



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**Caracterización de una celda de  
electrodeionización para tratamiento de  
aguas salobres**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERA QUÍMICA**

**P R E S E N T A:**

**Mara Patricia Camacho Espinoza**

**ASESOR:**

**Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

EL N.º 48  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Caracterización de una celda de electrodeionización para tratamiento de aguas salobres.

Que presenta la pasante: Mara Patricia Camacho Espinoza  
Con número de cuenta: 309073307 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 17 de Octubre de 2018.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez	
VOCAL	Q. Celestino Silva Escalona	
SECRETARIO	Dr. Arturo Ortega Díaz	
1er. SUPLENTE	Dr. Martín Rogelio Cruz Díaz	
2do. SUPLENTE	Dra. Francisca Alicia Rodríguez Pérez	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

*Este trabajo lo dedico con mucho amor a:*

*Dios:*

*Por darme fuerzas cuando estoy a punto de caer, por poner todo a su momento y tiempo, tanto como las personas necesarias para formarme y sobre todo por siempre estar a mi lado cuidándome, acompañándome en cada faceta de mi vida y no dejarme nunca sola.*

*“Gracias por todo lo que me has dado en esta vida”*

*Mis padres:*

*Madre; este trabajo no solo es mío es nuestro, porque todo lo que tengo y soy te lo debo a ti, gracias a tus consejos, paciencia, sacrificios y sobre todo tu amor incondicional, por siempre estar a mi lado en las buenas y en las malas apoyándome, estaré eternamente agradecida por tanto amor.*

*Antonieta Espinoza Baños*

*Padre; Por inculcarme que mi prioridad es crecer como persona y académicamente, sin tu constante esfuerzo y apoyo, este logro no se hubiese realizado.*

*Martin Camacho Camacho*

*“Gracias padres, por heredarme el tesoro más valioso que puede dársele a un hijo”*

*Mis sobrinas:*

*Por llegar a mi vida como un motivo, una razón, para ser mejor cada día y así ser un digno ejemplo a seguir para ustedes, por su amor, sus palabras, sus risas, motivación y comprensión hoy he culminado una etapa muy importante en mi vida.*

*Mishel Anethet Perez Camacho*

*Hailie Alexandra Perez Camacho*

*Hillary Alexa Perez Camacho*

*“Gracias por siempre estar a mi lado”*

*Mi Pareja:*

*Te dedico especialmente a ti este trabajo, porque sin tu dedicación, compañerismo, apoyo y tanto amor que me das no hubiese logrado llegar hasta aquí; porque siempre me hiciste creer en mí, alentándome en cada momento y etapa de este proceso, no hay palabras que expresen tanto amor y agradecimiento, porque esta meta es la primera de muchas que concluiremos juntos.*

*Jorge Alberto Rocha Elorza*

*“Gracias por ser un pilar en mi vida”*

## *Agradecimientos*

A la Universidad Nacional Autónoma de México por acogerme en esta grandiosa casa de estudios que desde que entré al CCH Naucalpan me ha dado herramientas para formarme académicamente como personalmente, brindándome la oportunidad de conocer gente maravillosa.

A mis hermanos Maira Anel Camacho Espinoza y Martin Camacho Espinoza gracias por ser parte de mi vida.

A mi asesor Eligio Pastor Rivero Martínez por permitirme trabajar junto a usted dándome un apoyo incondicional, porque este trabajo me hizo crecer y sobre todo le agradezco porque en lo personal no solo cumpla una meta, sino me llevo conmigo un aprendizaje de una persona tan admirable y respetable como usted, sabiendo que no solo obtuve un cierre de una etapa anhelada sino un comienzo de una amistad.

A Ángel Rueda Ángeles por ser una parte importante en esta etapa, por siempre tener las palabras correctas para animarme en mis malos momentos, por darme siempre un momento de su tiempo para poder escucharme, por estar al pendiente de mi crecimiento profesional y personal apoyándome y orientándome, gracias por ser más que un profesor, gracias por ser un gran amigo.

A Arturo Ortega Díaz, gracias por orientarme en este proyecto, transmitiéndome sus conocimientos y dedicarme su tiempo gracias por ser parte de mi formación y mi crecimiento personal.

A Celestino Silva Escalona, por su forma de enseñar y transmitir sus conocimientos ayudándome a crecer, gracias por estar ahí siempre y escucharme, alentarme, haciéndome ver de otra manera las cosas con sus consejos y ocurrencias, gracias por tantas risas, gracias por ser mi buen amigo.

A Carlos Orozco Hernández por hacerme tan amenas y divertidas las clases que llevé con usted, por interesarse en varios aspectos de mi vida, gracias por todas sus enseñanzas.

A Elvia Mayen Santos por inculcarme el aprendizaje y el amor a esta carrera, enseñándome a luchar por mis objetivos, por darme siempre un consejo en un momento difícil y estar al pendiente de mí como estudiante y como persona gracias por su amistad.

A Francisca Alicia Rodríguez Pérez por ser una persona tan paciente, dedicada y comprensiva, por siempre darme ánimos y fuerzas en el transcurso de este proyecto, por dedicar tiempo para ayudarme a culminar esta tesis y sobre todo gracias por volverse una persona importante en mi vida.

A María Teresa Ylizaliturri Gómez Palacio, porque lo logramos, porque usted nunca me dejó caer, porque siempre me motivó, me guió y buscó lo mejor para mí, por sus consejos, oportunidades, su apoyo, su amistad, gracias por tanto cariño.

A Ricardo Paramont Hernández García por ser un profesor admirable, por siempre tener tiempo para una enseñanza más y sobre todo gracias por ser una persona a quien puedo ver como amigo.

A Arturo Iván Chagoya Velázquez, Lourdes Elizabeth Campos Torres, César David Ruiz Galindo gracias por estar desde inicio a fin en esta etapa, por no dejarme sola nunca y explicarme lo que no podía entender con facilidad y sobre todo gracias por esa amistad que espero que nunca tenga un fin y así poder seguir recolectando bellos y sabios momentos a su lado.

A Fernanda Vázquez, Miriam Galicia y Stefani Vázquez gracias por sus amistad, espero perdure por siempre.

A mis sinodales por su apoyo, su tiempo dedicado para la revisión y sugerencias que fueron de gran aporte para la mejora de este trabajo.

A cada uno de mis profesores que a lo largo de la carrera me forjaron y transmitieron sus conocimientos para así poder llegar a culminar esta etapa de mi vida, en especial a Ángel Raygoza Trejo, Abigail Martínez Estrada , Carlos Alberto Morales Rojas, Dalia Bonilla Martínez, Elsa María Marín Ojeda, Gilberto Atilano Amaya Ventura, Ismael Núñez Barrón, Juana Cabrera Hernández, José Juan Monarca Rodríguez, José de Jesús Pérez Saavedra, Miguel Ángel Vázquez Flores, María de Pilar Castañeda Arriaga, Omar Olvera García, Oscar López Robles, Paula Álvarez Fernández, Raúl Gómez Gómez Tagle, Rubén Sanabria Tzintzún, Rodrigo Díaz Medina, Salvador José del Castillo Schmidhuber, Sandy María Pacheco Ortín.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Proyecto No. UNAM-DGAPA-PAPIIT IN 114315 por la beca otorgada para poder continuar con este proyecto.

“Gracias de todo corazón”

*“La inteligencia es la capacidad de adaptarse al cambio”*

Stephen Hawking

*“Miles de personas han sobrevivido sin amor, ninguna sin agua”*

W. H. Auden

*“La cura para todo es siempre agua salada: el sudor, las lágrimas o el mar”*

Isak Dinesen,

# ÍNDICE

---

<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>2</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>6</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>11</b>
OBJETIVOS PARTICULARES.....	11
<b>CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES DE LA ELECTRODEIONIZACIÓN .....</b>	<b>12</b>
1.1 DESARROLLO HISTÓRICO.....	12
1.2 PROCESO DE ELECTRODEIONIZACIÓN Y ARREGLOS DE CELDAS .....	14
1.3 APLICACIONES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA .....	19
1.3.1 <i>Industria Farmacéutica</i> .....	19
1.3.2 <i>Industria de la Energía</i> .....	20
1.3.3 <i>Industria de Microelectrónica</i> .....	21
1.3.4 <i>Industria Nuclear</i> .....	21
1.4 VENTAJAS Y EFICIENCIA .....	22
<b>CAPÍTULO 2: AGUAS SALOBRES.....</b>	<b>24</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS DE AGUAS SALOBRES .....	24
2.2 ACUÍFEROS SALINOS EN MÉXICO .....	27
2.3 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE DESALINIZACIÓN .....	29
2.3.1 <i>Destilación</i> .....	30
2.3.2 <i>Destilación solar</i> .....	30
2.3.3 <i>Congelamiento</i> .....	31
2.3.4 <i>Ósmosis Inversa</i> .....	32
2.3.5 <i>Electrodialisis</i> .....	32
2.3.6 <i>Intercambio Iónico</i> .....	33
2.4 APLICACIÓN DE LA ELECTROIONIZACIÓN EN AGUAS SALOBRES.....	34
<b>CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE ELECTRODEIONIZACIÓN .....	38



3.1.1 Disposición general:.....	38
3.1.2 Espaciadores .....	40
3.1.3 Promotores de turbulencia .....	41
3.1.4 Diseño de juntas.....	42
3.1.5 Electrodo.....	44
3.1.6 Tapas prensa de acero inoxidable .....	45
3.1.7 Tapas de conexiones .....	46
3.1.8 Disposición general del sistema de electrodeionización .....	47
3.1.9 Diagrama de flujo del sistema de electrodeionización .....	48
3.1.10 Recipientes de recirculación .....	49
3.1.11 Rotámetros.....	49
3.1.12 Bombas.....	49
3.2 DESCRIPCIÓN DE LA CELDA DE ELECTRODEIONIZACIÓN .....	50
3.3 DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA.....	51
3.4 EXPERIMENTOS DE ELECTRODEIONIZACIÓN .....	52
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>54</b>
4.1 DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA.....	54
4.2 ELECTRODEIONIZACIÓN .....	60
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>69</b>

# Nomenclatura

---

IO	Ósmosis Inversa
ED	Electrodiálisis
IX	Intercambio Iónico
EDI	Electrodeionización
EDIR	Electrodeionización mediante la inversión periódica de la polaridad
DTR	Distribución de Tiempos de Residencia
$f$	Eficiencia faradaica del proceso
$\Delta C$	Diferencia de concentración [=] mol/L
$F$	Constante de Faraday [=] C/mol
$V_s$	Volumen de la solución [=] L
$Z$	Número de electrones transferidos
$Q$	Carga eléctrica, cantidad de corriente [=] C
$t$	Tiempo de duración del proceso [=] s
$I$	Corriente aplicada [=] A
$V$	Voltaje [=] V
$C_E$	Consumo de energía [=] kW·h
$\sigma_0$	Conductividad Inicial en el tanque de recirculación [=] $\mu\text{S}$
$\sigma$	Conductividad [=] $\mu\text{S}$
$E$	Edades [=] $\text{t}^{-1}$

# Índice de Figuras

---

Figura 1.1. a) Primer módulo de electrodeionización 1977; b) módulo de electrodeionización y desarrollo [8].	13
Figura 1.2. Esquema del transporte iónico del diseño básico de electrodeionización.	15
Figura 1.3. Vista de un módulo de EDI donde se aprecia la resina aniónica y catiónica separada [9].	15
Figura 1.4. Celda piloto de electrodeionización (EDI). (1) Electroodos, (2) juntas de goma, (3) plexiglás, (4) membrana de intercambio catiónico, (5) membrana de intercambio aniónico, (6) tanques de alimentación, (7) camas mixtas de intercambio iónico [11].	16
Figura 1.5. Configuración experimental del proceso de electrodeionización (EDI) utilizando obleas de resina (RW-EDI) para la desalinización de agua contaminada con sales: (1) compartimento de concentrado, (2) membrana de intercambio aniónico, (3) compartimento de diluido, (4) membrana de intercambio catiónico, (5) oblea de resina, (6) membrana bipolar y (7) enjuague de electrodos [12].	17
Figura 1.6. Vista de un módulo (RW-EDI) donde se aprecia la resina de intercambio iónico porosa [12].	17
Figura 1.7. Esquema del transporte iónico a través de las membranas de intercambio aniónico (MA) y catiónico (MC). A- representa al ion arseniato [13].	18
Figura 1.8. Vista de un módulo IXED donde se aprecia la resina aniónica [13].	18
Figura 1.9. Producción de agua purificada combinando ósmosis inversa y electrodeionización [9].	20
Figura 1.10. Equipos modulares de electrodeionización (EDI) para producción de agua para calderas de alta presión [9].	21
Figura 2.1. Distribución de tipos de agua en acuíferos costeros [21].	25
Figura 2.2. Esquema de la explotación de un acuífero costero en contacto directo con el mar mostrando el efecto sobre la interfaz y el espesor de la zona ocupada por el agua de mar [21].	25
Figura 2.3. Esquema de la explotación de un acuífero no conectado con el mar [21].	26
Figura 2.4. Esquema de la explotación de un acuífero interior de agua salobre [21].	26
Figura 2.5. Mapa de acuíferos con intrusión salina y aguas subterráneas salobres [22].	28
Figura 2.6. Acuíferos sobreexplotados en las regiones hidrológicas [24].	29
Figura 2.7. Proceso de Destilación de agua salobre.	30
Figura 2.8. Destilación solar [20].	31

Figura 2.9. Destilador por congelamiento de agua [20].....	31
Figura 2.10. Proceso de Ósmosis y Ósmosis Inversa. ....	32
Figura 2.11. Proceso de separación por electrodiálisis. ....	33
Figura 2.12. Proceso de Intercambio Iónico.....	34
Figura 2.13. Configuración de la celda de pila de EDIR [25].....	36
Figura 2.14. Diagrama esquemático de flujo del sistema EDIR [25]. ....	36
Figura 2.15. Diagrama esquemático del dispositivo de electrodeionización: (1) compartimento diluido con oblea de resina y (2) compartimento de concentrado sin oblea de resina [26]. ....	37

Figura 3.1. Disposición general de los componentes de la celda. 1- Tapas prensa (2 piezas) del reactor construidas en acero inoxidable 316; 2- Tapas de conexiones (2 piezas) de polipropileno; 3- Electrodo (2 piezas: uno de acero inoxidable 316 y otro de titanio con recubrimiento electrocatalítico); 4-Espaciadores (4 piezas); y 5- Juntas de teflón y Neopreno. Las piezas de color rojo representan las membranas.....	39
Figura 3.2. Celda de electrodeionización. A- Componentes de la celda (espaciadores, empaques, membranas, electrodos y promotores de turbulencia); 7- Tornillos (6 piezas); Conexiones de entrada y salida [8-Niples de 3/8" NPT cédula 40 de PVC (4 piezas), 9- Accesorio Accesorio "T" de 3/8" NPT cédula 40 de PVC (2 piezas)].....	39
Figura 3.3. Dibujo 3D del espaciador.....	40
Figura 3.4. Espaciador en forma real.....	40
Figura 3.5. Detalle del distribuidor de líquido del espaciador. ....	41
Figura 3.6. Dimensiones del espaciador en cm. ....	41
Figura 3.7. Promotor de turbulencia. ....	42
Figura 3. 8. Promotores de turbulencia colocados en los espaciadores.....	42
Figura 3.9. Junta tipo 1. ....	43
Figura 3.10. Junta tipo 2. ....	43
Figura 3.11. Junta tipo 3. ....	44
Figura 3.12. Junta tipo 4. ....	44
Figura 3.13. Dimensiones electrodos. ....	45
Figura 3.14. Tapas prensa de placas de acero inoxidable. ....	45
Figura 3.15. Dibujo 3D de Tapa prensa de placa de acero inoxidable. ....	46
Figura 3.16. Dimensiones tapa de conexiones de material plástico (polipropileno). ....	46
Figura 3.17. Dibujo 3D de Tapa de conexiones de material plástico (polipropileno). ....	47
Figura 3.18. Disposición general de Sistema de Electrodeionización en diferentes vistas:..	48
Figura 3.19. Diagrama de flujo de sistema de electrodeionización. ....	49

Figura 3.20. Arreglo del sistema de electrodeionización utilizado para la remoción de NaCl. .....	50
Figura 3.21. Sistema utilizado para la experimentación de Distribución de Tiempos de Residencia. a) Esquema del sistema, b) Sistema físico.....	51
Figura 3.22. Dibujo esquemático del sistema utilizado para la experimentación de electrodeionización. ....	52
Figura 3.23. Sistema físico utilizado para la experimentación de electrodeionización. ....	53
Figura 4.1. Normalización de DTR [27]. ....	54
Figura 4.2. Resultado del comportamiento del trazador a la salida del compartimento con resina mixta a flujos de 12, 8 ,4 GPH utilizando una señal de entrada tipo escalón. ....	55
Figura 4.3. Distribución de tiempos de residencia en el compartimento con resina (calculada a partir de la concentración de salida del trazador de la Figura. 4.2). ....	56
Figura 4.4. Posición de los espaciadores a estudiar. ....	57
Figura 4.5. Curvas de distribución acumulativa a la salida de la celda en el espaciador #1 para una señal de entrada tipo escalón. a) Espaciador sin promotores de turbulencia y b) Espaciadores con promotores de turbulencia, ambos a flujos de 12 GPH, 8 GPH y 4 GPH. 58	
Figura 4.6. Curvas de distribución de tiempos de residencia en el compartimento formado por el espaciador #1 (DTR calculada a partir de los datos de la Figura 4.5). a) Espaciador sin promotores de turbulencia y b) Espaciador con promotores de turbulencia, ambos a flujos de 12 GPH, 8 GPH y 4 GPH.....	58
Figura 4.7. Curvas de distribución acumulativa a la salida de la celda en el espaciador #2 para una señal de entrada tipo escalón. a) Espaciador sin promotores de turbulencia y b) Espaciador con promotores de turbulencia, ambos a flujos de 12 GPH, 8 GPH y 4 GPH. ....	59
Figura 4.8. Curvas de distribución de tiempos de residencia en el compartimento formado por el espaciador #2 (DTR calculada a partir de los datos de la Fig.4.7). a) Espaciador sin promotores de turbulencia y b) Espaciador con promotores de turbulencia, ambos a flujos de 12 GPH, 8 GPH y 4 GPH.....	59
Figura 4.9. Comportamiento de la conductividad normalizada en la celda de EDI de la solución concentrada (espaciador #2) y solución diluida (espaciador con resina), a un voltaje de 7 V y un flujo de 8 GPH. ....	60
Figura 4.10. Diagrama esquemático del transporte de iones en la celda EDI experimental con cuatro compartimentos. ....	61
Figura 4.11. Comportamiento de la conductividad normalizada en la celda de EDI de la solución concentrada (espaciador #2) y solución diluida (espaciador con resina), a un voltaje de 14 V y un flujo de 4 GPH. ....	62

Figura 4.12. Comportamiento de la conductividad normalizada en la celda de EDI de la solución diluida (espaciador con resina), a un voltaje de 7 V y 14 V y flujo de 8 GPH y 4 GPH. .... 63

Figura 4.13. Comportamiento de la conductividad normalizada en la celda de EDI de la solución concentrada (espaciador #2), a un voltaje de 7 V y 14 V y flujo de 8 GPH y 4 GPH. .... 64

Figura 4.14. Comportamiento de la corriente con respecto al tiempo a voltajes de 7 V y 14 V con un flujo de 8 GPH y 4 GPH. .... 65

# Índice de tablas

---

Tabla 2.1. Clasificación del agua por su salinidad. ....	24
Tabla 3.1. Descripción de cada parte del diseño de la celda filtro prensa.....	38
Tabla 3.2. Descripción del sistema de electrodeionización. ....	47
Tabla 4.1. Eficiencia de corriente de la celda EDI calculada con la ecuación 1.1.....	65
Tabla 4.2. Consumo de energía en la celda EDI calculada con la ecuación 4.1 .....	66
Tabla 4.3. Costo del consumo de energía para la celda EDI por metro cúbico.....	66

# Resumen

---

El presente trabajo tuvo como objetivo el estudio experimental de caracterización de una celda de electrodeionización (EDI) para el tratamiento de agua salobre. Esta tecnología se originó a finales de la década de 1950 pero hasta 1984 fue implementada industrialmente y se ha desarrollado en varios sectores de la industria como la energética, microelectrónica, cosmética, electrónica, alimentaria, química, biotecnología, farmacéutica y en laboratorios de investigación. Su principal uso es en la producción de agua ultrapura aunque además puede utilizarse en la separación de especies iónicas metálicas tóxicas presentes en los efluentes de desechos industriales y ha sido la base de aplicaciones adicionales.

La EDI es un proceso continuo que permite obtener agua de muy alta pureza con mayores ventajas comparadas con otras tecnologías usadas para el mismo fin. La EDI es un proceso ecológico que solo requiere electricidad y materiales apropiados de intercambio de iones, evitando la necesidad de agentes regeneradores u otros productos químicos que son considerados peligrosos; esto permite además simplificar significativamente las instalaciones, tener mayor seguridad de operación por no usar químicos y no ocupar mucho espacio ni producir contaminantes.

Por otro lado, el agua salobre se produce como resultado de altos índices de evaporación en zonas de niveles someros de agua subterránea, disolución de minerales evaporíticos y presencia de agua congénita de elevada salinidad. Las aguas salobres se presentan específicamente en aquellos acuíferos localizados en zonas geológicas caracterizadas por formaciones sedimentarias antiguas, someras, de origen marino y evaporítico, en las que la interacción del agua subterránea con el material geológico produce su enriquecimiento en sales. A finales de 2016 se habían identificado 32 acuíferos con presencia de suelos salinos y agua salobre en México. El agua que se puede considerar como recurso subterráneo salobre susceptible de desalación se sitúa entre un valor 0.5-30 g/L de total de sólidos, el agua salobre es agua salada que el ser humano no puede utilizar pero no es tan salada como el agua de mar.

El estudio experimental se llevó a cabo con soluciones modelo de NaCl, simulando agua salobre, en una celda de electrodeionización (EDI) a nivel laboratorio; se utilizó un sistema de cuatro compartimientos en el que uno de ellos contenía un lecho de resina mixta delimitado por dos membranas, una de intercambio aniónico y otra de intercambio catiónico, más dos compartimientos de enjuague para los electrodos. Los experimentos de EDI se llevaron a cabo para remover iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  a dos diferentes flujos (4 GPH y 8



GPH) con voltajes de 7 V y 14 V para regenerar la resina. Por otro lado, para conocer el comportamiento de flujo en la celda se realizó un estudio previo de Distribución de Tiempos de Residencia (DTR) en los compartimentos de la celda mediante pruebas con un trazador (5mL de NaCl a 0.6M) utilizando la técnica estímulo respuesta con una señal tipo escalón. Los resultados obtenidos muestran la factibilidad de la tecnología de EDI para remover NaCl de aguas salobres modelo (se remueve hasta un 91%) considerando que se obtuvo una eficiencia de corriente mayor de 23.4% y un consumo de energía menor de 0.2 kW·h. Los estudios de DTR mostraron que el tipo de flujo presenta una tendencia a flujo pistón a mayores flujos. Por otro lado, con el uso de promotores de turbulencia la curva de DTR muestra un ligero alargamiento hacia tiempos grandes de la distribución, “coleo”, ocasionado por la retención del líquido en las superficies de las paredes del espaciador y los promotores de turbulencia.

# Introducción

---

La enorme demanda de agua en todo el mundo impulsa la búsqueda de nuevas fuentes de suministro y un uso más racional del recurso, en este sentido es importante considerar que el agua salobre es una fuente de agua fácilmente accesible en algunas regiones que, después de un adecuado tratamiento, puede ser utilizada para beber, producir alimentos, en tareas domésticas o para fines recreativos. Estas fuentes de agua pueden ayudar a mejorar el abastecimiento de agua y la gestión de los recursos hídricos para impulsar el crecimiento económico de los países y contribuir en gran medida a la reducción de la pobreza, considerando que 844 millones de personas carecen incluso de un servicio básico de suministro de agua potable. Se estima que de aquí al año 2025, la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasez de agua por lo que la investigación del aprovechamiento de diferentes fuentes de agua reviste gran importancia.

El agua salobre una vez desalinizada no sólo se utiliza como agua potable, en el 2005 más del 95% del agua salina proveniente de depósitos subterráneos era utilizada por la industria de energía termoeléctrica y el 5% restante se utilizaba para tareas mineras e industriales. Las tecnologías de tratamiento avanzado son necesarias para purificar y desalinizar agua subterránea salobre. Dado que el agua salobre se puede tratar para proporcionar una fuente de agua potable confiable y saludable, más compañías y comunidades están investigando la desalinización de agua salobre como un medio práctico para prevenir la escasez de agua.

Entre los diferentes métodos existentes para desalinizar agua, la electrodeionización (EDI) se convierte en un proceso muy atractivo por sus ventajas, entre las que destacan la alta pureza del agua obtenida y la eliminación del uso de productos químicos de regeneración, necesarios en el caso de intercambio iónico, en un 95% (en algunos casos los elimina totalmente), además de que este proceso incrementa notablemente la seguridad operacional ya que elimina la posibilidad de contaminación y disminuye el impacto ambiental. Es importante mencionar que la tendencia mundial prevista para el futuro cercano, en todas estas aplicaciones, es el remplazo progresivo de las resinas de intercambio iónico y electrodiálisis por celdas EDI por lo que es necesario estudiarlas para diseñar celdas eficientes con bajos consumos de energía.

La EDI emplea una combinación de membranas selectivas de iones y resinas de intercambio iónico, entre dos electrodos, ánodo (+) y cátodo (-), sometidos a una diferencia de potencial eléctrico, la cual fuerza la migración de los iones desde la cámara de alimentación hasta las cámaras adyacentes de concentrado. Este potencial también

puede disociar las moléculas de agua produciendo iones hidrógeno e hidróxilos que continuamente regeneran la resina. El proceso EDI reemplaza a los convencionales lechos mixtos de resinas produciendo agua de calidad ajustable, no necesitando paradas del proceso para la regeneración ni sustitución de resinas. Debido a esto, en la EDI no se producen variaciones en la calidad del agua obtenida y se reducen al mínimo los gastos de explotación.

