOGY. (2014). *Ósmosis Inversa | J. Huesa Water Technology - Tratamiento de aguas*. <https://jhuesa.com/tecnologias/osmosis-inversa>

Langmuir, I. (1961). The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. *Journal of the American Chemical Society*, 38(11), 2221–2295.

<https://doi.org/10.1021/ja02268a002>

Mercé, P., & Acuamed. (2016). *Desaladoras: Fábricas de agua dulce*.

<https://www.acuamed.es/sites/default/files/publicaciones/geo.pdf>

Micale, G., Cipollina, A., & Rizzuti, L. (2009). Seawater Desalination for Freshwater Production.

In *Green Energy and Technology* (pp. 1–15). Springer, Berlin, Heidelberg.

[https://doi.org/10.1007/978-3-642-01150-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-01150-4_1)

*National Oceanic and Atmospheric Administration*. (n.d.). Retrieved June 26, 2021, from

<https://www.noaa.gov/>

Osuji, C. (2017). *Synthetic Membranes: Basic Principles and Challenges of Large-Scale Production*. 1, 2–3.

Porada, S., Zhao, R., Van Der Wal, A., Presser, V., & Biesheuvel, P. M. (2013). Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization. *Progress in Materials Science*, 58(8), 1388–1442. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.03.005>

Qi, Z., & Koenig, G. M. (2017). Review Article: Flow battery systems with solid electroactive materials. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 35(4), 040801. <https://doi.org/10.1116/1.4983210>

Santos Santos, C. (2017). *Estudio de la Desionización Capacitiva para el Tratamiento de Aguas Salobres : Evaluación de Prestaciones y Eficiencia Energética*.

Technologies, I. (2018). *Desalinización térmica (MED y MVC)*. <https://www.ide-tech.com/es/solutions/desalinizacion/desalinizacion-termica-med-y-mvc-soluciones-de->

[desalinizacion-termica-para-agua-de-mar/?data=item\\_1](#)

Thomas, K. E. (1997). *Overview of Village scale, Renewable Energy powered Desalination*.

Villanueva, M. (2014). *Historia de la desalinización del agua* | Fundación Aquae.

<https://www.fundacionaquae.org/historia-de-la-desalinizacion-del-agua/>

Zhao, R. (2013). *Theory and operation of dapacitive deionization systems (doctoral dissertation)*.