Con el fin de entender mejor los procesos de intercambio de iones y regeneración simultánea de la resina, en este trabajo se analiza el proceso EDI en un diseño de celda de cuatro compartimentos y un lecho mixto de resina a diferentes condiciones de flujo y potencial para tratar un agua salobre modelo. Asimismo, se estudia el comportamiento de flujo en cada compartimento mediante la distribución de tiempos de residencia con fin de valorar el diseño de la celda, en particular el diseño de los distribuidores de entrada y salida. El propósito es mostrar que se puede aprovechar esta tecnología, con sus diversas ventajas, para la desalinización de agua salobre, ya que existen cuerpos de agua (superficial, subterránea y marítima) que no se aprovechan debido a su calidad, pero que pueden ayudar a la solución del problema de la disponibilidad de agua que se agrava continuamente en nuestro país y el mundo.

# Objetivo General

---

Llevar a cabo un estudio experimental para caracterizar una celda de electrodeionización estableciendo su comportamiento mediante distribución de tiempos de residencia y decaimiento de concentración de NaCl con el fin de tratar aguas salobres.

## Objetivos Particulares

- Diseñar y probar la funcionalidad de una celda de electrodeionización a nivel laboratorio.
- Establecer el comportamiento hidrodinámico mediante estudios de Distribución de Tiempos de Residencia en compartimientos con y sin promotores de turbulencia, así como en el compartimento de resina.
- Determinar el decaimiento de concentración de NaCl a diferentes potenciales de celda y flujo de electrolito.
- Evaluar la capacidad y eficiencia de deionización de la celda en función de las condiciones de operación.

# Capítulo 1

## Antecedentes de la Electrodeionización

---

### 1.1 Desarrollo histórico

Uno de los primeros antecedentes de separaciones por electrodiálisis fue el de un proceso para la desmineralización de jarabe de azúcar en 1889 [1], pero el proceso no fue conocido con el término “electrodiálisis” sino hasta aproximadamente 10 años después [2]. Los materiales de intercambio iónico a base de polímeros necesarios para la ED se comenzaron a producir en 1930 pero estos materiales en forma de membranas selectivas de iones no se utilizaron sino hasta que Manegold [3] las usó en una celda de ED de tres compartimentos. El posterior desarrollo en la fabricación de membranas con mejores propiedades [4] permitió la aplicación industrial de la ED para desmineralizar y concentrar soluciones electrolíticas [5]. La ED es la tecnología más popular de procesos de separación impulsados eléctricamente en la industria. Una desventaja de la ED es la polarización de concentración que ocurre cuando al separar los iones de la solución de alimentación se forma una capa de baja concentración de iones que ocasiona una alta resistencia eléctrica dentro de la celda disminuyendo su eficiencia. Para eliminar esta desventaja, se ha introducido un conductor iónico en el compartimento diluido en forma de resinas de intercambio iónico. De esta forma, las tecnologías ED y de intercambio iónico (IX) se combinaron, lo que permitió lograr una separación de alta calidad con una eficiencia energética elevada. Este nuevo sistema híbrido fue nombrado posteriormente como electrodeionización (EDI) [6].

La EDI es el proceso de intercambio iónico con regeneración simultánea de la resina por métodos electroquímicos que se originó en la década de 1950 y permitió la operación continua del proceso. Por otro lado, este proceso híbrido evita el problema de la baja conductividad eléctrica en las soluciones diluidas de las celdas de electrodiálisis porque la resina se comporta como conductor iónico. La combinación estratégica de electrodiálisis e intercambio iónico permitió superar el problema de la polarización de concentración y aumentar la eficiencia de separación. Por lo tanto, esta tecnología fusiona las cualidades de la electrodiálisis (ED) y el intercambio iónico (IX) en un proceso híbrido que resuelve las dificultades de cada uno de estos procesos por separado.

El desarrollo de la EDI se llevó a cabo durante la segunda mitad del siglo XX, desde que se hicieron las primeras descripciones de la EDI en el Laboratorio Nacional de Argonne con la eliminación de restos de elementos radiactivos en agua en 1955 y la generación por

Permutit Company de un dispositivo inicial que incorporaba una mezcla de resinas aniónicas y catiónicas a finales de la década de 1950. Otros trabajos reportaron la deionización de una solución salina mediante un módulo EDI y posteriormente de soluciones que contenían iones de calcio, hierro, así como fosfatos y detergentes para demostrar la viabilidad del proceso. Sin embargo, la EDI estuvo disponible comercialmente hasta la década de 1980 para la producción de agua ultrapura [7].

El diseño de celdas EDI comenzó con los módulos hechos por Harry O'Hare en 1977 y 1978 (Figura 1.1) que fueron probados en el Southern Research Institute en Birmingham Estados Unidos. El concepto fue "ED de celdas llenas" para utilizar la ED con el fin de lograr otros objetivos, como la purificación de agua para la industria electrónica para hacer reblandecimiento de agua con membranas. El propósito fue deionizar el agua que no podía hacerse de manera efectiva por ED. "ED de Celdas Llenas" fue desarrollado tanto por un grupo bajo la dirección de Arthur Goldstein en Ionics en Massachusetts como por O'Hare en California. Goldstein y Ionics abandonaron el concepto considerando que no era comercialmente interesante, pero persistió O'Hare. Harry O'Hare formó "HOH Water Technologies" en 1979 sobre la base de su éxito en el laboratorio. Se prepara la primera patente EDI en 1981, que fue concedida en 1984 [8].

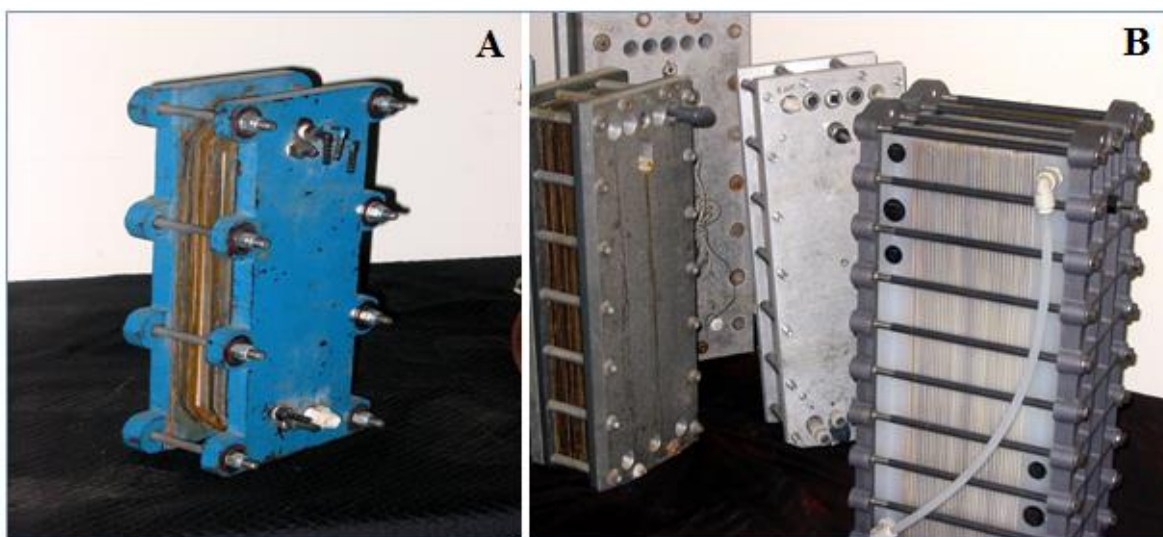


Figura 1.1. a) Primer módulo de electrodeionización 1977; b) módulo de electrodeionización y desarrollo [8].

Los primeros modelos de celdas de electrodeionización (EDI) eran muy caros y los primeros usuarios de los sistemas de EDI fueron industrias con aplicaciones de alto valor agregados, como la industria Farmacéutica.

La EDI se basa en la aplicación de un lecho de resina de intercambio iónico en una cámara de diluido (también, en casos seleccionados, en una cámara de concentrado) de una unidad ED, que le proporciona conductividad suficiente. Un campo eléctrico garantiza así la transferencia continua de iones de la fase selectiva de iones a la corriente de concentrado. Desde este punto de vista, la EDI representa una combinación de ED con la tecnología de IX convencional propuesta en la década de 1970. Su principal ventaja consiste en permitir el funcionamiento continuo sin el uso de agentes regeneradores, lo que reduce la contaminación ambiental y ahorra el agua requerida para el tratamiento del intercambiador de iones. La resina en la EDI permite un intercambio de masa significativamente más intenso entre la fase sólida y la líquida en comparación con la interfaz bidimensional de membrana selectiva de iones en el proceso ED. La EDI ahora se ha convertido en una tecnología comercialmente exitosa.

## **1.2 Proceso de electrodeionización y arreglos de celdas**

Los esfuerzos constantes de investigación en celdas de electrodeionización (EDI) se han centrado en conocer los mecanismos operativos detallados, lo que permite la extensión de sus aplicaciones a otros campos. Su capacidad de segregar por completo las especies iónicas de la solución diluida proporciona a la EDI la capacidad de ser utilizada en muchas otras áreas. La EDI puede ser utilizada no solo en la producción de agua ultrapura sino también para separar especies iónicas tóxicas que pueden estar presentes en efluentes industriales. Este es un método ambientalmente limpio que requiere solo electricidad y materiales apropiados de intercambio iónico evitando el uso de agentes regeneradores y otros productos químicos.

En el proceso EDI, particularmente para la producción de agua ultrapura, intervienen: una pequeña cantidad de resinas de intercambio iónico, membranas semipermeables aniónicas y catiónicas alternadas y corriente eléctrica continua alimentada a dos electrodos (cátodo y ánodo). La celda EDI es alimentada con agua previamente purificada, típicamente por ósmosis inversa, para reducir aún más la concentración de iones por medio de la aplicación de energía eléctrica que promueve la migración de iones a través de las membranas para la obtención de agua ultrapura [9]. La energía eléctrica aplicada también provoca la disociación de las moléculas de agua en iones de hidrógeno e hidroxilo, especies que regeneran las resinas de intercambio iónico, por lo que este proceso no requiere la regeneración de la resina con sustancias químicas ni la sustitución de las resinas [10]. Uno de los componentes más importantes de las celdas EDI son las membranas de intercambio iónico que limitan el paso de cationes o aniones, dependiendo

de la carga de los grupos funcionales anclados a la estructura de la membrana, permitiendo la deionización del agua de un lado de la membrana (solución diluida) y aumentando la cantidad de iones en el otro lado (solución concentrada). Los primeros equipos de deionización contenían resinas catiónicas y aniónicas mezcladas formando lechos mixtos de intercambio iónico (Figura 1.2).

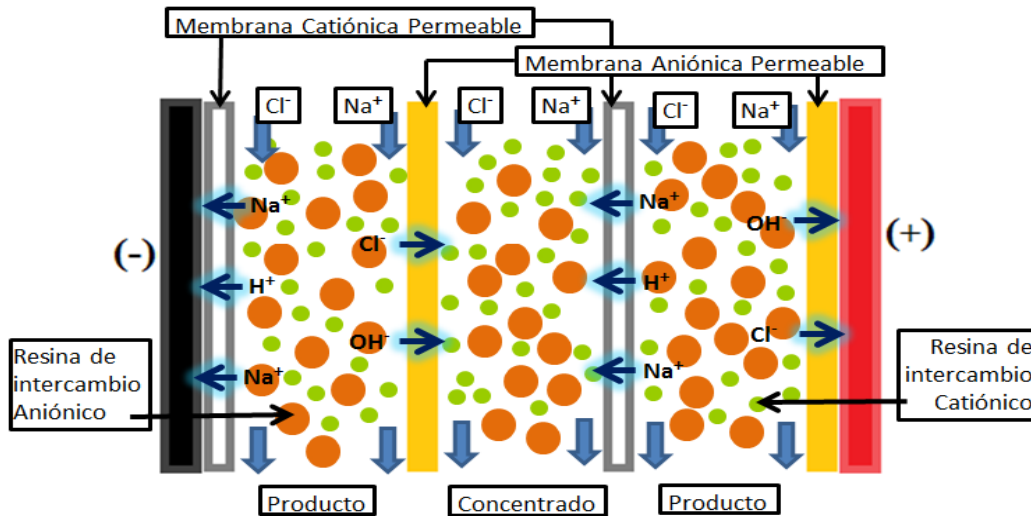


Figura 1.2. Esquema del transporte Iónico del diseño básico de electrodeionización.

En la actualidad se utiliza la configuración de módulos del tipo plato y marco que incluyen nuevos desarrollos de módulos EDI, resinas de intercambio iónico, catiónicas y aniónicas, separadas en las celdas del diluido o producto (Figura 1.3).

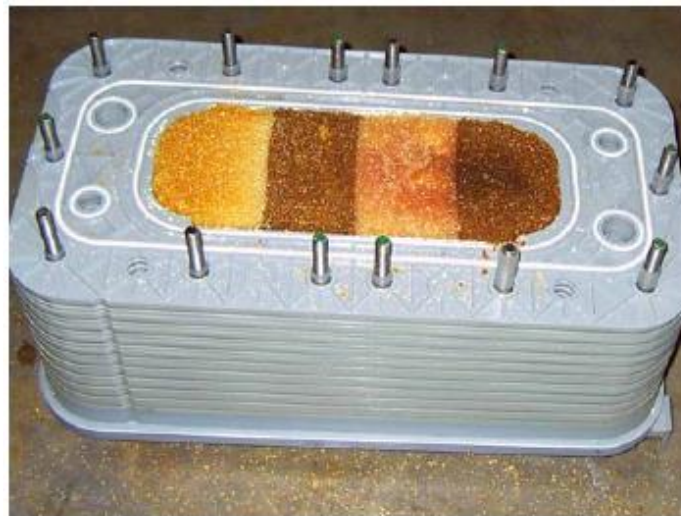


Figura 1.3. Vista de un módulo de EDI donde se aprecia la resina aniónica y catiónica separada [9].



Algunos diseños de celdas EDI a nivel laboratorio para la producción de agua ultrapura se han propuesto en la literatura, como el de la Figura 1.4 que muestra una celda de EDI formada por tres compartimentos donde el compartimento central contiene un lecho mixto de resinas catiónicas y aniónicas (50/50% en volumen), el compartimento izquierdo (catódico), separado del compartimento central por una membrana de intercambio catiónico y el compartimento derecho (anódico), separado del compartimento central por una membrana de intercambio aniónico, y toda la celda entre dos electrodos de carbono. El compartimento central está percolado por una solución salada proveniente del tanque de alimentación [11].

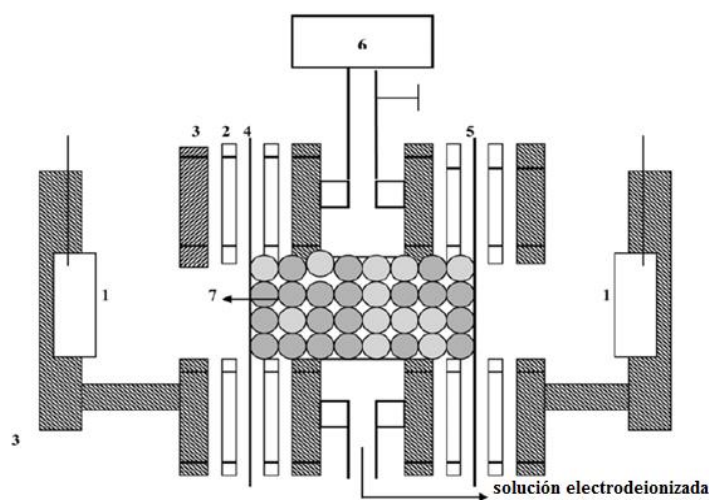


Figura 1.4. Celda piloto de electrodeionización (EDI). (1) Electrodos, (2) juntas de goma, (3) plexiglás, (4) membrana de intercambio catiónico, (5) membrana de intercambio aniónico, (6) tanques de alimentación, (7) camas mixtas de intercambio iónico [11].

Otra tecnología reciente para la desalinización de agua contaminada con sales es una que propone el uso de obleas de resina, desarrollada para conservar energía durante la desalinización de agua. Las perlas o “pellets” de resina de intercambio iónico se inmovilizan y moldean para formar la oblea de resina porosa que se utiliza en problemas de desalinización de agua. Las obleas de resina son fabricadas utilizando “pellets” de resina de intercambio aniónico, intercambio catiónico, un polímero aglutinante y un agente para formar poros. La mezcla se calienta a 120 ° C durante 1 hora y se vierte en un molde para formar una oblea de resina porosa. La Figura 1.5 muestra la configuración de la celda con los compartimentos de diluido y concentrado, las membranas catiónicas, aniónicas y membranas bipolares así como las obleas de resina colocadas en los compartimentos de diluido. La Figura 1.6 muestra una oblea de resina de intercambio iónico porosa. La función de las membranas bipolares es la de aislar la solución de

enjuague (solución  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) que circula en los compartimentos de los electrodos de las soluciones de proceso. El arreglo de las membranas tiene la finalidad de permitir el transporte de iones desde los compartimentos de diluido hacia los compartimentos de concentrado [12].

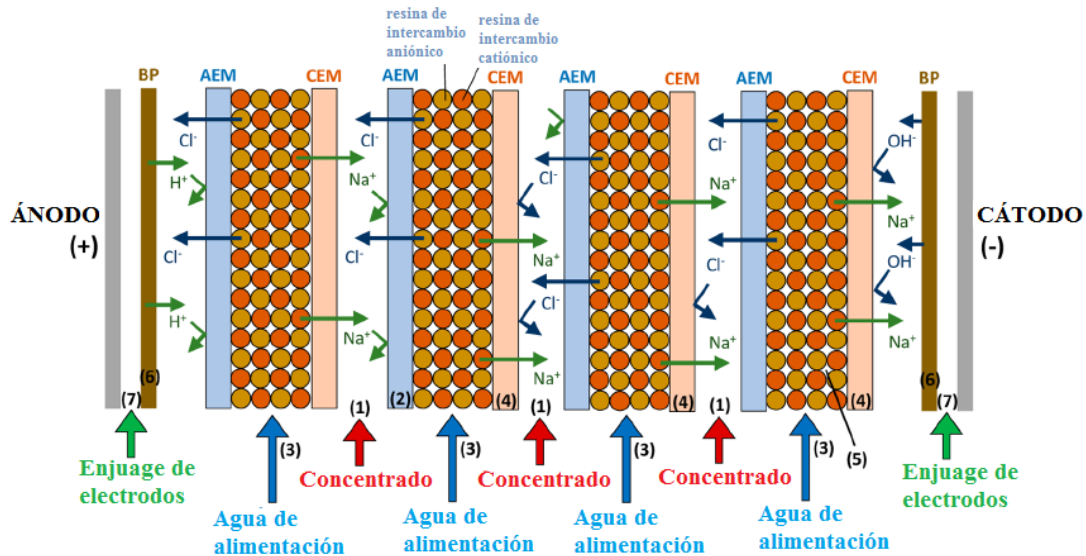


Figura 1.5. Configuración experimental del proceso de electrodeionización (EDI) utilizando obleas de resina (RW-EDI) para la desalinización de agua contaminada con sales: (1) compartimento de concentrado, (2) membrana de intercambio aniónico, (3) compartimento de diluido, (4) membrana de intercambio catiónico, (5) oblea de resina, (6) membrana bipolar y (7) enjuague de electrodos [12].



Figura 1.6. Vista de un módulo (RW-EDI) donde se aprecia la resina de intercambio iónico porosa [12].

Un tipo de celda de EDI con configuración aniónica para la remoción de arsénico de agua se ha reportado en la literatura. Este sistema está constituido por la celda de EDI (módulo IXED), cuatro recipientes de recirculación, en los cuales se toman muestras para determinar concentración de As, pH y conductividad. La celda (Figura 1.7) consta de cinco compartimientos, los cuales están delimitados por dos membranas de intercambio catiónico, dos membranas de intercambio aniónico, un electrodo de Ti/Pt como ánodo y un electrodo de acero inoxidable como cátodo. Los compartimientos de la Figura 1.7 se designan como: EA enjuague ánodo, CA compartimento anódico, SD solución diluida de arsénico, en el cual se empacan 6 g de la resina de intercambio aniónico (Figura 1.8) en forma arseniato/hidroxilo, CC compartimento catódico y EC enjuague cátodo [13,14].

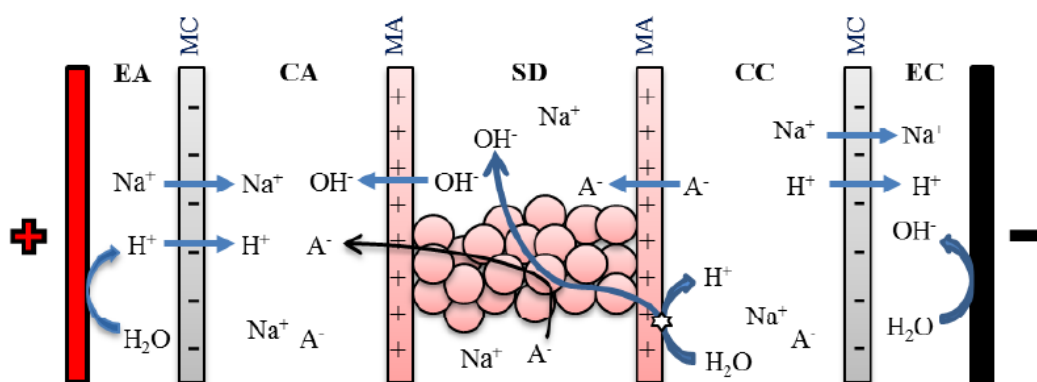


Figura 1.7. Esquema del transporte iónico a través de las membranas de intercambio aniónico (MA) y catiónico (MC). A- representa al ion arseniato [13].



Figura 1.8. Vista de un módulo IXED donde se aprecia la resina aniónica [13].

## 1.3 Aplicaciones para el tratamiento de agua

La EDI se ha utilizado principalmente en la eliminación de iones como  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  y  $\text{NH}_4^+$  para obtener agua de alta pureza en las industrias de energía, microelectrónica, cosmética, electrónica, alimentaria, química, biotecnología, farmacéutica y en laboratorios de investigación, como también se ha empleado para la purificación de compuestos orgánicos y la eliminación de iones presentes en aguas residuales que producen los procesos nucleares. Otro uso potencial de la EDI es en el tratamiento de efluentes de la minería y los procesos de electrodeposición, donde los tratamientos actualmente utilizados incluyen la precipitación que genera lodos contaminados con metales que requieren un adecuado confinamiento. En general la EDI ha mostrado ser un método de purificación y separación muy efectivo y compatible con el medio ambiente por lo que las investigaciones se centran en encontrar mejores parámetros de operación, y en algunos casos a discutir aspectos económicos [7].

Souilah et al. [15] realizó un estudio de tratamiento de efluentes industriales que contenían Zn, Cu, Cd y Pb con el método de intercambio iónico y lo comparó con el de electrodeionización obteniendo mejores resultados con el segundo método. De igual manera, Yeon et al. [16] estudió la eliminación de iones de Fe, Co, Cr y Ag de soluciones sintéticas, logrando un 99% de eliminación con EDI; por otro lado, especies débilmente ionizadas, como  $\text{CO}_2$  y B, son especies que se han podido eliminar de manera continua y en un alto grado con el método de electrodeionización, a diferencia de la ósmosis inversa y la electrodiálisis que con dificultad pueden llevar a cabo la eliminación de estos iones [17].

La EDI ha demostrado ser un método de separación y purificación de especies iónicas, compatible con el medio ambiente que es mejor que otros métodos y es ampliamente aceptada para la producción de agua de alta pureza en la actualidad. La EDI se ha implementado en diferentes tipos de industrias como por ejemplo:

### 1.3.1 Industria Farmacéutica

Es de gran importancia el agua ultrapura en esta industria puesto que está en contacto directo con productos y equipos farmacéuticos ya que se utiliza para procesos de limpieza y enjuague, además de ser una materia prima para los procesos que implementa la industria. Para poder utilizar el agua en los procesos de la industria farmacéutica se deben

cumplir con estándares de calidad regulados por las diferentes farmacopeas; para obtener esa calidad se combinan tecnologías como las ósmosis inversa con la EDI (Figura 1.9). Estos sistemas también pueden producir agua con las especificaciones necesarias para su uso en medicina veterinaria y en la industria cosmética.



Figura 1.9. Producción de agua purificada combinando ósmosis inversa y electrodeionización [9].

### 1.3.2 Industria de la Energía

La producción de energía eléctrica por medio del uso de vapor de alta presión requiere agua de calidad confiable que se obtiene en un proceso combinado de ósmosis inversa con EDI (Figura 1.10). Esta combinación de procesos ha conseguido eliminar la manipulación de productos químicos y corrosivos puesto que no es necesaria la regeneración de resinas, garantizando así una mayor estabilidad de la calidad del agua y una reducción de costos de operación en comparación con los métodos convencionales de purificación.



Figura 1.10. Equipos modulares de electrodeionización (EDI) para producción de agua para calderas de alta presión [9].

### 1.3.3 Industria de Microelectrónica

La fabricación de componentes para este tipo de industria impone requisitos muy estrictos en la calidad del agua por lo que se utilizan métodos combinados de purificación. La primera combinación de los procesos de EDI con ósmosis inversa a nivel industrial se remonta al año de 1990 para la obtención de agua con alta pureza para la producción de semiconductores en la industria microelectrónica [9].

### 1.3.4 Industria Nuclear

En las centrales nucleares se necesita agua de reposición de alta pureza con muy bajo contenido de minerales con el fin de evitar la formación de depósitos y la corrosión en los equipos de generación de vapor y las líneas correspondientes. Es importante mencionar que también las plantas de generación de vapor mediante combustibles fósiles requieren de agua con estrictos niveles de pureza para disminuir las incrustaciones y corrosión, así como los altos costos de mantenimiento. En el proceso de purificación se utiliza floculación, filtración, clarificación y desmineralización. Este último paso es uno de los más importantes para eliminar sales disueltas en el agua. El proceso tradicionalmente utilizado de intercambio iónico para desmineralizar el agua se ha venido reemplazando actualmente por la EDI debido a las grandes ventajas que ofrece. La más efectiva y

continua remoción de minerales de la EDI ayuda a minimizar los riesgos ocasionados por el depósito de minerales en equipos de transferencia de calor que pueden afectar la seguridad del reactor y el rendimiento del proceso [18].

## 1.4 Ventajas y Eficiencia

La electodeionización (EDI) permite la obtención de agua con una alta pureza, además de ser un proceso donde no conlleva la utilización de reactivos químicos para la regeneración de la resina por lo que es una tecnología amigable con el medio ambiente al no usar químicos, adicionalmente las ventajas que ofrece este proceso son:

- Simplificación de las instalaciones, además de no utiliza espacios físicos grandes a comparación de procesos convencionales.
- A diferencia del proceso de Intercambio iónico, la electodeionización puede ser un proceso totalmente continuo.
- Seguridad en la operación por no usar químicos como ácido clorhídrico e hidróxido de sodio.
- Simplificación del sistema de control al necesitar pocas actividades de monitoreo y descarga de efluentes.
- No consume mucha energía eléctrica y reduce costos de operación.
- Su mantenimiento es económico.
- No produce contaminantes.

Este proceso incrementa notablemente la seguridad operacional debido a que elimina la posibilidad de contaminación por químicos y se ha vuelto un proceso muy atractivo para la desalinización y así obtener agua con alta pureza. La tendencia mundial prevista para el futuro cercano en todas estas aplicaciones, es el reemplazo progresivo de otras técnicas de purificación por celdas EDI.

Para la eficiencia en una celda de electodeionización se utiliza la ley de Faraday, la cual es la base para determinar la cantidad de corriente eléctrica necesaria en el proceso para transferir una cantidad específica de sal. La ley denota que al pasar 96486 A de corriente eléctrica en un segundo se transfiere 1 equivalente gramo de sal. La cantidad de 96486 A.s es el valor de la llamada constante de Faraday. En la disolución de cloruro de sodio (NaCl), 1 Faraday transfiere 1 equivalente gramo de iones sodio al cátodo y 1 equivalente gramo de iones cloruro al ánodo [19]. En otras palabras para calcular la eficiencia de corriente, se divide la corriente utilizada para remover los iones entre la corriente total consumida por la celda, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f = \frac{\Delta C \cdot F \cdot V \cdot Z}{Q} \quad (1.1)$$

Dónde:

$f$  =Eficiencia faradaica del proceso

$\Delta C$  = Diferencia de concentración [=] mol/L

$F$  =Constante de Faraday [=] C/mol

$V_s$  =Volumen de la solución [=] L

$Z$  = Número de electrones transferidos

$Q$  = Carga eléctrica [=] C

$$\text{Para } Q = \int I dt \quad (1.2)$$

Dónde:

$Q$  = Carga eléctrica, cantidad de corriente por unidad de tiempo [=] A·s

$t$  = Tiempo de duración del proceso [=] s

$I$  = Corriente aplicada [=] A



# Capítulo 2

## Aguas Salobres

---

### 2.1 Características de aguas Salobres

Uno de los problemas más agudos de los últimos tiempos es la escasez creciente de agua potable. La cantidad de agua dulce existente en la tierra es limitada porque la mayor cantidad es agua salada (97.5%), y del resto el 80% está congelada y solamente el 1 % del total es apta y está disponible para consumo humano. Una fuente de agua que puede ayudar a aliviar la escasez de agua en ciertas regiones es el agua salobre. El término agua salobre se aplica a agua con un contenido de sal disuelta intermedia entre el agua de mar y agua dulce (ver Tabla 2.1); este contenido de sal es suficiente para considerarla no apta para consumo humano. Las principales fuentes de aguas salobres son acuíferos sobreexplotados, especialmente en zonas áridas y semiáridas donde la alta evaporación del agua provoca la concentración de sales en el suelo [20].

Tabla 2.1. Clasificación del agua por su salinidad.

Salinidad del agua			
Agua dulce	Agua salobre	Agua de mar	Salmuera
< 0.05 %	<b>0.05 – 3 %</b>	3 – 5 %	> 5 %
< 0.5 g/L	<b>0.5 – 30 g/L</b>	30 – 50 g/L	> 50 g/L

La desalación de agua salobre puede ser efectuado por diferentes métodos de tratamiento sobre aguas subterráneas con contenidos de sal entre 0.5 y 30 g/L de total de sólidos disueltos. La desalación se puede realizar tanto de recursos hídricos originados en agua de mar (fase salina y salobre) como de agua subterránea con alta salinidad.

En el primer caso se puede tomar el agua directamente del mar o por medio de sondeos situados en las proximidades de la línea de la costa lo que tiene la ventaja de aprovechar la purificación natural que se logra al filtrarse el agua en el terreno.

En el segundo caso, las fuentes de agua están básicamente constituidas por aguas fósiles y congénitas, así como por aguas salobres existentes en los acuíferos. El origen de las aguas salinas almacenadas en los acuíferos es diferente, según el acuífero esté en conexión directa con el mar o que dicha conexión ya no exista en la actualidad. Este último caso puede darse tanto en zonas situadas más al interior del terreno, como en las

zonas costeras. En el caso de recursos hídricos en contacto con el mar, el agua está distribuida en tres zonas de acuerdo a su salinidad (Figura 2.1): zona de agua dulce, zona de agua salobre y zona de agua de mar. Estas tres zonas están determinadas por el estado de equilibrio entre la cota piezométrica de agua dulce y la cota del nivel del mar. La interfaz es dinámica y puede modificarse por condiciones ambientales, así como por variaciones en extracción y recarga.

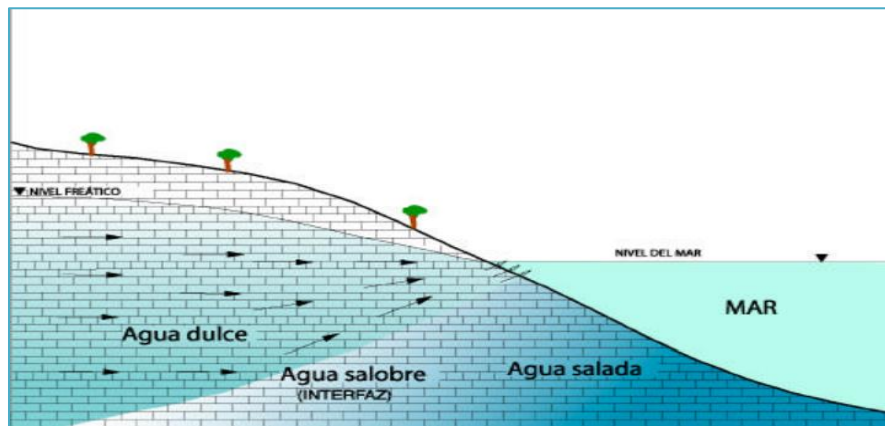


Figura 2.1. Distribución de tipos de agua en acuíferos costeros [21].

El aprovechamiento de agua de estos acuíferos produce cambios en el equilibrio agua dulce-agua salada (Figura 2.2). Si la cota piezométrica está por debajo del nivel del mar, el flujo de agua dulce hacia el mar disminuye y se favorece la entrada de agua salada hacia el acuífero dando lugar a una zona ancha con salinidad variable donde se mezcla agua dulce y salada. Este proceso, puede afectar su penetración a gran parte del acuífero y constituir por tanto el único recurso hídrico (salobre o salado) factible de explotación [21].

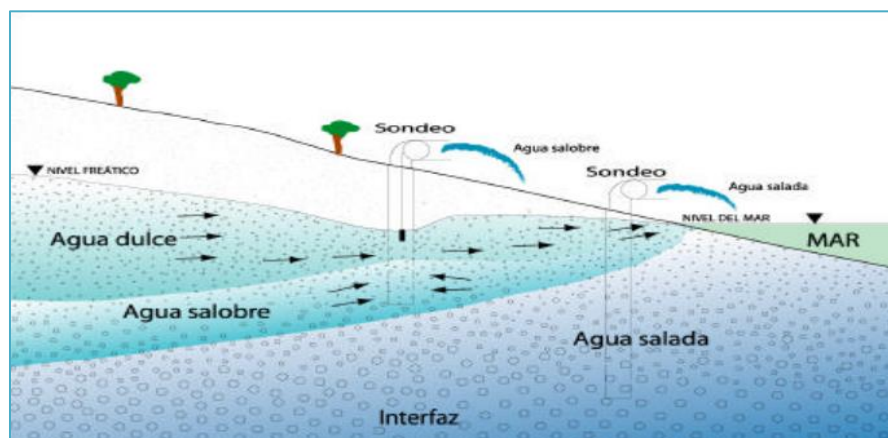


Figura 2.2. Esquema de la explotación de un acuífero costero en contacto directo con el mar mostrando el efecto sobre la interfaz y el espesor de la zona ocupada por el agua de mar [21].

Otro tipo de agua salobre está constituido por acuíferos sin contacto con el mar pero con salinidad elevada (Figuras 2.3 y 2.4). En este caso en nivel de salinidad depende del origen y evolución del acuífero. La explotación de agua de estos acuíferos puede modificar la salinidad.

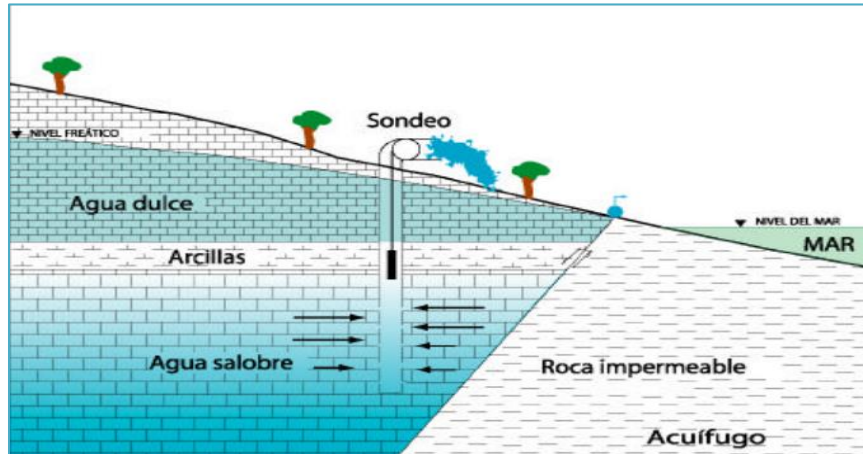


Figura 2.3. Esquema de la explotación de un acuífero no conectado con el mar [21].

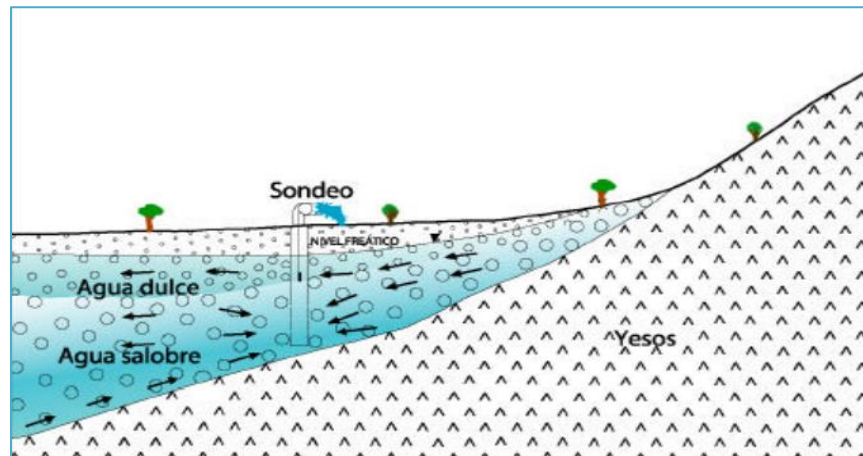


Figura 2.4. Esquema de la explotación de un acuífero interior de agua salobre [21].

Los acuíferos costeros se caracterizan por variaciones de salinidad que dependen de condiciones naturales y antropogénicas, donde la explotación de este recurso produce cambios en la interfaz. La explotación de agua con sondeos situados por debajo de la interfaz agua salobre-agua salada presenta mayores ventajas por su menor impacto ambiental y mayor disponibilidad en comparación con la explotación con sondeos arriba de esta interfaz. En este último caso se debe considerar la mayor penetración de agua de mar y la mayor variación de la composición del agua [21].

## 2.2 Acuíferos salinos en México

En México existe una escasez crónica de agua potable. Las zonas con mayor escasez de agua son partes áridas ubicadas en el norte y noroeste del territorio nacional en donde la precipitación pluvial es más baja que la evaporación. Otro factor que ha contribuido a la escasez de agua es la sobrepoblación. En México existen cuerpos de agua superficial, subterránea y marítima que no se aprovecha por su calidad, para disponer de este recurso es necesario el tratamiento con diversas tecnologías para extraerla y acondicionarla con procesos innovadores y poder incorporarla a los sistemas de suministro de este recurso. Una opción para satisfacer la demanda de agua potable en las regiones que disponen de cuerpos de agua salobre es la desalinización.

La presencia de salinidad en suelo y aguas subterráneas se origina por la evaporación de agua, disolución de minerales y presencia de aguas congénitas con alta salinidad. Los acuíferos con mayor salinidad se localizan en zonas de gran evaporación y con formaciones sedimentarias de origen marino y evaporítico, donde la interacción del agua con el material del suelo produce el incremento en la salinidad del agua. Los acuíferos con agua salobre se localizan principalmente en la Península de Baja California y el altiplano mexicano, donde precisamente se presentan estas condiciones: poca precipitación pluvial, altos índices de radiación solar y por tanto de evaporación, así como la presencia de aguas congénitas y minerales evaporíticos de fácil disolución. También es importante mencionar que en 2016 se había detectado intrusión salina en 18 acuíferos costeros a nivel nacional y 32 se encuentran bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres como se puede ver la Figura 2.5 [22].

Un problema paralelo relacionado con los acuíferos con intrusión marina o agua salobre es el de los acuíferos sobreexplotados. En 1975 existían 32 acuíferos sobreexplotados, cifra que se elevó a 36 en 1981, 102 en 2011, 106 en 2012 [23] y al 31 de diciembre de 2016 se reportaron 105 acuíferos sobreexplotados (16.07% de los 653 registrados en el país) [22]. Las regiones hidrológicas donde se localizan los acuíferos sobreexplotados son: Lerma-Santiago-Pacífico, Cuencas Centrales del Norte, Rio Bravo, Noroeste y Península de Baja California; de estas regiones se obtiene el 58% del agua de origen subterráneo para todo tipo de usos [24] Figura 2.6.

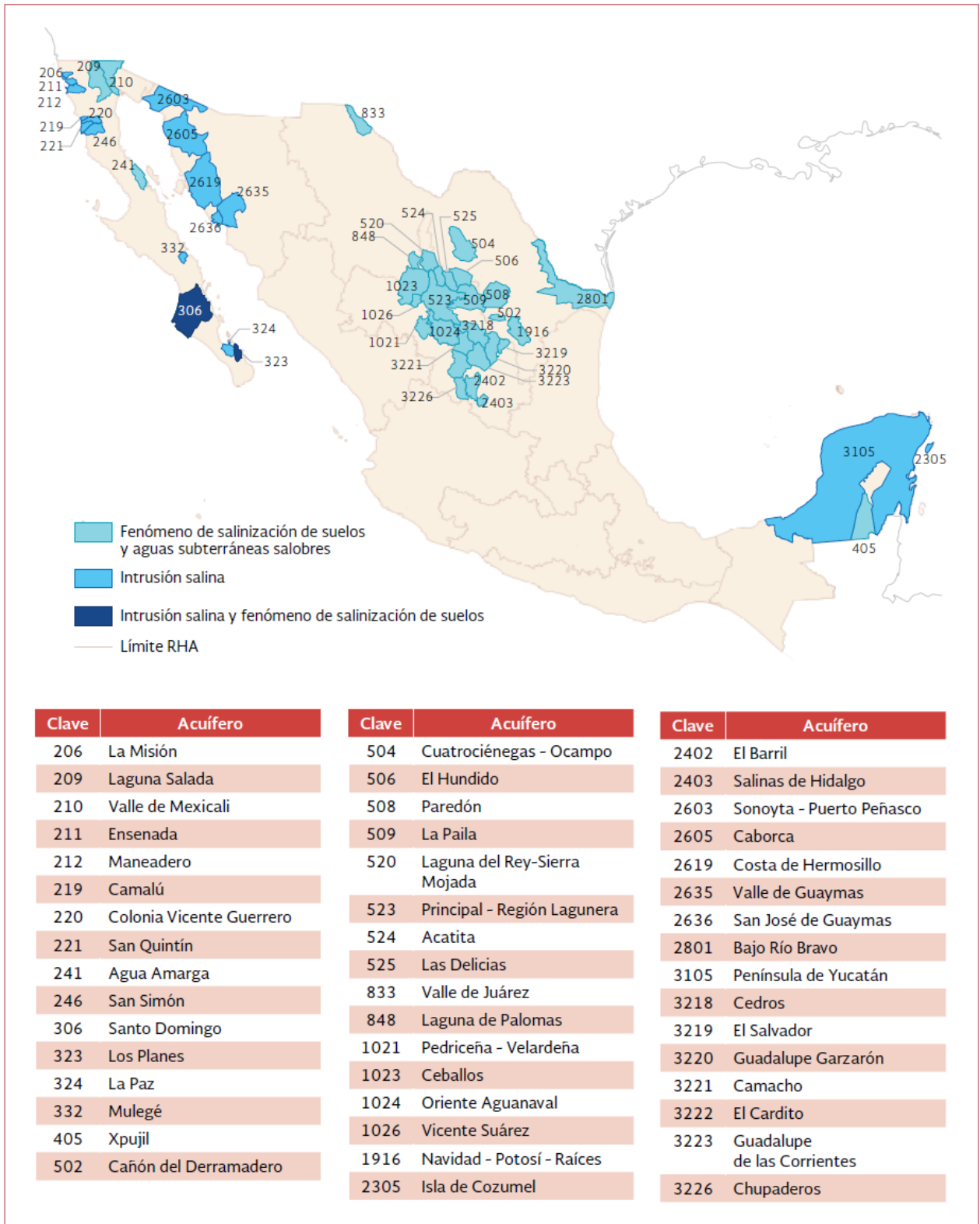


Figura 2.5. Mapa de acuíferos con intrusión salina y aguas subterráneas salobres [22].

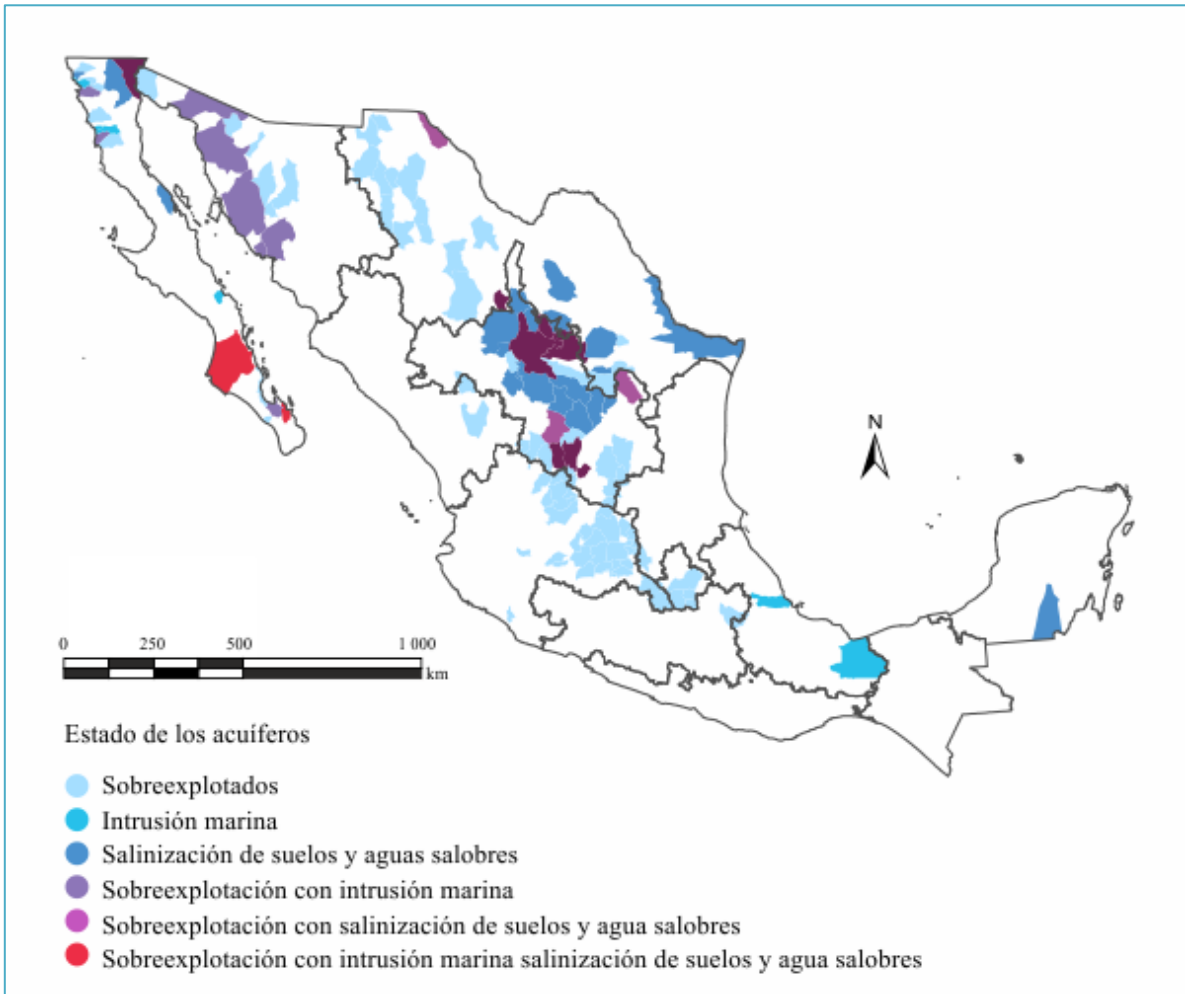


Figura 2.6. Acuíferos sobreexplotados en las regiones hidrológicas [24].

## 2.3 Métodos de tratamiento de desalinización

Existen diferentes métodos de tratamiento para obtener agua potable a partir de agua salobre y éstos se clasifican en procesos que remueven agua de la solución, como la evaporación y la ósmosis inversa, o en procesos que remueven las sales, como la electrodiálisis y el intercambio iónico. Otra forma de clasificar los métodos de tratamiento es con base en el tipo de proceso de separación o la fuente de energía utilizada. Los métodos más utilizados son:

### 2.3.1 Destilación

La destilación es una de las técnicas más usadas para la desalinización del agua de mar y salobre, ya que las primeras plantas de desalinización se desarrollaron con esta técnica. Este proceso necesita de temperaturas altas para llevar a cabo la evaporación del agua y así poder condensar el vapor para la obtención de agua dulce; el agua sobrante del proceso de evaporación es salmuera concentrada (Figura 2.7). Cabe destacar que este proceso es costoso energéticamente por lo que se proponen diferentes arreglos para así aprovechar la liberación de energía y a su vez utilizar el calor del condensado para bajar un poco los costos.

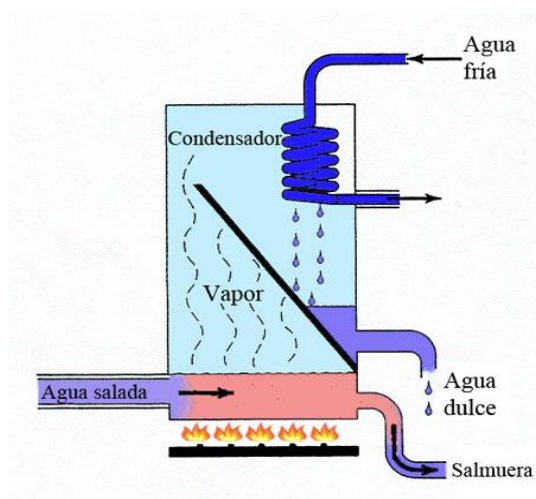


Figura 2.7. Proceso de Destilación de agua salobre.

### 2.3.2 Destilación solar

La destilación solar aprovecha una energía limpia y renovable, puesto que utiliza la energía del sol para evaporar el agua salobre o de mar y así llevar a cabo el proceso de separación, después el vapor se condensa en las cubiertas transparentes de este equipo. El equipo consiste en una caseta de techo transparente o translucido para así poder recibir la luz solar, el techo tiene una inclinación para llevar el condensado al lado inferior del techo donde es recolectado, en la parte inferior del equipo se encuentra un recipiente con el agua salina expuesta a la radiación solar donde se lleva a cabo la evaporación (Figura 2.8). Una desventaja de la destilación solar es que ocupa un área superficial mayor que otras técnicas de desalinización, además de que el proceso es lento y con un rendimiento muy pequeño, sin embargo, no es un equipo costoso puesto que no tiene costo energético ni usa combustible para su producción [20].

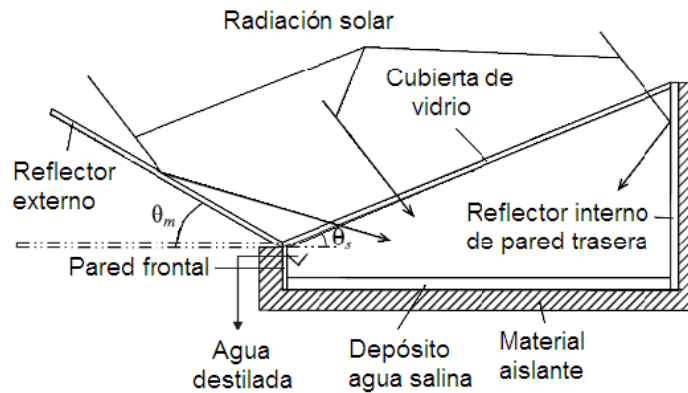


Figura 2.8. Destilación solar [20].

### 2.3.3 Congelamiento

El congelamiento es un proceso térmico donde, a diferencia de la destilación, se retira calor en lugar de añadirlo con el fin de llevar a cabo el crecimiento de cristales de hielo que por el ordenamiento molecular desplaza las sales ya que la sal no es soluble en agua cuando está en estado sólido (Figura 2.9). El requerimiento energético de la congelación es menor que el de un proceso de evaporación, pero tiene la desventaja de ser lento y muy costoso, por lo que no ha tenido un desarrollo exitoso en el tratamiento de agua salobre.

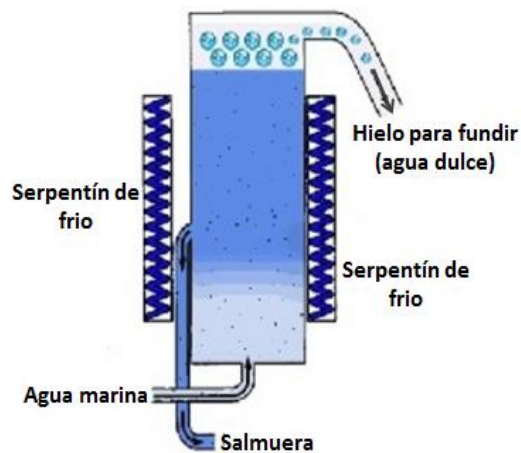


Figura 2.9. Destilador por congelamiento de agua [20].



### 2.3.4 Ósmosis Inversa

La ósmosis es cuando ponemos en contacto dos líquidos de diferentes concentraciones y en medio una membrana semipermeable por lo que el líquido con menor concentración pasa hacia el líquido con mayor concentración. La ósmosis inversa (OI) es un proceso donde por medio de la aplicación de alta presión (mayor que la presión osmótica), fuerza la solución concentrada a pasar a la solución diluida a través de la membrana semipermeable y así filtrar la solución impidiendo el paso de la sal y otras impurezas para obtener una solución diluida del soluto a eliminar (Figura 2.10). Este proceso se usa en la desalinización de agua de mar o salobre y se obtiene una solución concentrada de salmuera y agua potable. Una gran parte de la energía utilizada en la ósmosis inversa se expulsa en la corriente de salida a alta presión; esta energía se puede aprovechar con un dispositivo adecuado.

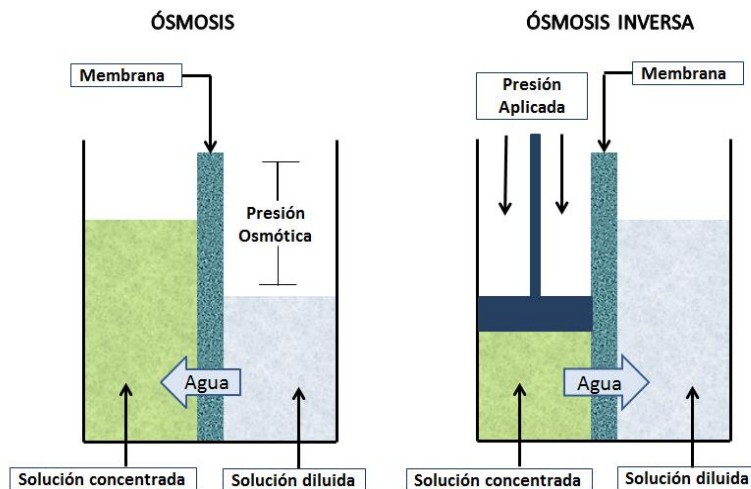


Figura 2.10. Proceso de Ósmosis y Ósmosis Inversa.

### 2.3.5 Electrodiálisis

La electrodiálisis es un proceso de separación donde se utilizan membranas selectivas de intercambio iónico bajo la influencia de un campo eléctrico a diferentes potenciales que fuerza la migración de iones hacia el cátodo y el ánodo, las membranas actúan como barreras para dicha migración lo que permite o delimita el paso de los iones respecto a su carga eléctrica, esto quiere decir que si una membrana es catiónica solo permitirá el paso de iones positivos y viceversa; las membranas de intercambio aniónico y catiónico se alternan entre los electrodos para obtener compartimentos con solución diluida y concentrada (Figura 2.11). En los compartimentos donde se encuentran los electrodos

circula una solución de electrolitos conocida como enjuague. El proceso que se lleva a cabo en las soluciones de enjuague es diferente al proceso donde se encuentra las secciones con membranas. La electrodiálisis se ha utilizado para bajar concentraciones de sales pero es un proceso con alto consumo de energía.

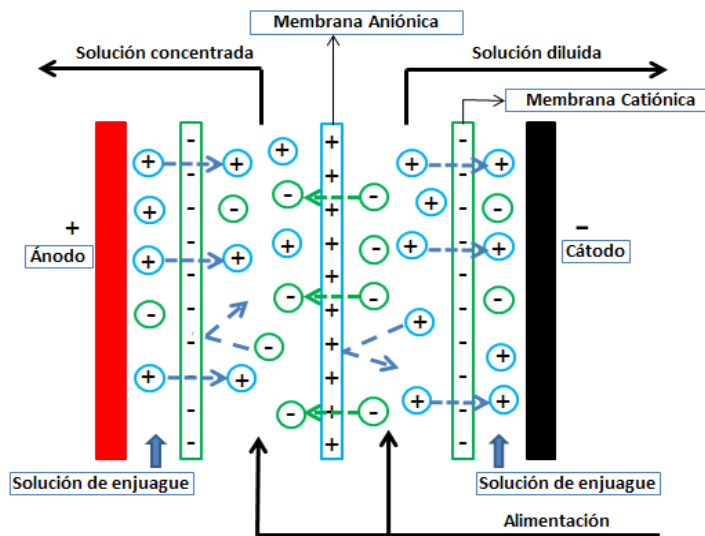


Figura 2.11. Proceso de separación por electrodiálisis.

### 2.3.6 Intercambio Iónico

El intercambio iónico es un proceso donde una solución que contiene especies iónicas pasa a través de una resina de intercambio iónico, ya sea catiónica o aniónica, donde los iones de una cierta carga se intercambian con iones unido a la resina de una carga similar (Figura 2.12). La eficiencia de este proceso depende de la afinidad de la resina de intercambio iónico para un ión en particular, la temperatura, pH y la concentración de la solución que contiene la especie a intercambiar; además, una vez que la resina está saturada se tiene que llevar a cabo un proceso de regeneración con ácidos o bases dependiendo de los iones presentes en la resina. Este proceso es muy usado para la purificación de agua salobre pero la regeneración de la resina da como resultado efluentes tóxicos que causan daños ambientales.

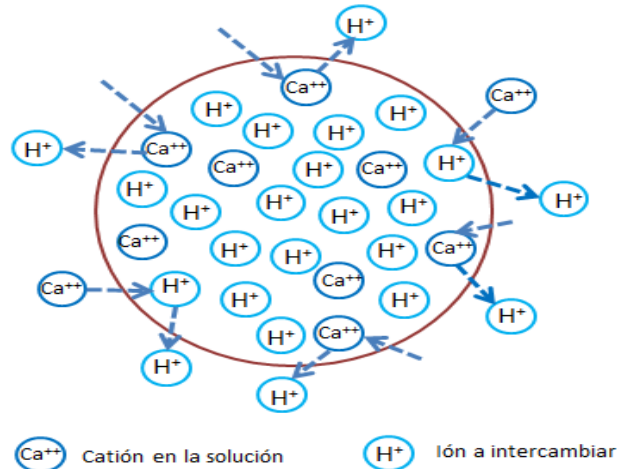


Figura 2.12. Proceso de Intercambio Iónico.

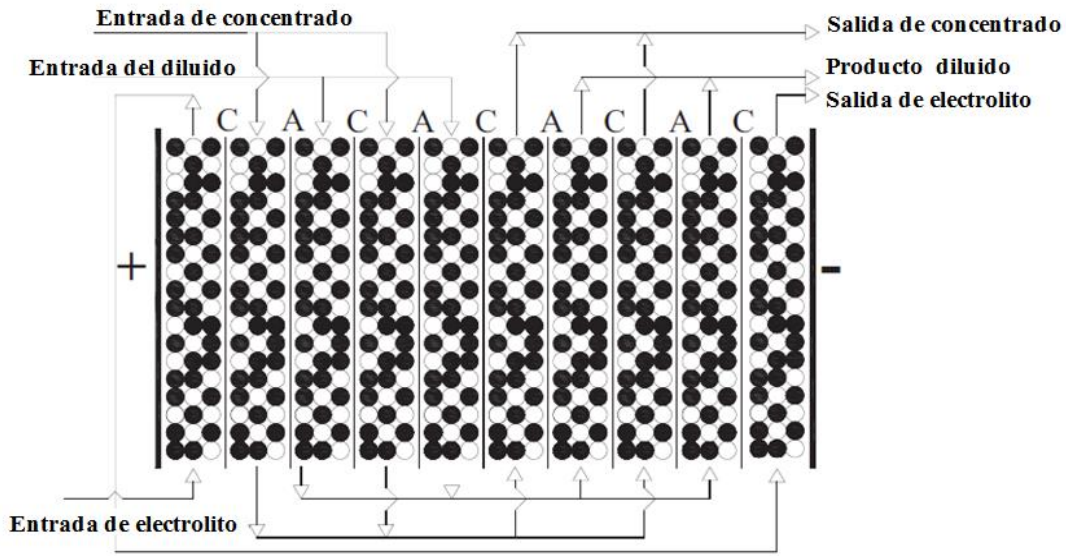
## 2.4 Aplicación de la electroionización en aguas salobres

Las necesidades crecientes de agua potable para usos domésticos, agrícolas e industriales demandan el desarrollo de métodos eficientes y de bajo costo de desalinización de agua. Dos de los métodos más populares son la electrodiálisis (ED) y la ósmosis inversa (OI), pero aun cuando estas técnicas han sido ampliamente aplicadas durante más de 20 años y se cuenta con gran experiencia en su manejo, aun presentan ciertas desventajas. La ED, por ejemplo, no puede alcanzar altas velocidades de desalinización debido a la polarización de concentración; adicionalmente, la disminución de la conductividad durante la desalinización ocasiona altas caídas de potencial eléctrico aumentando, en consecuencia, el costo energético, razones por las cuales la recuperación de agua es relativamente baja, típicamente en el rango de 30-60%. Por otro lado, los costos de inversión y operación de un sistema de OI aún no son suficientemente bajos. En este contexto la electrodeionización (EDI) continua puede ser un proceso técnicamente viable y económicamente factible con múltiples ventajas para desalinizar aguas salobres.

La electrodeionización es una tecnología compacta y amigable con el medio ambiente que ha experimentado un gran desarrollo reciente en aplicaciones de desalinización. La combinación de la electrodiálisis y el intercambio iónico le han dado a la EDI la posibilidad de lograr una desalinización efectiva y profunda sin necesidad de agregar productos químicos, utilizando la fuerza motriz de un campo eléctrico para regenerar la resina. La desalinización continua de agua salobre de forma eficiente con bajos consumos de energía no se puede lograr por electrodiálisis tradicional (ED) ni por intercambio iónico (IX). La EDI

se ha aplicado tradicionalmente en la producción de agua ultrapura y en menor medida en la separación de iones como  $\text{Ni}^{2+}$ . Una variante de la EDI utilizada para prevenir la incrustación excesiva en las membranas y mejorar el desempeño de la celda es mediante la inversión periódica de la polaridad (EDIR), de esta manera se intercambian constantemente las características de pH y concentración entre los compartimentos de soluciones diluidas y concentradas.

Se ha reportado en la literatura el funcionamiento de un sistema EDIR para desalinizar agua salobre que consta de cuatro pares de celdas y dos etapas hidráulicas, como se muestra en la Figura 2.13. La pila de EDIR está completamente llena de resinas de intercambio iónico mixto (catiónica y aniónica). Se usaron membranas heterogéneas comerciales de intercambio catiónico y aniónico con baja permeabilidad al agua y coeficientes de difusión de sal. El ánodo y el cátodo se prepararon usando titanio recubierto con rutenio. Cuando la polaridad de los electrodos se invierte periódicamente en la operación de EDIR, la dirección de movimiento iónico se invierte, el diluido y las corrientes de concentrado se intercambian en consecuencia. Un diagrama esquemático del sistema EDIR se presenta en la Figura 2.14. Esta configuración consiste en una pila EDIR, tres líneas de líquido separadas, una fuente de alimentación, un sistema de medición y componentes auxiliares, tales como bombas, tanques, medidores de flujo y manómetros. La corriente de solución diluida fluye en un solo paso por los compartimentos respectivos mientras la corriente de concentrado se hizo funcionar con recirculación parcial. Una corriente eléctrica de corriente continua ajustable se utilizó para proporcionar un voltaje constante con polaridad que se puede invertir manualmente utilizando el panel de control. El intercambio de las corrientes diluida y concentrada podría ser logrado manipulando las válvulas correspondientes instaladas en la tubería [25].



C- membrana de intercambio catiónico; A- membrana de intercambio aniónico  
 ● resina de intercambio catiónico; ○ resina de intercambio aniónico

Figura 2.13. Configuración de la celda de pila de EDIR [25].

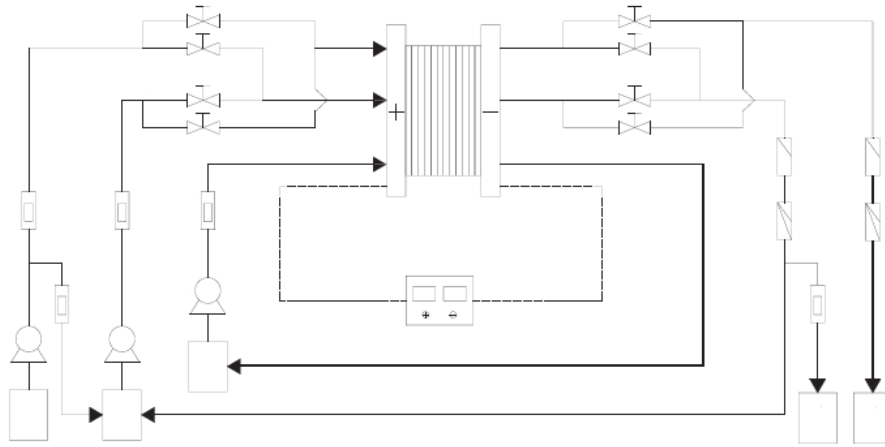


Figura 2.14. Diagrama esquemático de flujo del sistema EDIR [25].

La factibilidad de la aplicación práctica de la EDIR en la desalinización de agua salobre ha sido probada por Xianohan Sun et al. (25) utilizando agua subterránea salobre de la ciudad de Cangzhou de la provincia de Hebei en China. Bajo la aplicación de un potencial eléctrico constante de 12.0 V, se logró una desmineralización de 90.3% con un consumo de energía de 1.58 kWh m<sup>-3</sup>. Los sólidos disueltos totales del producto de agua diluida fue 218 mg L<sup>-1</sup>, producto obtenido a partir de una alimentación con un contenido de sólidos totales de 2250 mg L<sup>-1</sup>. El agua obtenida mediante este proceso EDIR de desalinización cumplió con el estándar para la calidad del agua potable en China. Los resultados demostraron que el

proceso de desalinización EDIR tiene potencial técnico para la producción de agua potable a partir de aguas salobres, lo que convierte a la EDIR en una tecnología viable para resolver el problema de la escasez de agua en ciertas áreas.

Otro estudio para la desalinización del agua salobre con la técnica de electrodeionización fue realizado por Xin-Yu Zheng et al. [26], utilizando un dispositivo de cuatro pares de celdas (Figura 2.15), donde cada celda tenía un compartimento diluido en el cual estaba colocada las obleas de resina porosas y un compartimento de concentrado. Las obleas de resina porosa se fabricaron con una mezcla de perlas de resina de intercambio aniónico y catiónico, llevando la mezcla a altas temperaturas en un molde para así formar la oblea de resina. Los compartimentos de la celda EDI estaban separados por membranas de intercambio iónico, intercambio catiónico y bipolares, las membranas bipolares se utilizaron solamente en los extremos de la celda como se muestra en la Figura 2.15. En este proceso se alimentaba agua salobre sintética (solución de NaCl) en todos los compartimentos excepto en los compartimentos de los electrodos en los que se alimentaba una solución de enjuague (solución de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). La EDI se llevó a cabo a diferentes condiciones y a una temperatura ambiente, obteniendo como resultado una eficiencia de eliminación del 94%. La mejor condición fue a un voltaje de 2.28 V por par de celdas, obteniendo un consumo de energía de 0.66 kW h m<sup>-3</sup>. Comparada con otras tecnologías se considera la EDI una de las más eficientes para la desalinización de aguas salobres.

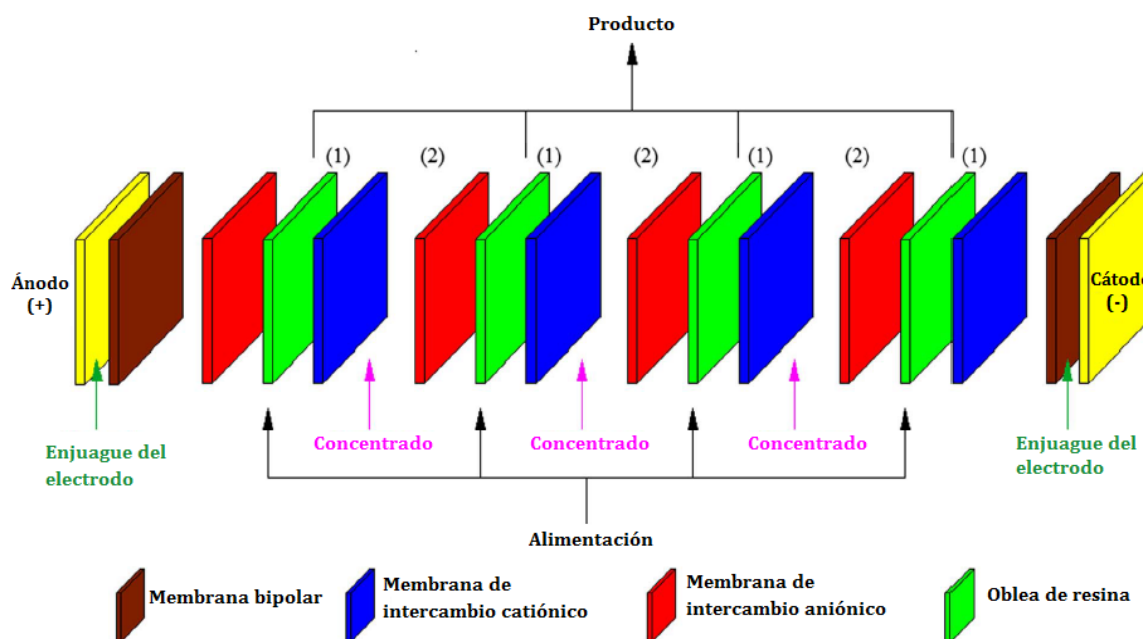


Figura 2.15. Diagrama esquemático del dispositivo de electrodeionización: (1) compartimento diluido con oblea de resina y (2) compartimento de concentrado sin oblea de resina [26].

# Capítulo 3

## Materiales y Métodos

---

### 3.1 Diseño del sistema de Electrodeionización

Para llevar a cabo la investigación experimental se diseñó y construyó el sistema de electrodeionización (EDI). Se consideró una celda tipo filtro prensa que pueda ser configurada con diferentes arreglos entre los compartimentos, membranas y lecho de resina. Adicionalmente, pueda colocarse una o más unidades repetitivas para formar una celda.

#### 3.1.1 Disposición general:

La Figura 3.1 muestra la disposición general de los componentes de la celda de EDI y la Figura 3.2, la celda armada. La lista de partes se describe en la siguiente tabla (3.1):

Tabla 3.1. Descripción de cada parte del diseño de la celda filtro prensa.

No. Parte	Descripción
1	Tapas prensa (2 piezas) de la celda construidas en acero inoxidable 316
2	Tapas de conexiones (2 piezas)
3	Electrodos (2 piezas). Uno de acero inoxidable 316 y otro de titanio con recubrimiento electrocatalítico (platino)
4	Espaciadores (4 piezas)
5	Juntas de teflón (4 tipos de juntas) y juntas de neopreno
6	Membranas. Dos membranas catiónicas y una aniónica
7	Tornillos (6 piezas) de acero inoxidable de cabeza hexagonal con tuerca y rondanas (2) por cada tornillo. Tornillos de 5/16 D, 4.5" o 5"L
8	Niples (4 piezas) 3/8 NPT de PVC (C-40)
9	Accesorios "T" (2 piezas) 3/8 NPT de PVC (C-40)
10	Promotores de turbulencia (3 piezas)

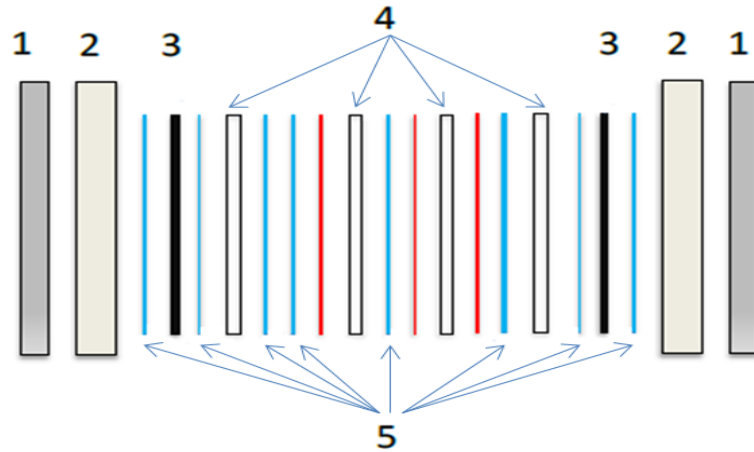


Figura 3.1. Disposición general de los componentes de la celda. 1- Tapas prensa (2 piezas) del reactor construidas en acero inoxidable 316; 2- Tapas de conexiones (2 piezas) de polipropileno; 3- Electrodo (2 piezas: uno de acero inoxidable 316 y otro de titanio con recubrimiento electrocatalítico); 4-Espaciadores (4 piezas); y 5- Juntas de teflón y Neopreno. Las piezas de color rojo representan las membranas

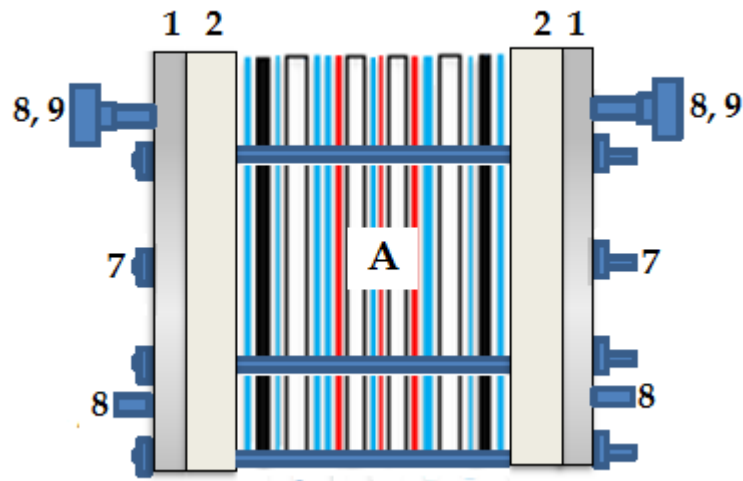


Figura 3.2. Celda de electrodeionización. A- Componentes de la celda (espaciadores, empaques, membranas, electrodos y promotores de turbulencia); 7- Tornillos (6 piezas); Conexiones de entrada y salida [8-Niples de 3/8" NPT cédula 40 de PVC (4 piezas), 9- Accesorio Accesorio "T" de 3/8" NPT cédula 40 de PVC (2 piezas)].



### 3.1.2 Espaciadores (No. de parte: 4)

Las Figuras 3.3 y 3.4 muestran el diseño de los espaciadores de la celda EDI donde se observan dos perforaciones para permitir sólo el paso del líquido al siguiente compartimento. En la Figura 3.5 se observan los detalles geométricos de los distribuidores de entrada y salida de electrolito cuyo diseño sirve para mantener un flujo homogéneo a todo lo ancho del espacio del canal de circulación. Las dimensiones de los espaciadores se muestran en la Figura 3.6. Todos los espaciadores son iguales (4 piezas).

Material: polipropileno

Espesor: 5 mm

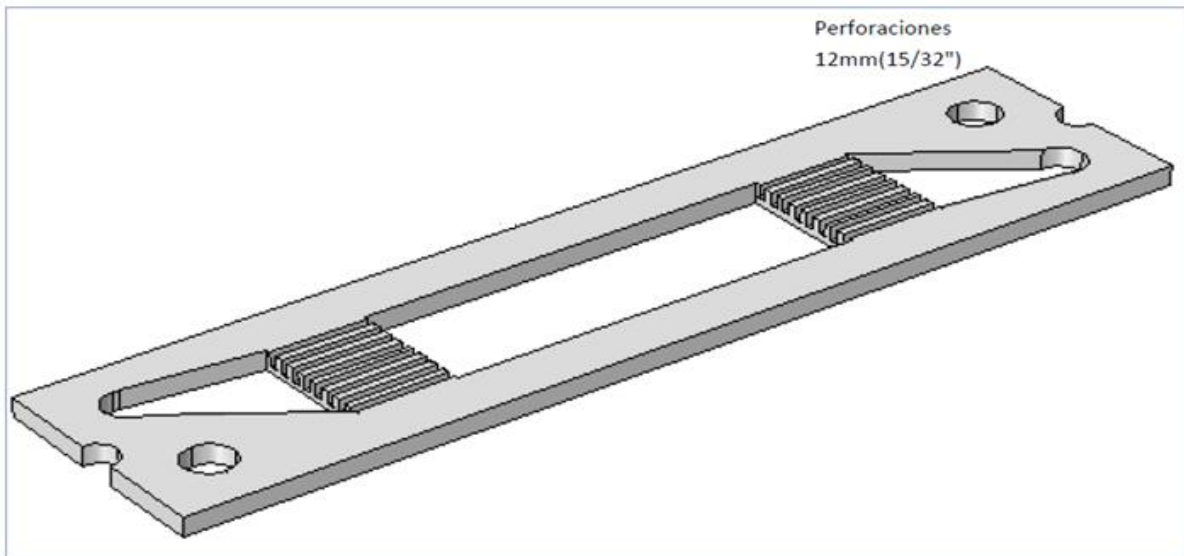


Figura 3.3. Dibujo 3D del espaciador.



Figura 3.4. Espaciador en forma real.

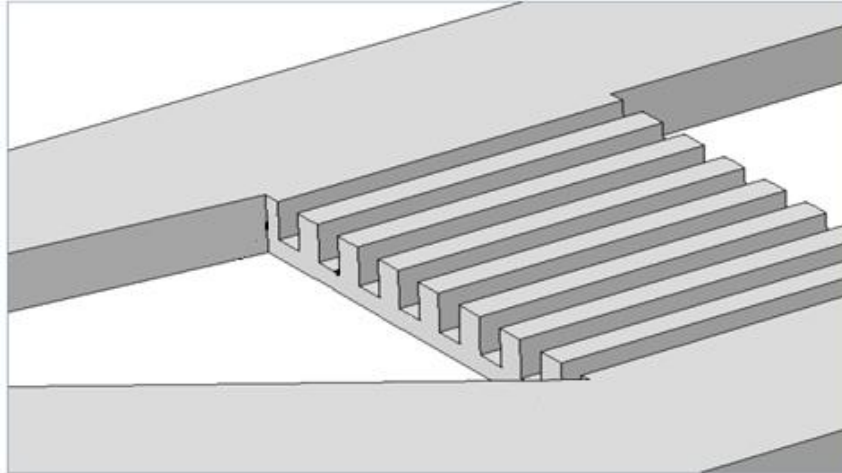


Figura 3.5. Detalle del distribuidor de líquido del espaciador.

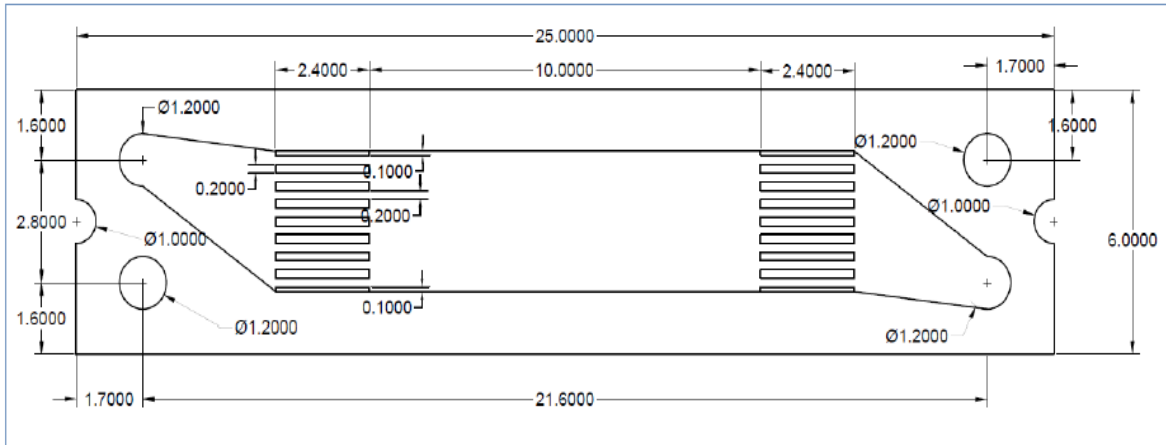


Figura 3.6. Dimensiones del espaciador en cm.

### 3.1.3 Promotores de turbulencia (No. de parte: 10)

Todos los promotores de turbulencia son iguales (3 piezas)

En las Figura 3.7 se muestra el diseño del promotor de turbulencia para los espaciadores de la celda EDI. En la Figura 3.8 se muestra el promotor de turbulencia ya colocado en el espaciador de dicha celda.

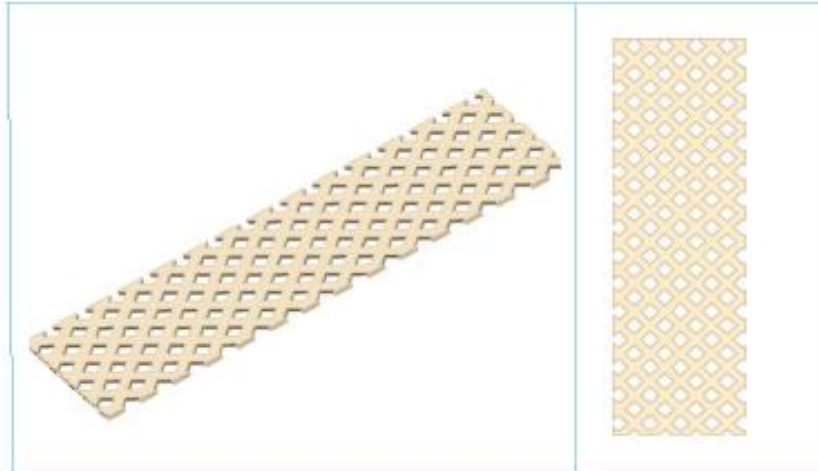


Figura 3.7. Promotor de turbulencia.

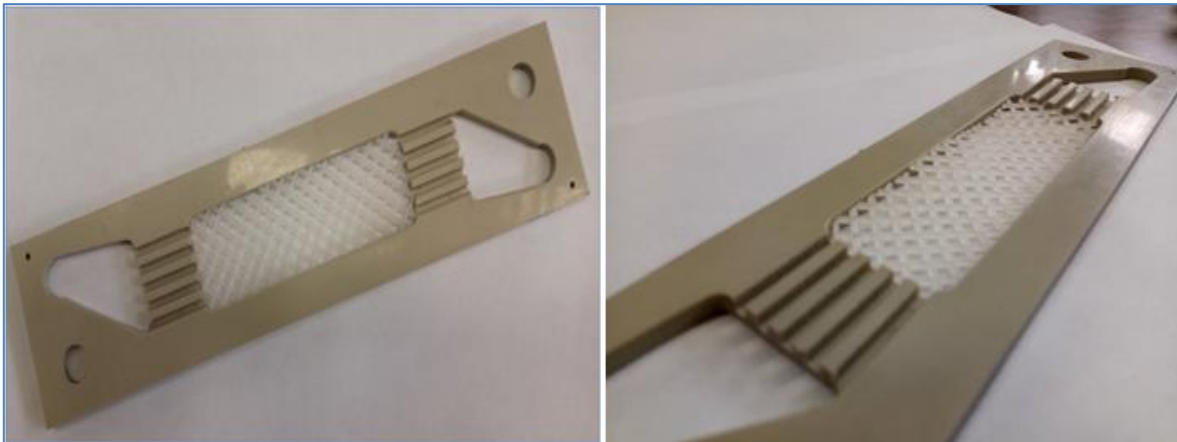


Figura 3. 8. Promotores de turbulencia colocados en los espaciadores.

### 3.1.4 Diseño de juntas (No. de parte: 5)

El diseño de las juntas tiene por objeto, además de sellar las uniones, dirigir el fluido. De esta manera se tienen juntas con cuatro perforaciones para permitir el paso del líquido hacia el interior del compartimento siguiente (entrada y salida) y para permitir el paso del líquido (entrada y salida) a través de los espaciadores hacia compartimentos posteriores, Figura 3.9. Se tiene también juntas sin perforaciones para impedir el paso del líquido, Figura 3.10.

El corte rectangular en el centro de estas juntas es para el paso de iones de un compartimento a otro a través de las membranas. Finalmente, las juntas para sellar los separadores y poder dirigir el flujo a través de dos perforaciones por los conductos necesarios de acuerdo a la configuración de la celda, Figura 3.11. Al igual que tenemos

una junta sin corte rectangular que se coloca antes de los electrodos con la finalidad de sellar dichos electrodos, figura 3.12.

Juntas de teflón delgado (1 mm o menos).

- Juntas tipo 2 (1 piezas) sin perforaciones o barrenos
- Juntas tipo 3 (2 piezas) con 2 perforaciones o barrenos 1.2 cm  $\Phi$  (15/32")

Juntas de neopreno.

- Juntas tipo 1 (3 piezas) con 4 perforaciones o barrenos 1.2 cm  $\Phi$  (15/32")
- Juntas tipo 4 (2 piezas) con 4 perforaciones o barrenos 1.2 cm  $\Phi$  (15/32")

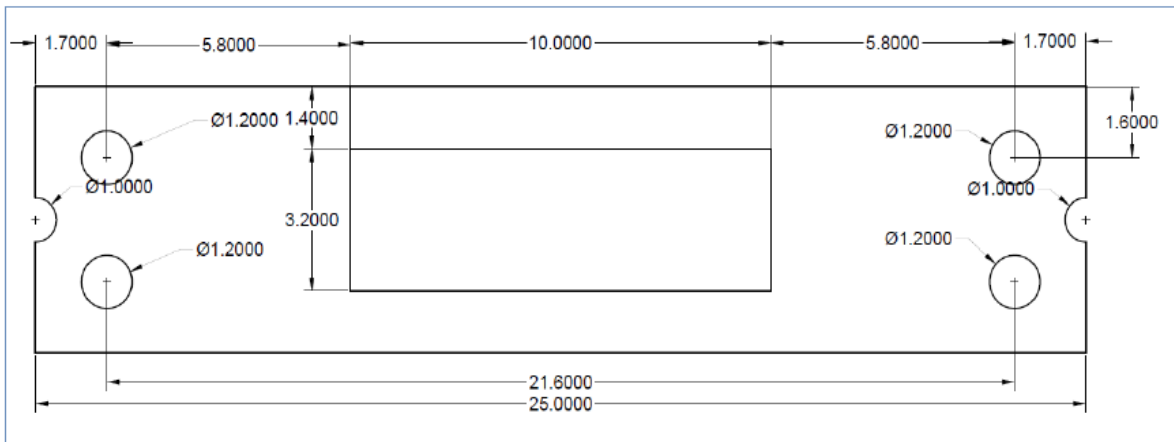


Figura 3.9. Junta tipo 1.

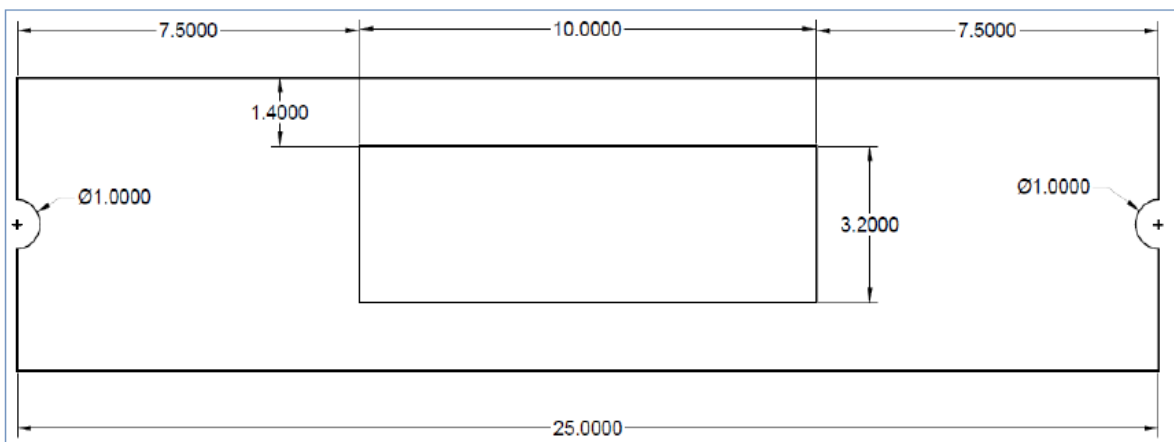


Figura 3.10. Junta tipo 2.

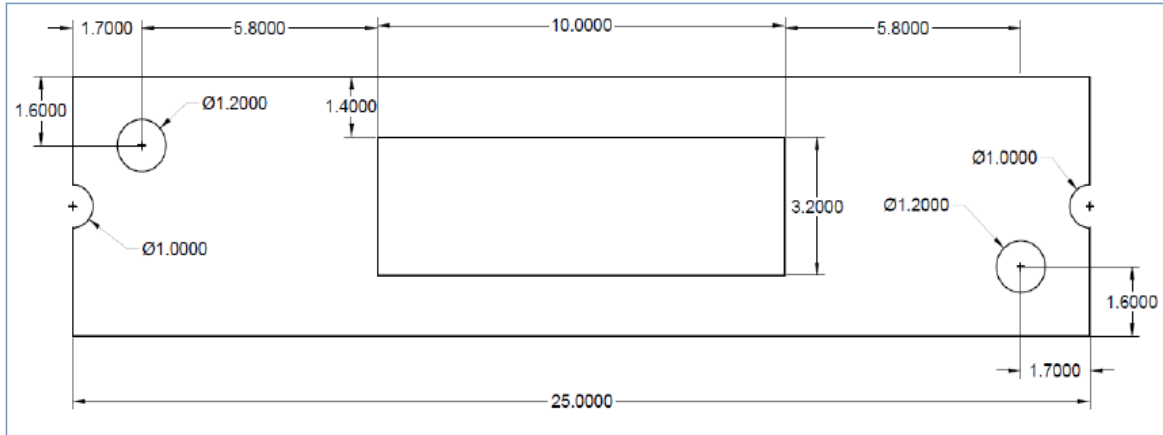


Figura 3.11. Junta tipo 3.

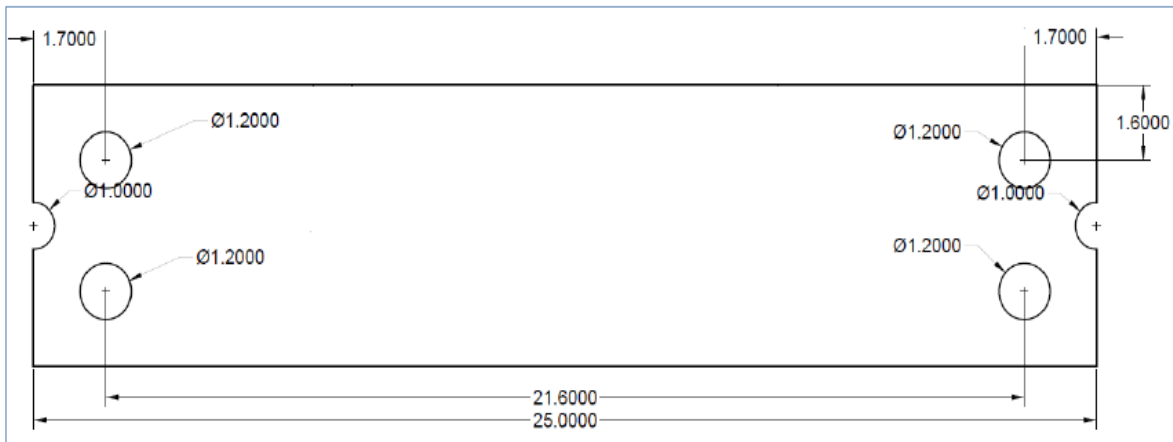


Figura 3.12. Junta tipo 4.

### 3.1.5 Electrodo (No. de parte: 3)

Los electrodos son los componentes que permiten llevar a cabo las reacciones electroquímicas en la celda, de reducción en el cátodo y oxidación en el ánodo. Estas dos piezas (Figura 3.13), una de acero inoxidable 316 y otra de titanio con recubrimiento electrocatalítico (platino), cada una con 4 barrenos de 24 mm  $\Phi$  (15/16") se instala con anillo de plástico 24 mm OD (15/16") y 12 mm ID (15/32").

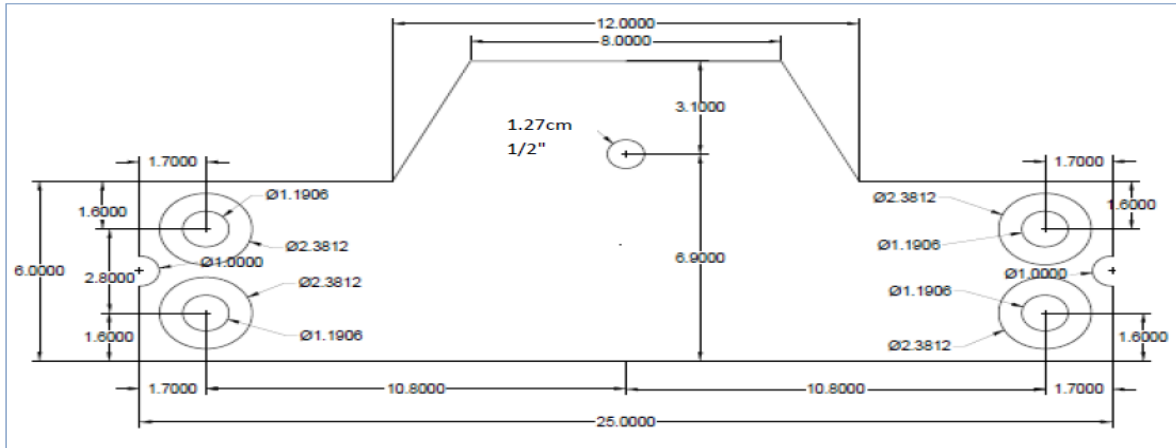


Figura 3.13. Dimensiones electrodos.

### 3.1.6 Tapas prensa de acero inoxidable (No. de parte: 1)

Estas tapas metálicas tienen la función de presionar todos los componentes de la celda y lograr un sello entre los espaciadores, membranas y electrodos.

La Figura 3.14 muestra el diseño y dimensiones de las tapas prensa de acero inoxidable (2 piezas), con 4 barrenos 3/4" y 8 barrenos de 11/32". Espesor de la placa 1.11 cm (7/16"). En la Figura 3.15 se puede apreciar una vista 3D de las tapas.

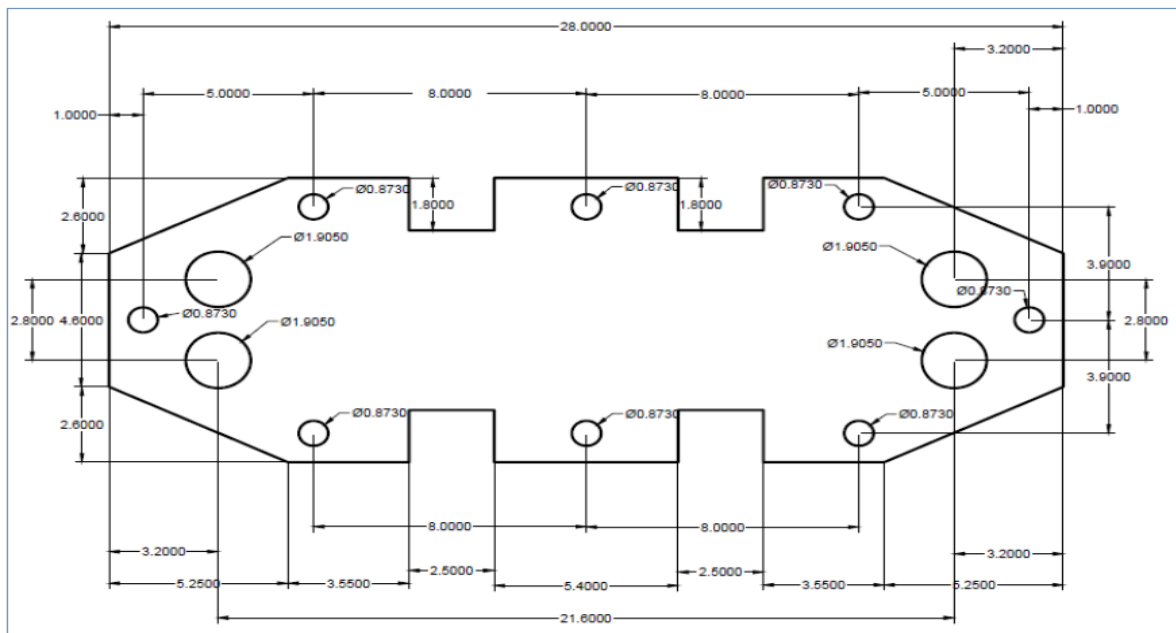


Figura 3.14. Tapas prensa de placas de acero inoxidable.

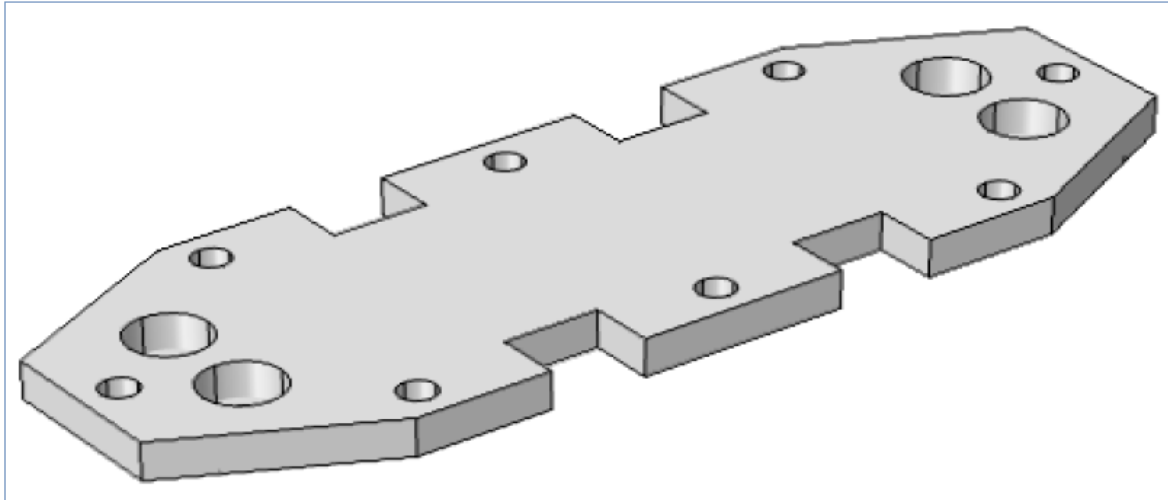


Figura 3.15. Dibujo 3D de Tapa prensa de placa de acero inoxidable.

### 3.1.7 Tapas de conexiones (No. de parte: 2)

Estas tapas tienen la función de separar los electrodos y electrolitos de las partes metálicas de la celda (tapas prensa) y proveer las conexiones roscadas para las líneas de entrada y salida.

La Figura 3.16 muestra el diseño de las tapas de conexiones de material plástico (polipropileno) y la Figura 3.17 muestra dibujo 3D de dichas tapas. (2 piezas) con 4 entradas hembra de 3/8" NPT y 8 barrenos 11/32".

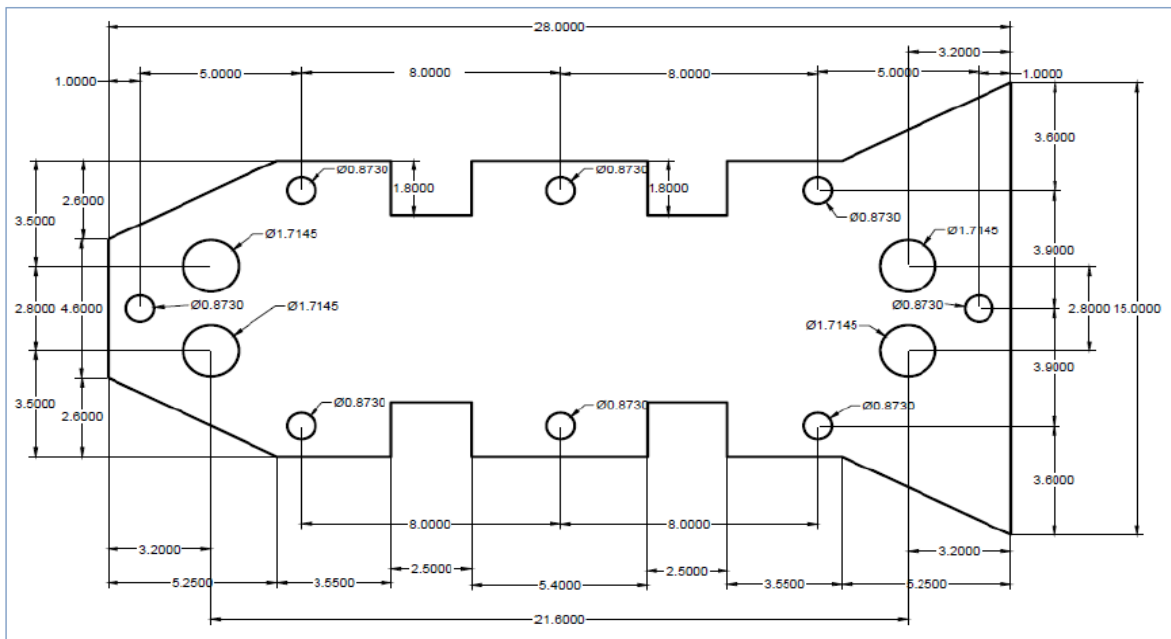


Figura 3.16. Dimensiones tapa de conexiones de material plástico (polipropileno).

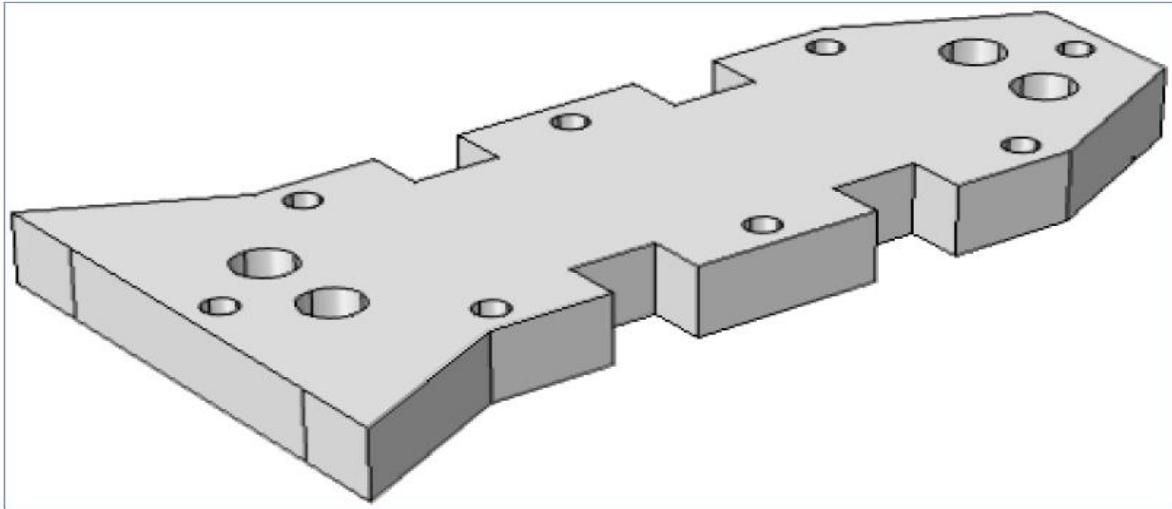


Figura 3.17. Dibujo 3D de Tapa de conexiones de material plástico (polipropileno).

### 3.1.8 Disposición general del sistema de electrodeionización

La celda de electrodeionización (EDI) se conecta a un sistema de recirculación de compartimentos necesarios para la experimentación. La Figura 3.18 muestra la disposición general del sistema de Electrodeionización que puede ser configurada con respecto a los diferentes arreglos, montado sobre mesa-banco de trabajo. La lista de partes se describe en la siguiente tabla (3.2):

Tabla 3.2. Descripción del sistema de electrodeionización.

No. Parte	Descripción
B1	Mesa-banco
B2	Reactor (celda) de Electrodeionización (diseñada en sección 3.1)
B3	Reservorios de líquido (4 piezas)
B4	Rotámetros con válvula de control flujo (4 piezas)
B5	Bombas (4 piezas)
B6	Válvulas (control flujo) (8 piezas)
B7	Válvulas de cierre rápido (12 piezas)
B8	Sensores de pH (2 piezas)
B9	Sensores de conductividad (2 piezas)



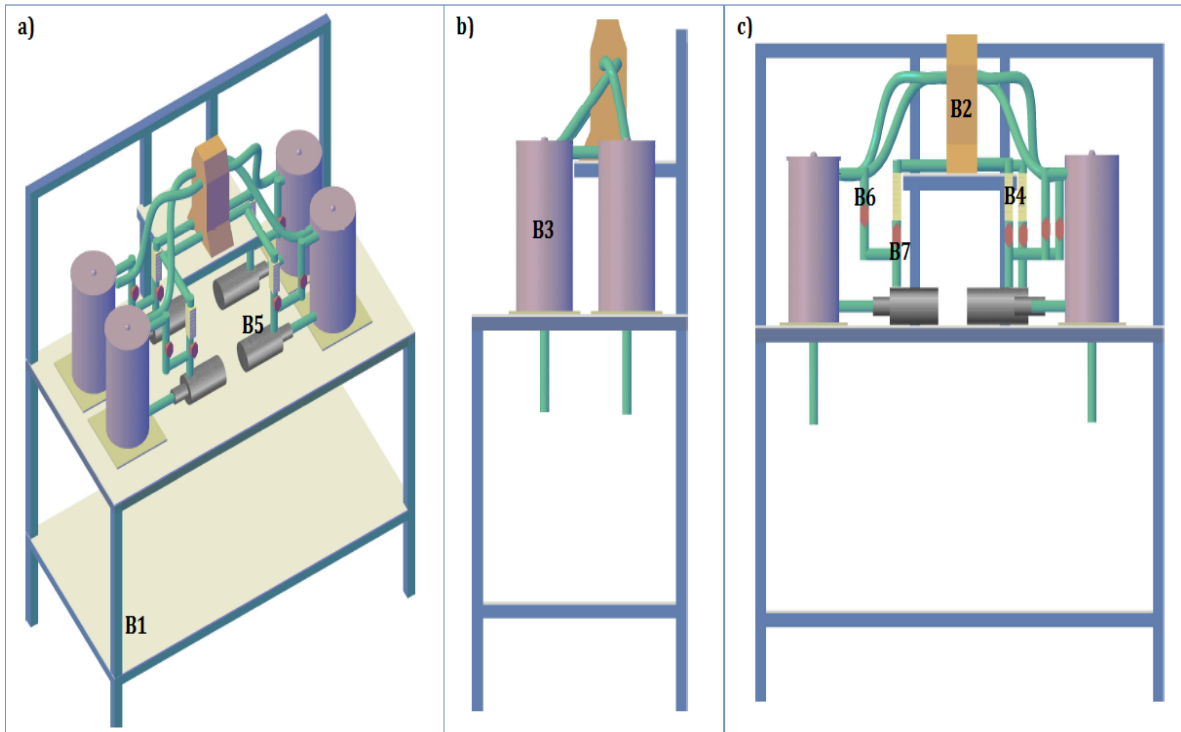


Figura 3.18. Disposición general de Sistema de Electrodeionización en diferentes vistas:  
 a) Vista isométrica a 45°, b) Lateral y c) Frontal.

### 3.1.9 Diagrama de flujo del sistema de electrodeionización

El diagrama de flujo del sistema de electrodeionización en modo de recirculación se muestra en la Figura 3.19. Se puede observar que el líquido de cada recipiente se bombea hacia una de las conexiones del reactor y regresa al tanque. En cada circuito se instala un rotámetro con su válvula, una línea de recirculación al recipiente y una conexión para drenar los recipientes. Adicionalmente se colocarán sensores (pH y de conductividad).

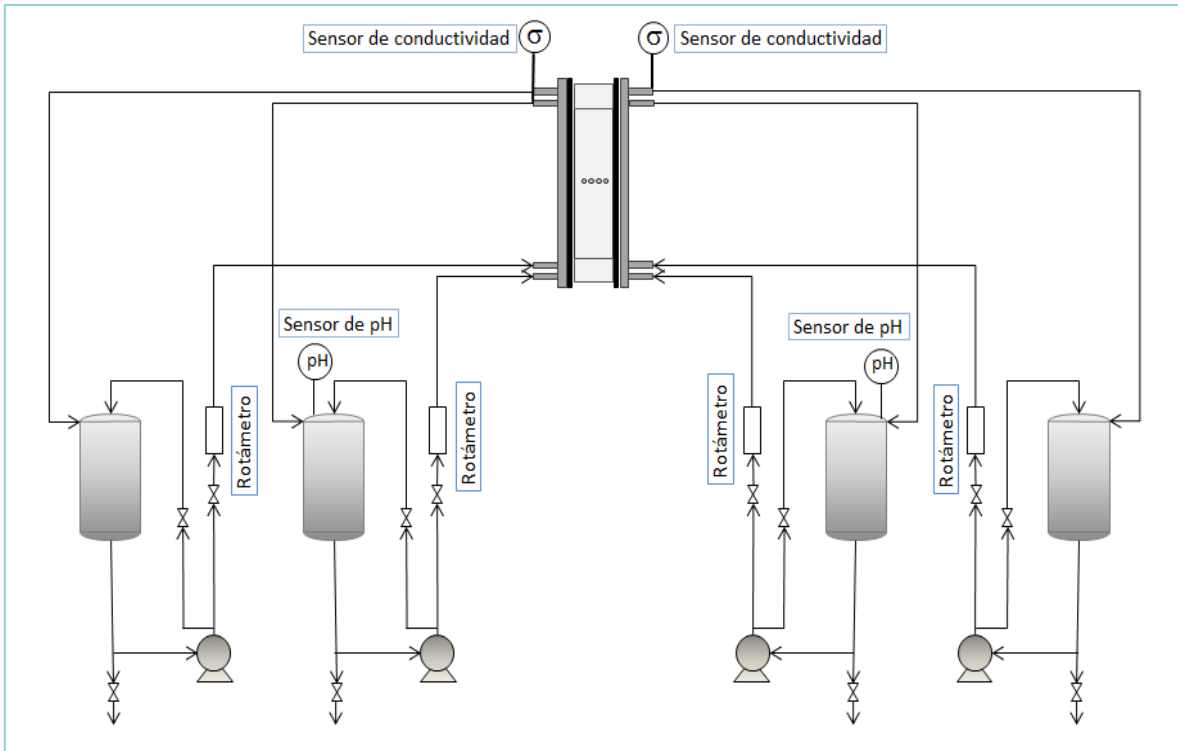


Figura 3.19. Diagrama de flujo de sistema de electrodeionización.

### 3.1.10 Recipientes de recirculación (No. de parte B3)

Cuatro recipientes de acrílico con capacidad de 4 L con tapa macho

### 3.1.11 Rotámetros (No. de parte B4)

Cuatro rotámetros de plástico marca OMEGA con capacidad de 0 a 20 GPH

### 3.1.12 Bombas (No. de parte B5)

Cuatro bombas centrífugas de la marca Little Giant Pump type U21 de 1/6 HP

## 3.2 Descripción de la celda de Electrodeionización

Para llevar a cabo la investigación experimental se utilizó el sistema que está constituido por la celda de electrodeionización (EDI) ya antes mencionada (ver Figura 3.19), utilizando para este caso en particular solo tres recipientes de recirculación, tres bombas centrífugas, una fuente de poder BK PRECISION, un multímetro Agilent 34401 A y dos medidores de pH/conductivity/TDS OAKTON que se explican en las siguientes figuras (Figuras 3.20 a 3.22). La celda consta de cuatro compartimientos, los cuales están delimitados por dos membranas de intercambio catiónico Nafion 117, una membranas de intercambio aniónico SELEMION AMV, un electrodo de Ti/Pt como ánodo y un electrodo de acero inoxidable como cátodo.

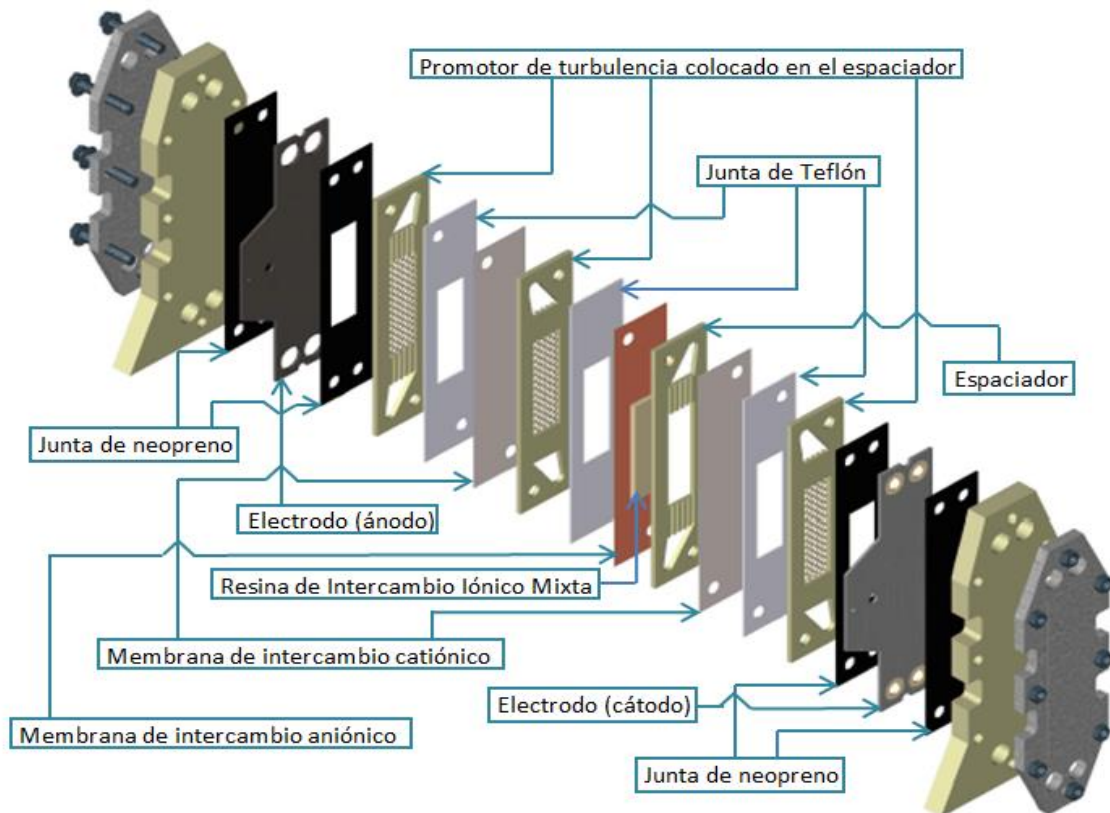


Figura 3.20. Arreglo del sistema de electrodeionización utilizado para la remoción de NaCl.

En la Figura 3.20 se muestran las partes que conforman la celda de electrodeionización del tipo filtro prensa. A la izquierda se tiene el ánodo de titanio platinado (Ti/Pt) entre dos juntas de neopreno, después el arreglo alternado de espaciadores de polipropileno con su respectivo promotor de turbulencia; en uno de los espaciadores se coloca el lecho de resina de intercambio iónico mixto (catiónico y aniónico). Los canales de cada espaciador

forman los compartimentos por los cuales fluyen las soluciones y entre cada espaciador se colocan juntas de teflón con su respectiva membrana; a la derecha de la celda se instala el cátodo de acero inoxidable entre juntas de neopreno.

### 3.3 Distribución de Tiempos de Residencia

Se realizaron 12 experimentos a flujos de 12 GPH, 8 GPH y 4 GPH en compartimentos con y sin promotores de turbulencia y también con y sin resina, en cada experimento se cargaron 3 L de agua destilada en el recipiente de alimentación, posteriormente se hizo circular el líquido a través del compartimiento seleccionado y se inyectaron 5 mL de una solución 0.6 M NaCl en el tanque de recirculación, rápidamente se homogenizó mediante un mezclador mecánico a 300 rpm. Durante 3 minutos se midió la conductividad a la salida de la celda EDI para obtener la señal de respuesta, de tal manera que el experimento se aproximara a una señal tipo escalón.

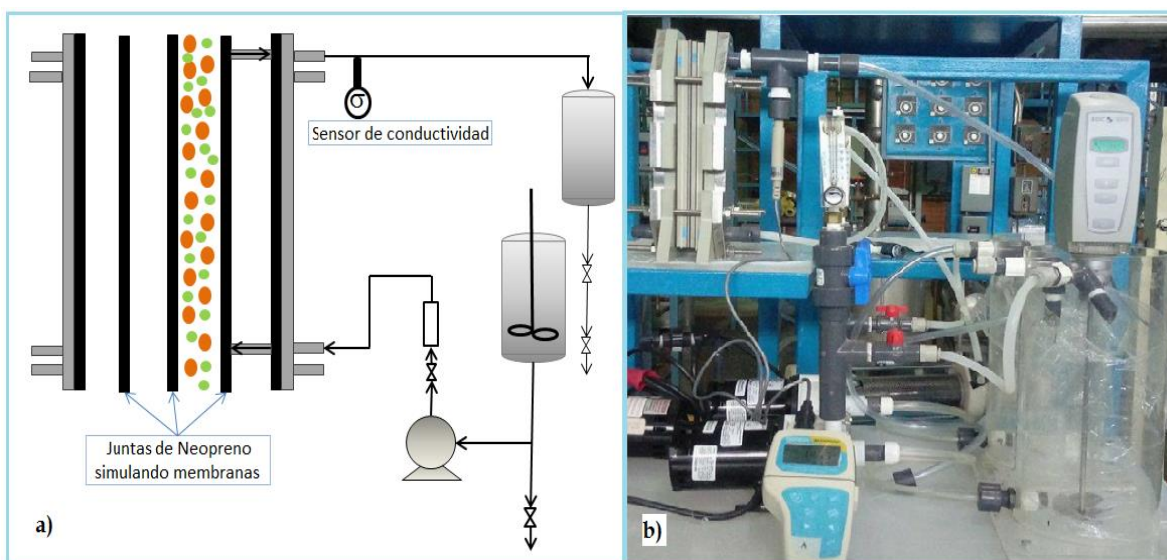


Figura 3.21. Sistema utilizado para la experimentación de Distribución de Tiempos de Residencia. a) Esquema del sistema, b) Sistema físico.

En la Figura 3.21 podemos observar la manera de adaptar el sistema de electrodeionización para determinar la DTR y la forma en que se tomaron las mediciones en la parte de la salida de un compartimiento donde se encuentra un accesorio "T" 3/8 NPT de PVC donde se coloca el electrodo de conductividad ( $\sigma$ ).

### 3.4 Experimentos de Electrodeionización

Se realizaron cuatro experimentos utilizando un flujo de 8 GPH y 4 GPH a potenciales de celda de 7 V y 14 V a corriente directa para cada flujo. En cada experimento se aplicó el potencial eléctrico durante tres horas y se tomaron mediciones de densidad de corriente con un multímetro Agilent de alta impedancia registrando los datos directamente del instrumento y mediante el software de adquisición de datos instalado en una computadora. Para los experimentos se prepararon soluciones 1 M  $\text{NaNO}_3$  como solución de enjuague y 0.01 M  $\text{NaCl}$  como solución salina, simulando las aguas salobres. Estas soluciones se alimentaron a los compartimientos correspondientes en el circuito de recirculación. En los experimentos se midió la conductividad a la salida de cada compartimiento cada 5 minutos, además se tomaron datos de temperatura y pH localmente en los recipientes cada 15 minutos. El volumen de solución en cada recipiente fue de 1500 mL de solución.

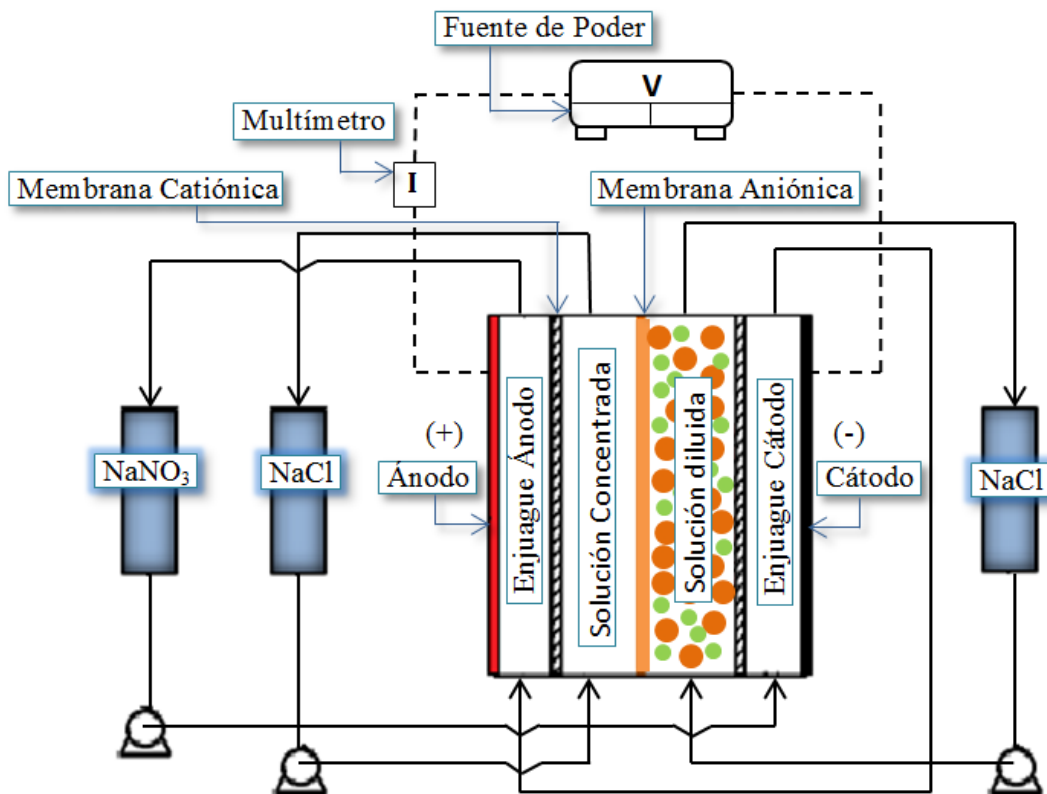


Figura 3.22. Dibujo esquemático del sistema utilizado para la experimentación de electrodeionización.

En la Figura 3.22 se muestra el arreglo utilizado de la celda EDI, donde se observa el acomodo de los espaciadores y membranas. Se puede ver que hay dos membranas catiónicas, una aniónica y un lecho de resina en el compartimento de solución diluida. El lecho se conformó de una mezcla de resina de intercambio catiónico y aniónico (resina mixta). En la Figura 3.22 también se muestra cómo se desplazan los flujos de la soluciones a través de la celda de electrodeionización; cabe destacar que en este arreglo se modificaron las conexiones con respecto a las conexiones mostradas en la Figura 3.19, para disminuir el volumen de solución de enjuague. En la Figura 3.23 se muestra una imagen del sistema físico completo.



Figura 3.23. Sistema físico utilizado para la experimentación de electrodeionización.

# Capítulo 4

## Resultados y Discusión

---

### 4.1 Distribución de Tiempos de Residencia

El comportamiento de los reactores reales no se ajusta exactamente al de un reactor ideal, porque siempre existen desviaciones que pueden provocar disminuciones en la eficacia del proceso. Las desviaciones a los patrones ideales de flujo son causadas por la canalización, recirculación del fluido y por la creación de zonas estancadas o muertas en el reactor. Existen varios métodos para tomar en cuenta estas no idealidades del patrón de flujo en el comportamiento del reactor. Uno de estos es la distribución de tiempos de residencia (DTR) del material que circula a través del recipiente (reactor).

La DTR que presenta un reactor dado proporciona señales distintivas, en cuanto al tipo de mezclado que ocurre en su interior, y es una de las caracterizaciones más informativas del reactor. Los elementos del fluido que siguen caminos diferentes a lo largo del reactor, les toma un tiempo diferente para pasar a través de él. La distribución de estos tiempos en la corriente de fluido que sale del recipiente se denomina distribución de la edad de salida,  $E$  o distribución de tiempos de residencia (DTR) del fluido.  $E$  tiene unidades de tiempo<sup>-1</sup>. Es conveniente representar la DTR de tal manera que el área bajo la curva sea la unidad [27], o sea:

$$\int_0^{\infty} E dt = 1$$

Este procedimiento se le denomina normalización de la distribución tal como lo muestra la siguiente Figura 4.1:

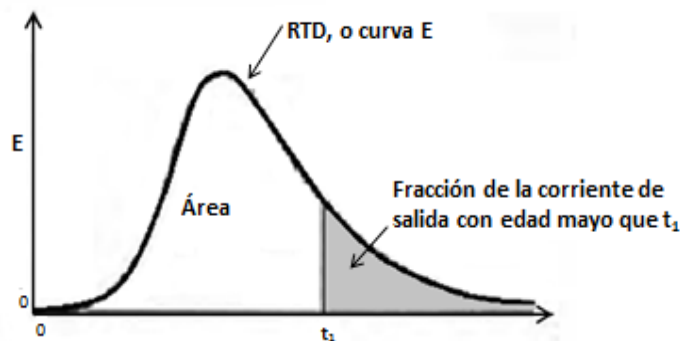


Figura 4.1. Normalización de DTR [27].

La restricción de la edad de salida es que el fluido, solo entra y sale una vez. Esto significa que no debe haber flujo o difusión o remolinos en la dirección contraria al flujo en la entrada o a la salida del reactor.

En la Figura 4.2 se muestran los resultados experimentales de cambios de concentración normalizada de trazador a la salida del compartimento con resina de intercambio iónico con respecto al tiempo transcurrido a tres diferentes flujos (12, 8 y 4 GPH) cuando se utiliza una señal de entrada tipo escalón. En todos los resultados se supuso una relación proporcional de la conductividad y la concentración considerando que la variación de la conductividad molar es menor al 5% en el intervalo de concentración utilizado. En la Figura 4.2 se observa, como es de esperarse, un desplazamiento de las curvas de concentración hacia tiempos mayores cuando el flujo es menor, asimismo, un incremento más suave de la función de distribución acumulativa [27], lo cual se explica por la mayor retención de líquido en los intersticios del lecho de resina al disminuir el flujo. Es importante mencionar que en el experimento se utilizó agua deionizada (conductividad  $1 \times 10^{-6} \text{ S cm}^{-1}$ ) y resina de intercambio catiónico previamente saturada con iones  $\text{Na}^+$ , para evitar el intercambio iónico entre el trazador y la resina.

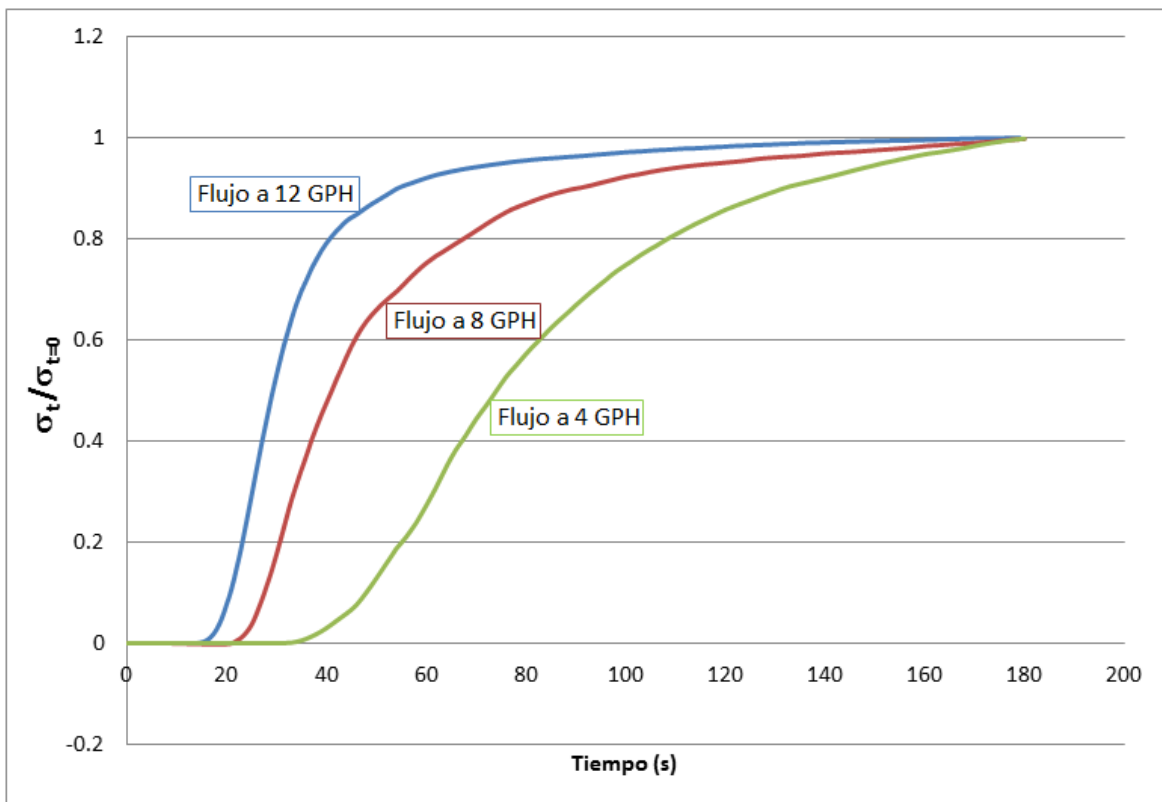


Figura 4.2. Resultado del comportamiento del trazador a la salida del compartimento con resina mixta a flujos de 12, 8, 4 GPH utilizando una señal de entrada tipo escalón.



La Figura 4.3 muestra las distribuciones de tiempos de residencia de los mismos experimentos, las cuales se obtuvieron por derivación numérica de los datos de concentración en función del tiempo a la salida del reactor (datos mostrados en la Figura 4.2). La derivación se llevó a cabo mediante diferencias finitas. Se puede observar en la Figura 4.3 los cambios en la DTR al variar el flujo, así a 12 GPH se obtiene una distribución estrecha con un pico bien definido y un ligero “coleo” (alargamiento asimétrico de la curva de distribución) hacia altos valores de tiempo; a menor flujo la distribución se ensancha y el “coleo” es más pronunciado, comportamiento que está relacionado con mayores desviaciones de un flujo pistón ideal.

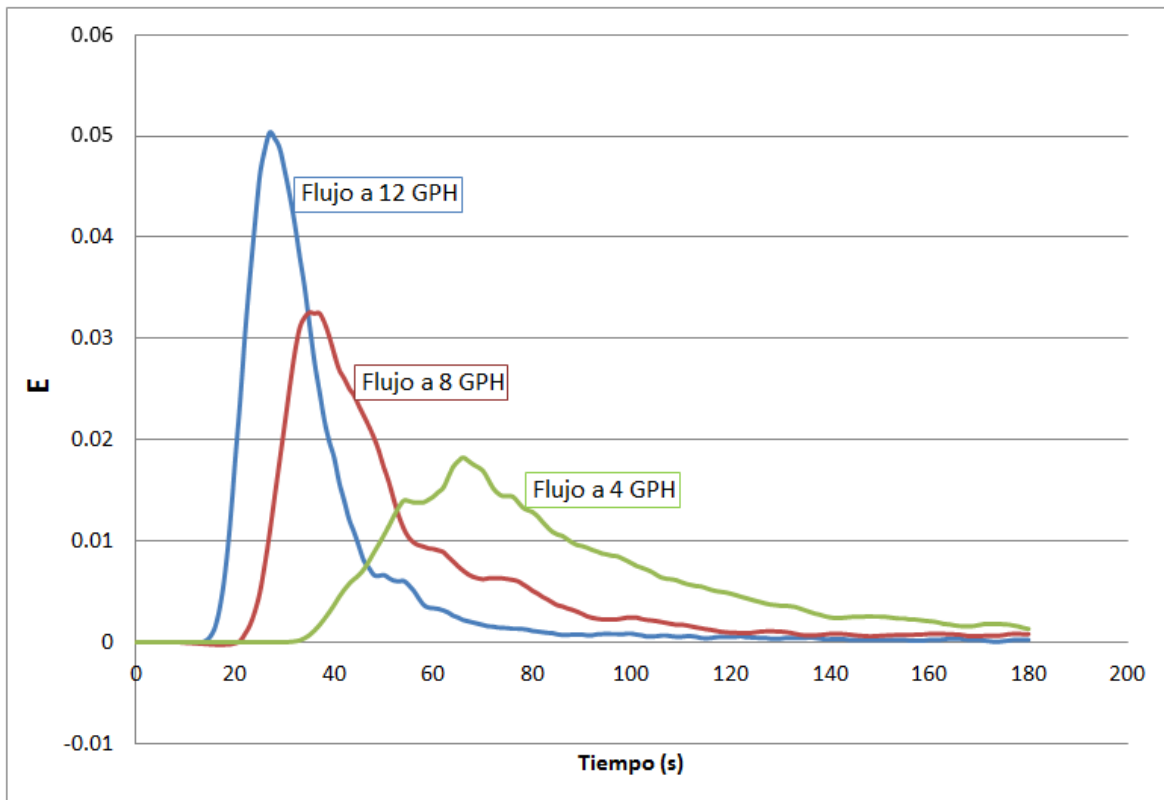


Figura 4.3. Distribución de tiempos de residencia en el compartimento con resina (calculada a partir de la concentración de salida del trazador de la Figura. 4.2).

De igual manera se analizó el comportamiento del flujo en los compartimentos sin y con resina, como también sin y con promotores de turbulencia. En la Figura 4.4 se observa la posición de los espaciadores a estudiar con la técnica de Distribución de Tiempos de Residencia (DTR). Se pueden distinguir dos tipos de compartimentos sin resina: el compartimento en el extremo (espaciador #1 Figura 4.5 a y b), delimitado por una membrana y el electrodo, y el compartimento intermedio (espaciador #2 Figura 4.7 a y b), delimitado por dos membranas. De acuerdo al diseño geométrico de la celda EDI y la distribución de las conexiones de entrada y salida (ver Figura 3.22 capítulo 3) estos

compartimentos podrían tener un comportamiento diferente. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 4.5 a 4.8.

Las curvas de concentración normalizada o función de distribución acumulativa a la salida del compartimento #1 con y sin promotor de turbulencia se muestran en la Figura 4.5 y las curvas de DTR obtenidas por derivación numérica se muestran en la Figura 4.6. Se puede observar un comportamiento general similar con una distribución más ancha y mayores tiempos de residencia al disminuir el flujo. Se observan fluctuaciones en la parte alta de las curvas de distribución acumulativa de los compartimentos sin promotores de turbulencia (Figura. 4.5a) a tiempos de 70, 90 y 130 s, para 12, 8 y 4 GPH, respectivamente; asimismo, se observa el ruido generado en la curvas de DTR (Fig. 4.6a).

Los experimentos llevados a cabo en los compartimentos con promotores de turbulencia exhiben curvas de distribución acumulativa (Figura 4.5b) con una pendiente menos pronunciada ocasionada por el fluido que debe atravesar el promotor de turbulencia y retrasa su salida. Este efecto se ve reflejado en la forma de las curvas de distribución de tiempos de residencia (Figura.4.6b).

En el caso de las distribuciones de tiempos de residencia del compartimento formado por el espaciador #2, mostrados en las Figuras 4.7 y 4.8, se observa una retención del líquido ligeramente mayor posiblemente ocasionada por las pequeñas diferencias geométricas de los ductos de entrada y salida como se observan en la Figura 3.22 capítulo 3. De igual manera, a un flujo de 4 GPH son notorias las fluctuaciones en las curvas de distribución acumulativa y DTR de las Figuras 4.7b y 4.8b, llegando a formar un pico en la distribución a  $t \approx 155$  s, que pudieron ser ocasionadas por la liberación de trazador entrampado en intersticios del promotor de turbulencia.

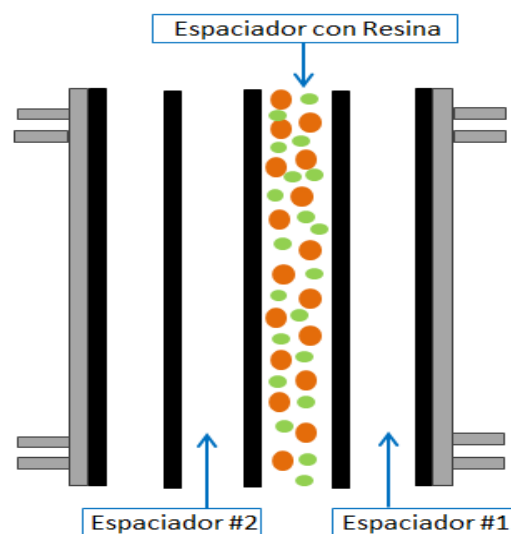


Figura 4.4. Posición de los espaciadores a estudiar.

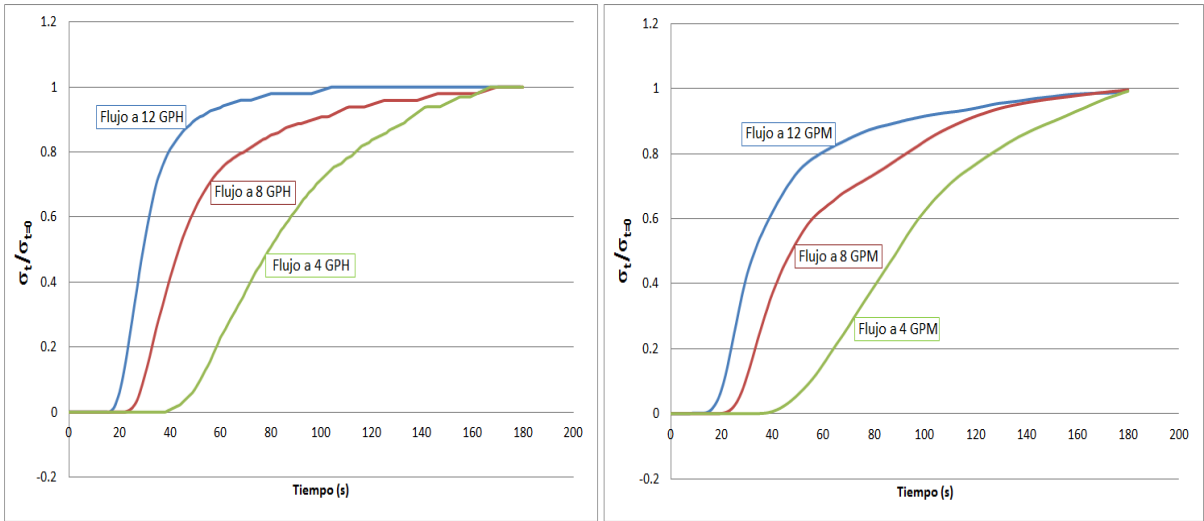


Figura 4.5. Curvas de distribución acumulativa a la salida de la celda en el espaciador #1 para una señal de entrada tipo escalón. a) Espaciador sin promotores de turbulencia y b) Espaciadores con promotores de turbulencia, ambos a flujos de 12 GPH, 8 GPH y 4 GPH.

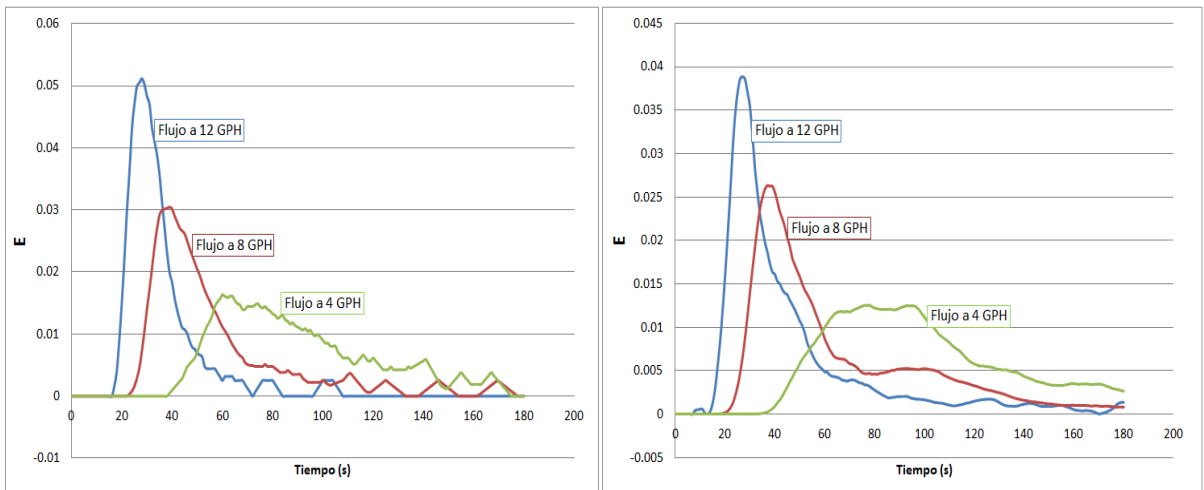


Figura 4.6. Curvas de distribución de tiempos de residencia en el compartimento formado por el espaciador #1 (DTR calculada a partir de los datos de la Figura 4.5). a) Espaciador sin promotores de turbulencia y b) Espaciador con promotores de turbulencia, ambos a flujos de 12 GPH, 8 GPH y 4 GPH.

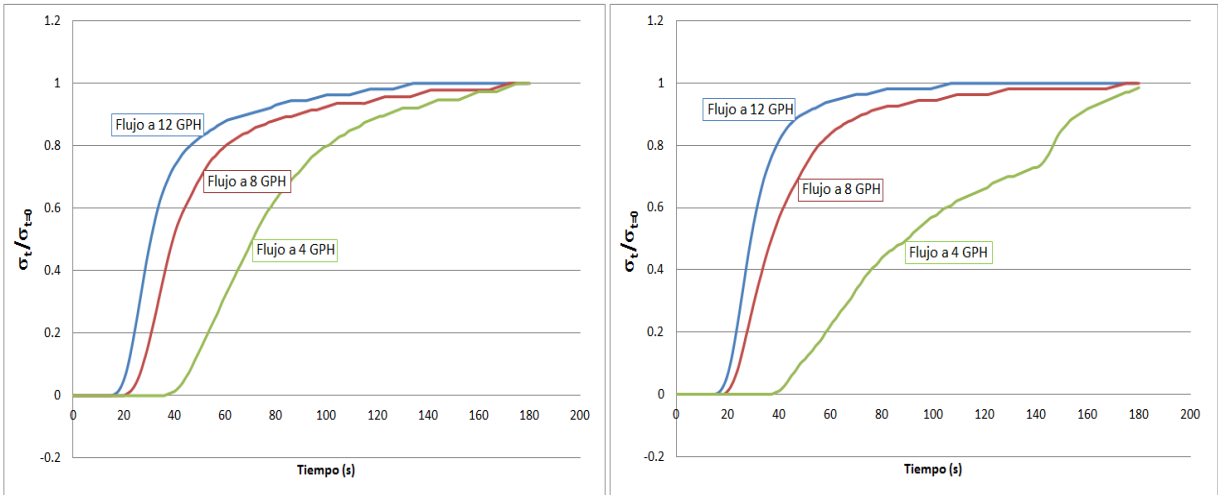


Figura 4.7. Curvas de distribución acumulativa a la salida de la celda en el espaciador #2 para una señal de entrada tipo escalón. a) Espaciador sin promotores de turbulencia y b) Espaciador con promotores de turbulencia, ambos a flujos de 12 GPH, 8 GPH y 4 GPH.

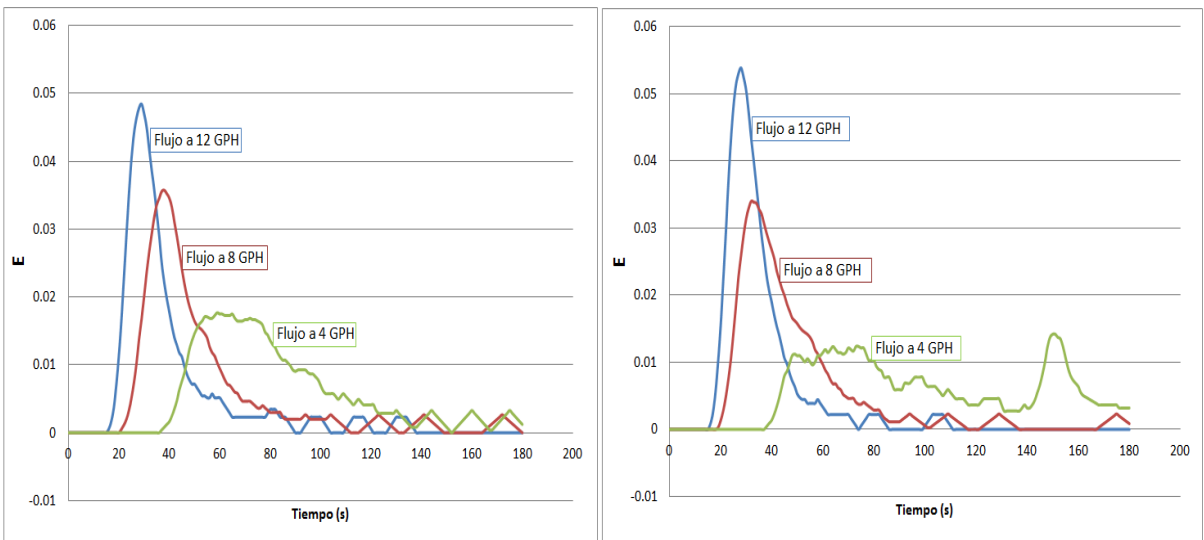


Figura 4.8. Curvas de distribución de tiempos de residencia en el compartimento formado por el espaciador #2 (DTR calculada a partir de los datos de la Fig.4.7). a) Espaciador sin promotores de turbulencia y b) Espaciador con promotores de turbulencia, ambos a flujos de 12 GPH, 8 GPH y 4 GPH.

Los resultados del estudio muestran en general que a flujos bajos aumenta la retención del líquido en los compartimentos de la celda, formando distribuciones asimétricas de tiempos de residencia y produciendo grandes desviaciones del flujo pistón ideal. Por otro lado, a flujos altos se obtienen distribuciones de tiempos de residencia más estrechas y por tanto menores desviaciones del flujo pistón ideal.

## 4.2 Electrodeionización

Los resultados de electrodeionización (EDI), en modo de recirculación, de soluciones 0.01 M NaCl a dos flujos (4 GPH y 8 GPH) y dos diferencias de potencial (7 V y 14 V) de celda se muestran en las figuras siguientes.

El comportamiento típico de la transferencia de iones (desde el compartimento lleno de resina al compartimento formado por el espaciador #2 (Figura 4.4)) se muestra con los cambios de conductividad en estos compartimentos (llamados soluciones de concentrado y diluido, respectivamente) en la Figura 4.9 para la EDI a 7 V y 8 GPH. En el compartimento de resina formado por una mezcla de resina de intercambio de cationes y resina de intercambio de aniones, los iones de la sal (NaCl) se intercambian por los iones presentes en la resina ( $H^+$  y  $OH^-$ ), de tal manera que la concentración de sal en la solución disminuye con el tiempo. Por otro lado, el campo eléctrico y la corriente generada en la celda provocan un flujo de transporte de iones dentro de la resina, donde los iones positivos ( $Na^+$  y  $H^+$ ) se transportan hacia el lado del cátodo de la celda y de iones negativos ( $Cl^-$  y  $OH^-$ ) hacia el ánodo de la celda.

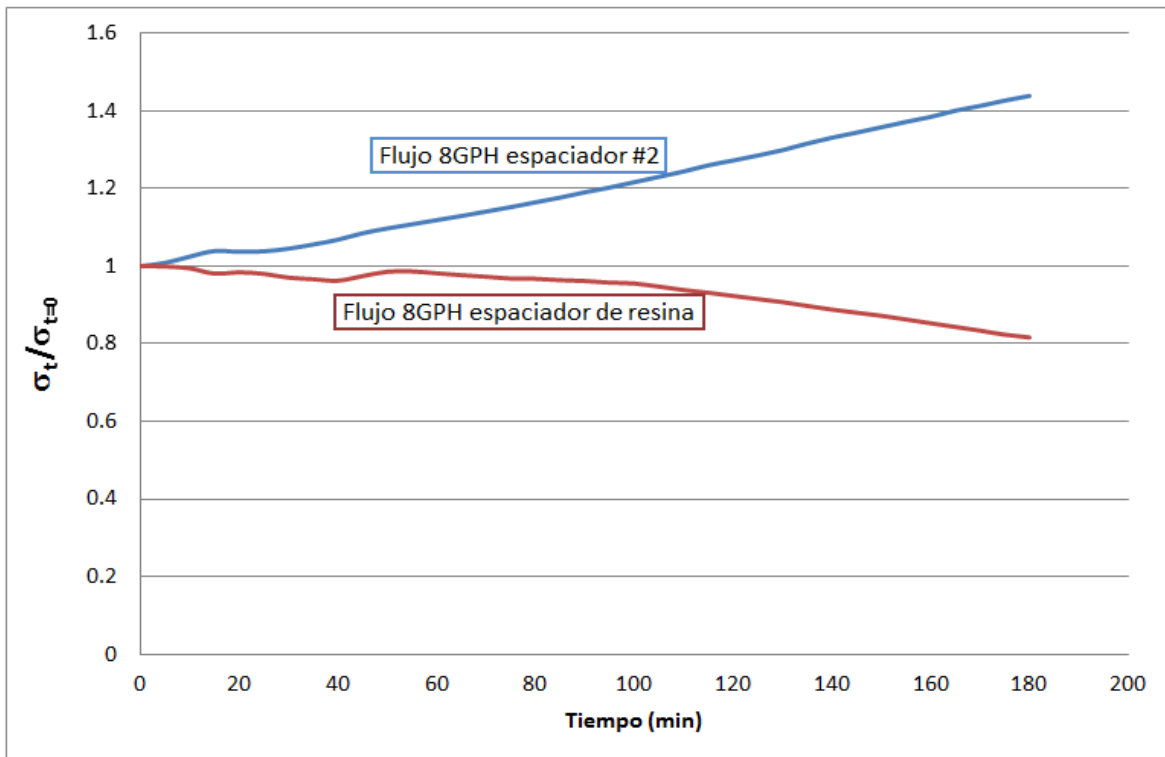


Figura 4.9. Comportamiento de la conductividad normalizada en la celda de EDI de la solución concentrada (espaciador #2) y solución diluida (espaciador con resina), a un voltaje de 7 V y un flujo de 8 GPH.

La Figura 4.10 ilustra el movimiento de los iones en la celda y las reacciones en los electrodos. Las membranas funcionan permitiendo el paso de los iones desde el compartimento con resina hacia los compartimentos adyacentes e impidiendo a los iones de las celdas adyacentes ingresar hacia el compartimento de la resina. Este proceso continúa produciendo un enriquecimiento de iones en la solución del compartimento formado por el espaciador #2 y un decremento de iones en la solución del compartimento de resina, como puede apreciarse en los datos experimentales de la Figura 4.9 por el aumento y disminución, respectivamente, de la conductividad de cada una de las soluciones de estos compartimentos. Es importante notar en la Figura 4.9 que el aumento de conductividad en las soluciones del compartimento formado por el espaciador #2 es muy distinto al decremento de conductividad en la solución del compartimento de resina a pesar de utilizar el mismo volumen de solución en los tanques de recirculación respectivos. La conductividad aumenta un 44% en el primer caso (solución concentrada) y disminuye solo un 18% en el segundo caso (solución diluida). La mayor cantidad de iones en la solución concentrada sugiere un ingreso adicional de iones provenientes de una fuente distinta a la de la solución diluida, posiblemente de la misma resina.

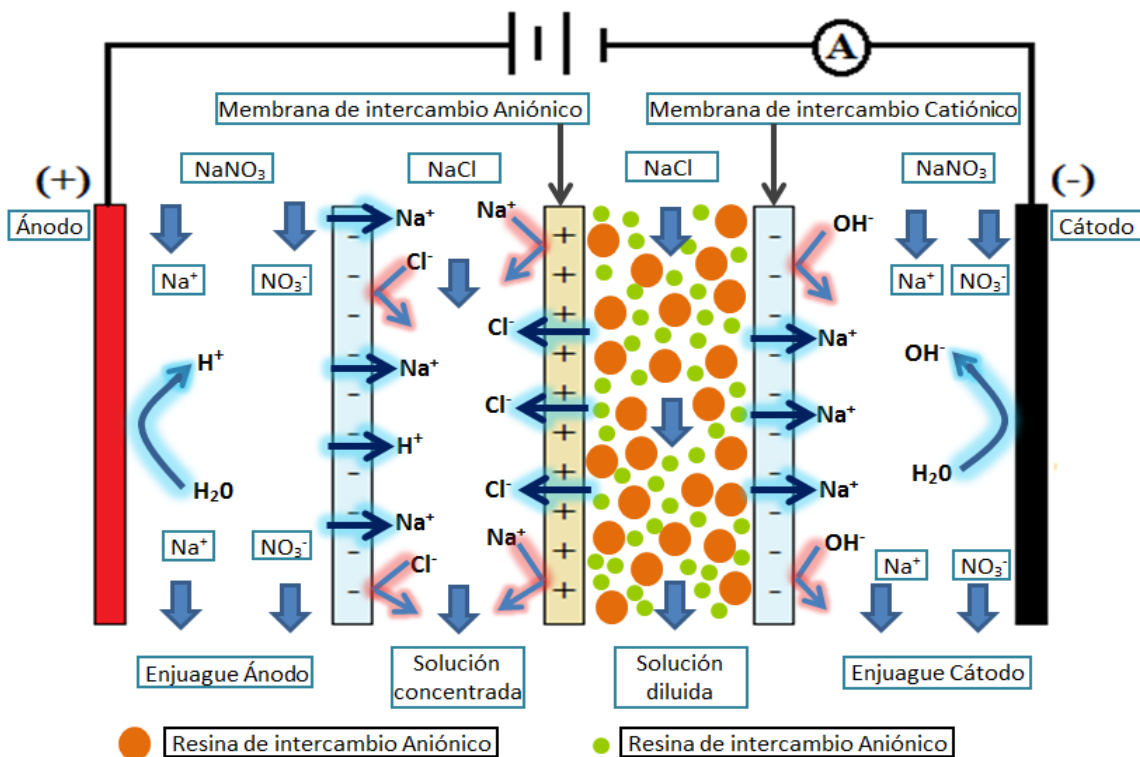


Figura 4.10. Diagrama esquemático del transporte de iones en la celda EDI experimental con cuatro compartimentos.

La Figura 4.11 muestra los cambios de conductividad en los compartimentos de diluido y concentrado para la EDI a 14 V y 4 GPH donde se observa un comportamiento similar al de la Figura 4.9 ya descrita; los iones que se intercambian producen un aumento de la concentración en el compartimento formado por el espaciador #2 (solución concentrada) a expensas de la disminución de concentración del compartimento con resina (solución diluida). En esta figura puede apreciarse un aumento de conductividad mayor al de la Figura 4.9 en el compartimento de concentrado formado por el espaciador #2, teniendo un 75% de aumento debido principalmente al mayor potencial utilizado, y una disminución del 84% en el compartimento de resina. Los iones intercambiados en la resina son transportados hacia los compartimentos adyacentes, los iones negativos ( $\text{Cl}^-$  y  $\text{OH}^-$ ) hacia el ánodo de la celda y los iones positivos ( $\text{H}^+$  y  $\text{Na}^+$ ) hacia el cátodo. Cabe destacar que en los primeros minutos se observa una oscilación por el hecho de que se requiere un periodo de estabilización de la celda donde aproximadamente se tarda 15 minutos.

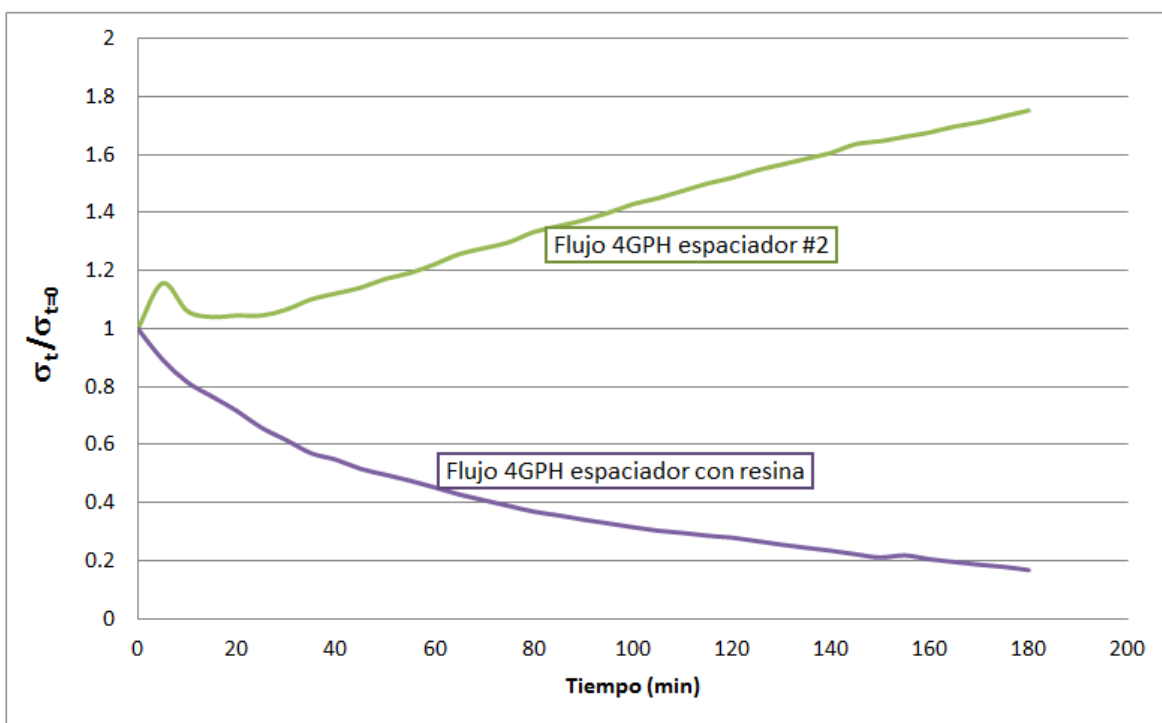


Figura 4.11. Comportamiento de la conductividad normalizada en la celda de EDI de la solución concentrada (espaciador #2) y solución diluida (espaciador con resina), a un voltaje de 14 V y un flujo de 4 GPH.

La Figura 4.12 muestra los resultados experimentales de disminución de conductividad en las soluciones del compartimento con resina a diferentes condiciones. Estos resultados ilustran la capacidad que tiene la celda de EDI para remover iones. La mayor remoción de

iones se obtienen a mayor potencial de celda lográndose remover hasta el 91% del cloruro de sodio. El efecto del flujo sobre la remoción de iones no es significativo cuando el potencial de celda es 14 V, pero bajo un voltaje de 7 V, se observa que a menor flujo se obtiene una mayor remoción de sal, lo cual puede ser atribuido al mayor tiempo de residencia que favorece el intercambio iónico. Por otro lado, en la figura se observa que la solución a 14 V y a un flujo de 8 GPH tarda en llegar a una estabilidad en comparación con el experimento de la Figura 4.11 (flujo de 4 GPH), ya que se estabiliza a los 10 minutos, aproximadamente y en los demás casos utilizando 7 V en ambos flujos se logra una estabilidad desde el inicio de la experimentación.

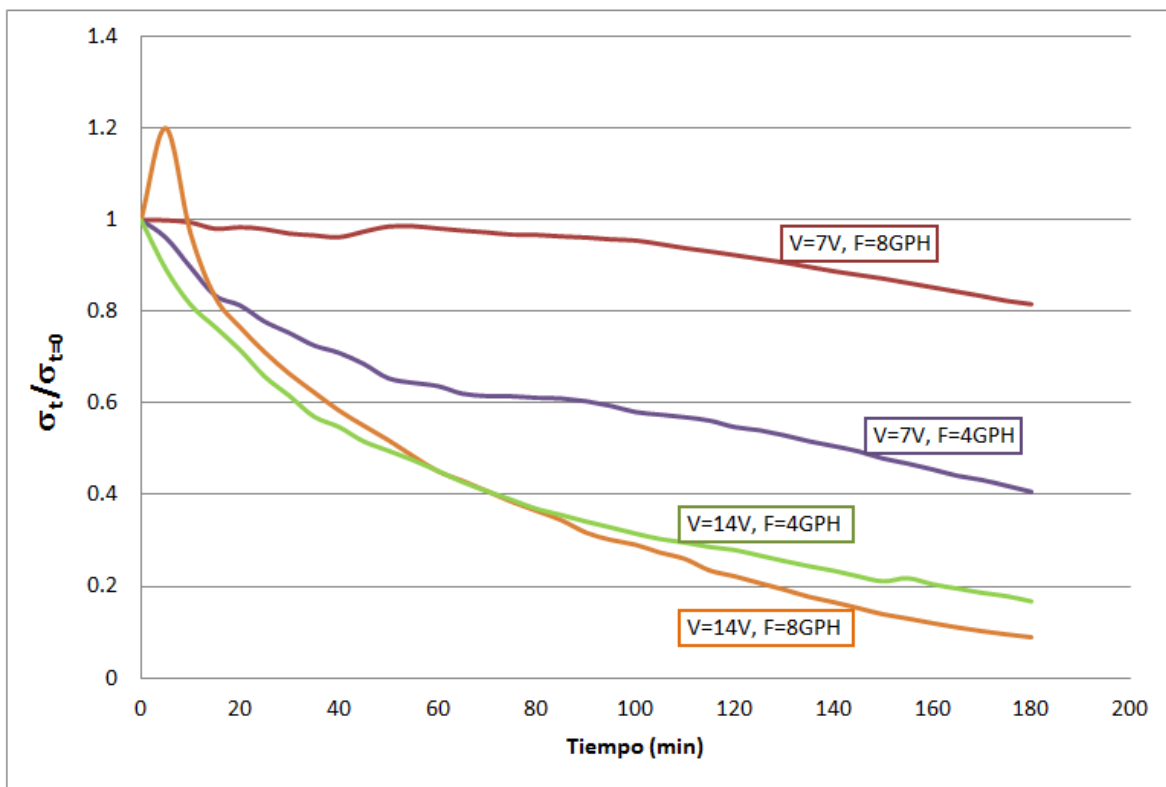


Figura 4.12. Comportamiento de la conductividad normalizada en la celda de EDI de la solución diluida (espaciador con resina), a un voltaje de 7 V y 14 V y flujo de 8 GPH y 4 GPH.

La Figura 4.13 muestra el comportamiento de la conductividad en las soluciones del concentrado a diferentes condiciones. En todos los casos se verifica el aumento en la conductividad, ocasionado por los iones provenientes del compartimento de diluido. Se puede observar que la conductividad aumenta en una proporción mayor al aumentar el potencial de celda al doble, de 7 a 14 V, posiblemente debido a que a mayores potenciales, y en consecuencia mayores densidades de corriente, se favorecen los



procesos de disociación de agua. En cuanto al periodo de estabilización se observa que éste tarda hasta 20 minutos dependiendo de las condiciones.

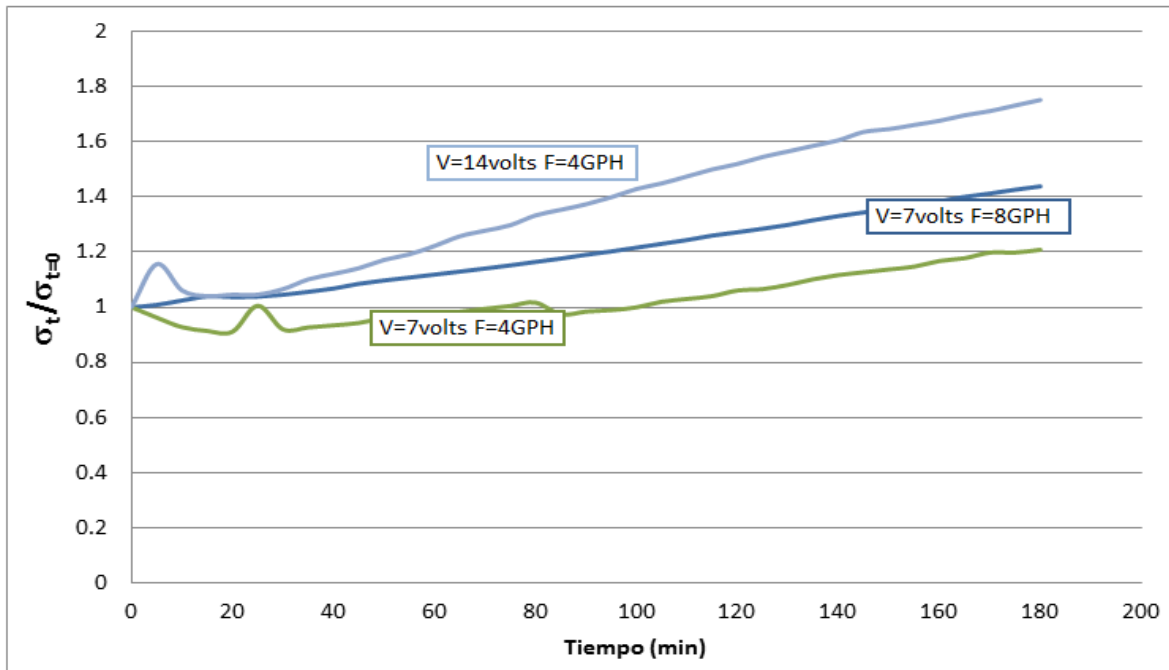


Figura 4.13. Comportamiento de la conductividad normalizada en la celda de EDI de la solución concentrada (espaciador #2), a un voltaje de 7 V y 14 V y flujo de 8 GPH y 4 GPH.

En la Figura 4.14 se muestra el comportamiento de la corriente contra el tiempo donde podemos observar, después de un periodo de incremento de corriente y estabilización, una disminución pronunciada de corriente a un voltaje de 14 V mientras que a un voltaje de 7 V un comportamiento con una tendencia a valores constantes de corriente; de igual manera a 14 V se puede apreciar que a un flujo mayor la corriente disminuye más rápidamente que con un flujo menor, esto es a 14 V y un flujo de 8 GPH el descenso de corriente comienza con una corriente alta, pero al final del experimento se tiene un menor valor de corriente mientras que con el mismo voltaje pero con menor flujo el valor final de corriente es mayor. Por otro lado, se observa que a mayor voltaje es más tardado y difícil tener una estabilidad al comenzar la experimentación. Este comportamiento se puede explicar por los cambios de conductividad en cada una de las celdas; conforme transcurre la electrodeionización la concentración del compartimento de concentrado aumenta y por lo tanto la conductividad aumenta provocando una corriente mayor al mantener un voltaje constante. Posteriormente, al removerse una gran cantidad de iones del compartimento diluido la disponibilidad de iones disminuye por lo que cada vez resulta más difícil el intercambio de iones con la resina y su remoción, provocando una disminución paulatina de la corriente. A una diferencia de potencial menor (7 V) ocurre

algo similar pero el aumento de corriente en la primera parte no es muy pronunciado; adicionalmente, puesto que se remueve poca cantidad de iones la concentración en el compartimento diluido no disminuye grandemente y siempre existen iones disponibles para el intercambio iónico y la densidad de corriente no disminuye apreciablemente.

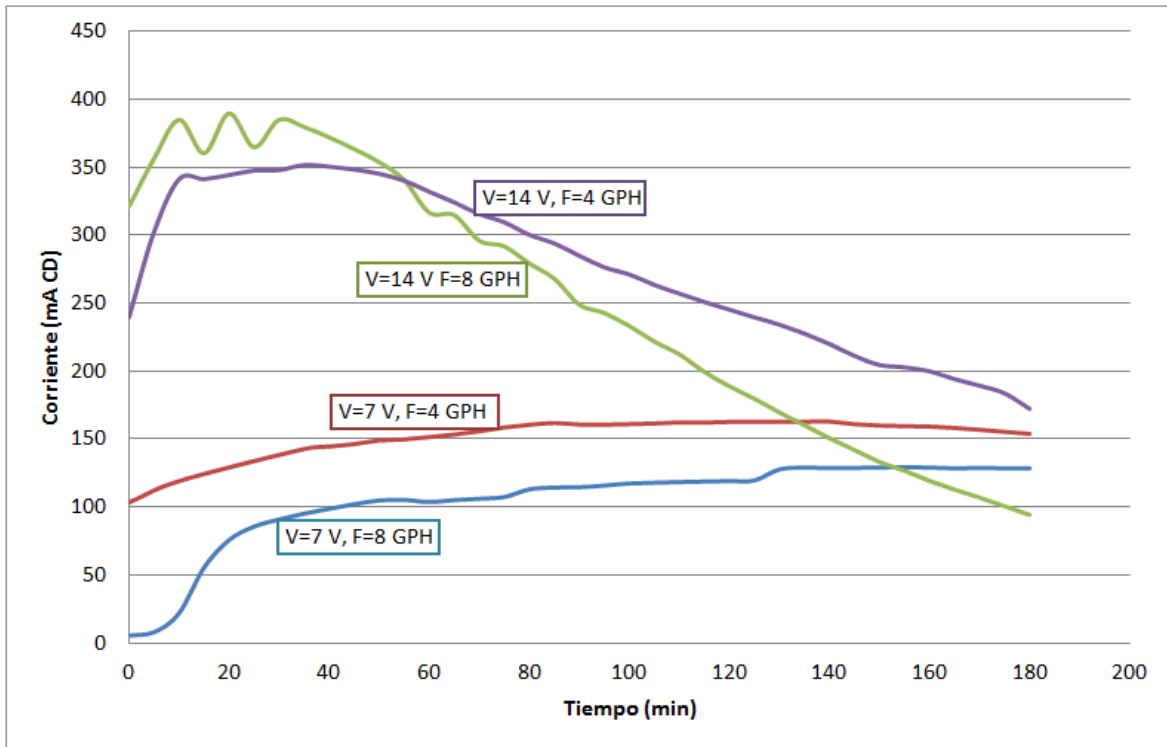


Figura 4.14. Comportamiento de la corriente con respecto al tiempo a voltajes de 7 V y 14 V con un flujo de 8 GPH y 4 GPH.

La eficiencia de la corriente que obtenemos en la parte experimental la calculamos con la ayuda de la ecuación 1.1 mencionada en el Capítulo 1 obteniendo el siguiente resultado:

Tabla 4.1. Eficiencia de corriente de la celda EDI calculada con la ecuación 1.1.

EFICIENCIA DE CORRIENTE		
	4 GPH	8 GPH
7 volts	0.627	0.234
14 volts	0.402	0.485

La Tabla 4.1 muestra que a mayor voltaje tenemos una eficiencia alta ya sea a un flujo de 4 GPH como de 8 GPH. Vemos que en un flujo de 4 GPH a un voltaje de 7 V la eficiencia es la más alta. En el caso del experimento a un voltaje de 7 V, a un flujo mayor disminuye la eficiencia a un valor de 0.234. Estos valores de eficiencia muestran que otros procesos que

requieren corriente eléctrica tienen lugar en la celda, posiblemente procesos de disociación de agua. De acuerdo con estos resultados podemos decir que es mejor utilizar un voltaje de 7 V con un flujo de 4 GPH o un voltaje de 14 con un flujo de 8 GPH.

Para saber el consumo que se requiere de energía en la celda EDI utilizamos la siguiente fórmula:

$$C_E = V \cdot \int I dt \quad (4.1)$$

Dónde:

$C_E$ =Consumo de energía [=] kW·h

$V$ =Voltaje [=] V

$t$ = Tiempo de duración del proceso [=] s

$I$  = Corriente aplicada [=] A

En la tabla 4.2 se muestra los resultados de consumo de energía calculada de forma numérica con el método del trapecio multiplicado por el voltaje utilizado, de acuerdo con la ecuación 4.1. Respecto a los resultados podemos decir que a un voltaje de 7 V se tiene un menor consumo pero en la tabla 4.1 vemos que la eficiencia a 7 V y 8 GPH no es la mejor a comparación de un voltaje mayor (14 V) aunque en ambos casos su consumo sigue siendo bajo. En cuanto al costo de energía eléctrica del proceso, considerando que el consumo básico reportado en la Comisión Federal de Electricidad indica que por cada uno de los primeros 75 kilowatts-hora tiene un costo de \$ 0.793 [8]. En la Tabla 4.3 se encuentra un estimado económico del consumo de energía de la celda por m<sup>3</sup> para el proceso de EDI. De los resultados mostrados en las tablas 4.1 y 4.2 se observa que la condición a 7 V con un flujo de 4 GPH es eficiente con un consumo bajo de energía y por consecuencia un bajo costo por lo que se demuestra que el proceso es viable a esas condiciones.

Tabla 4.2. Consumo de energía en la celda EDI calculada con la ecuación 4.1

CONSUMO DE ENERGÍA		
	4 GPH	8 GPH
<b>7 volts</b>	0.0027 kW·h	0.0368 kW·h
<b>14 volts</b>	0.1944 kW·h	0.1764 kW·h

Tabla 4.3. Costo del consumo de energía para la celda EDI por metro cúbico.

COSTO DEL CONSUMO DE ENERGÍA				
	4 GPH	Costo	8 GPH	Costo
<b>7 volts</b>	1.778 kW·h·m <sup>3</sup>	\$1.410	24.561 kW·h·m <sup>3</sup>	\$19.477
<b>14 volts</b>	129.604 kW·h·m <sup>3</sup>	\$102.776	117.615 kW·h·m <sup>3</sup>	\$93.269

# Conclusiones

---

En este trabajo se llevaron a cabo los estudios experimentales de distribución de tiempo de residencia DTR y electrodeionización EDI en una celda de laboratorio de cuatro compartimentos. Se determinaron las DTR en los compartimentos con resina de intercambio iónico y en los compartimentos sin resina, con y sin promotores de turbulencia. De los resultados podemos deducir que el método de DTR utilizando una señal de escalón permite obtener conclusiones sobre el comportamiento hidrodinámico del fluido en los compartimentos de la celda; se obtiene que comparando los resultados de DTR con y sin promotores es mejor con los promotores ya que la distribución de tiempos de residencia es ligeramente menos ancha que sin promotores lo que indica que el flujo es más homogéneo, además los promotores pueden ser necesarios para una mejor distribución del fluido y el mezclado. De igual manera la DTR en el compartimiento con resina es más angosta, por lo tanto podemos concluir que a menor dispersión se obtiene un flujo más homogéneo que puede ser utilizado para dar mejor rendimiento en el reactor, de este modo la eficiencia del proceso de EDI no se verá afectada por desviaciones de flujo.

En la parte de EDI, a diferentes condiciones de flujo (4 GPH y 8 GPH) y de voltaje (7 V y 14 V), se obtienen las curvas de conductividad vs tiempo observando que a mayor potencial (14 V) se logra remover más del 91% de la sal en un tiempo de tres horas. En el proceso, los iones de la sal (NaCl) se intercambian por los iones presentes en la resina ( $H^+$  y  $OH^-$ ) de tal manera que la concentración de sal en la solución disminuye con el tiempo. Por otro lado, el campo eléctrico y la corriente generada en la celda provocan un flux de transporte de iones dentro de la resina, donde los iones positivos ( $Na^+$  y  $H^+$ ) se transportan hacia el lado del cátodo de la celda y de iones negativos ( $Cl^-$  y  $OH^-$ ) hacia el ánodo de la celda, y las membranas funcionan permitiendo el paso de los iones en estas mismas direcciones y excluyendo a los iones de las celdas adyacentes ingresar hacia el compartimento de la resina. Al aumentar el potencial las moléculas de agua se disocian produciendo iones hidrógeno e hidroxilos que continuamente producen la regeneración de la resina.

Cabe destacar que el consumo energético es muy pequeño (menor a 0.2 kW·h) en todos los experimentos realizados, por tanto los costos serán bajos y el proceso puede ser viable considerado además que la eficiencia de corriente de la celda obtenida es mayor a 0.234. Los resultados muestran que se logra un mayor grado de separación a condiciones de mayor voltaje (14 V) y mayor flujo (8 GPH) pero por otro lado se obtiene la mejor eficiencia de corriente y menor consumo de energía a menor voltaje (7 V) y menor flujo (4 GPH), por lo que la selección de las mejores condiciones para llevar a cabo la EDI deberá

considerar, de manera general, un compromiso entre un proceso rápido (alto rendimiento) con baja eficiencia o un proceso lento (bajo rendimiento) con mayor eficiencia. En particular, bajo las condiciones estudiadas en este trabajo, las mejores condiciones son a bajo voltaje y bajo flujo para obtener el menor costo de consumo de energía eléctrica de la celda con una pequeña disminución del grado de separación.

Por tanto, se puede concluir que la EDI es una técnica que se puede utilizar para tratar aguas salobres ya que la concentración disminuye significativamente para obtener un producto de agua desalinizada para diferentes usos con altas eficiencias y bajos consumos de electricidad con las ventajas adicionales de ser un proceso continuo y no requerir químicos para regenerar la resina.

# Referencias

---

- [1] E. Maigrot, J. Sabates, Apparat zur Liuterung von Zuckersiften mittels Elektrizitiit, Germ. Pat. (1889) Nr. 50443.
- [2] V.A. Shaposhnik, K. Kesore, An early history of electro dialysis with permselective membranes, Journal of Membrane Science 136, 35–39 (1997).
- [3] E. Manegold, K. Kalauch, Uber Kapillarsysteme XXII. Die Wirksamkeit verschiedener Reinigungsmethoden (Filtration, Dialyse, Elektrolyse und ihre Kombinationen), Z. Kolloid 86, 93–101(1939).
- [4] A. G. Winger, G.W. Bodamer, R. Kunin, Some Electrochemical Properties of New Synthetic Ion Exchange Membranes, Journal of The Electrochemical Society 100, 178–184 (1953).
- [5] T. Xu, Ion exchange membranes: State of their development and perspective, Journal of Membrane Science 263, 1–29 (2005).
- [6] M. Paidar, V. Fateev, K. Bouzek, Membrane electrolysis—History, current status and perspective, Electrochimica Acta 209, 737–756 (2016).
- [7] L. Alvarado, A. Chen, Electrodeionization: Principles, strategies and applications, Electrochimica Acta 132, 583–597 (2014).
- [8] SnowPure, History of electrodeionization, Recuperado el 19 de agosto del 2018 de: <https://www.snowpure.com/history-of-electrodeionization/>.
- [9] J. Sanz, L. Guerrero, M. Roca, Producción de Agua de Alta Pureza: Electrodeionización en Continuo (CEDI), Recuperado el 27 de agosto del 2018 de: <http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/17801,Febrero2006.pdf>.
- [10] B. Blanco, Edi, un proceso de desmineralización que cuida el medio ambiente, Recuperado el 18 de septiembre del 2018 de: <http://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/8048-Edi-un-proceso-de-desmineralizacion-que-cuida-el-medio-ambiente.html>.
- [11] K.-E. Bouhidel, A. Lakehal, Influence of voltage and flow rate on electrodeionization (EDI) process efficiency, Desalination 193, 411–421 (2006).

- [12] S.-Y. Pan, S. W. Snyder, H.-W. Ma, Y. J. Lin, P.-C. Chiang, Development of a resin wafer electrodeionization process for impaired water desalination with high energy efficiency and productivity, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* **5**, 2942–2948 (2017).
- [13] A. Ortega, Estudio experimental y modelado de la remoción de arsénico de agua mediante resina aniónica electro-regenerada en un proceso híbrido de intercambio iónico/electrodialisis, Tesis doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, (2017).
- [14] A. Ortega, I. Oliva, K. E. Contreras, I. González, M. R. Cruz-Díaz, E. P. Rivero, Arsenic removal from water by hybrid electro-regenerated anion exchange resin/electrodialysis process, *Separation and Purification Technology* **184**, 319–326 (2017).
- [15] O. Souilah, D. E. Akretche, M. Amara, Water reuse of an industrial effluent by means of electrodeionisation, *Desalination* **167**, 49–54 (2004).
- [16] K.-H. Yeon, J.-H. Song, S.-H. Moon, A study on stack configuration of continuous electrodeionization for removal of heavy metal ions from the primary coolant of a nuclear power plant, *Water Research* **38**, 1911-1921 (2004).
- [17] Ö. Arar, Ü. Yüksel, N. Kabay, M. Yüksel, Various applications of electrodeionization (EDI) method for water treatment—A short review, *Desalination* **342**, 16–22 (2014).
- [18] L. B. Ramilo, Análisis de la factibilidad técnica del proceso de electrodeionización para el tratamiento del agua de reposición del ciclo térmico de la central nuclear, Tesis maestría, Instituto de Estudios Nucleares, Argentina, (2003).
- [19] U. M. López, “Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de Nitrato en agua”, Tesis maestría, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CONACYT), México, (2005).
- [20] A. E. Silva, Mejoramiento de la calidad de aguas salinas y salobres mediante un sistema de evapotranspiración y destilación solar, Tesis doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, (2012).
- [21] J. A. López, M. Mejías, Las aguas salobres. Una alternativa al abastecimiento en regiones semiáridas, Instituto Geológico y Minero, España, (2012).
- [22] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Estadísticas del Agua en México Edición 2017, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Ciudad de México, (2017).

**[23]** X. Garmendia, Aguas subterráneas. Acuíferos, Recuperado el 27 de agosto del 2018 de: <http://cesmdfa.tfja.gob.mx/investigaciones/historico/pdf/aguassubterraneas.pdf>.

**[24]** Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Estadísticas del Agua en México Edición 2014, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Ciudad de México, (2014).

**[25]** X. Sun, H. Lu, J. Wang, Brackish water desalination using electrodeionization reversal, Chemical Engineering and Processing 104, 262–270 (2016).

**[26]** X.-Y. Zheng, S.-Y. Pan, P.-C. Tseng, H.-L. Zheng, P.-C. Chiang, Optimization of resin wafer electrodeionization for brackish water desalination, Separation and Purification Technology 194, 346–354 (2018).

**[27]** H. S. Fogler, Elementos de Ingeniería de las reacciones químicas, 3ra Ed Pearson Educación, México, (2001).

**[28]** Comisión Federal de Electricidad (CFE), Tarifa 1 2018, Recuperado el 24 de septiembre del 2018 de:

[https://app.cfe.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/Tarifas\\_casa.asp?Tarifa=DACTAR1&anio=2018](https://app.cfe.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/Tarifas_casa.asp?Tarifa=DACTAR1&anio=2018).