



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

**Aplicación de la electrodiálisis con y sin efecto de
resina de intercambio iónico para la remoción de
iones Na^+ y Cl^- en aguas salobres**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN QUÍMICA INDUSTRIAL

P R E S E N T A
Adriana Urbina Mijangos

ASESORA
Dra. Francisca Alicia Rodríguez Pérez

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2022



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.

DEDICATORIA

A mis padres, Alicia y Arturo; por apoyarme y motivarme para seguir adelante, gracias por su paciencia, sacrificio, quienes han dado todo por mí y que con su amor, dedicación y valores me han llevado hasta aquí, por su comprensión y por su cariño, porque todo lo que tengo y soy se los debo a ustedes.

También agradezco a mis hermanos Alejandra y Arturo, quienes también me apoyaron en todo momento, al igual que me daban ánimos y consejos para seguir adelante y realizar mis metas.

A mi sobrino Dante, espero verlo realizar sus metas y que nunca se rinda.

Gracias a mis familiares, mis primos los Vivanco y los Mijangos, por creer en mí y motivarme a crecer y no darme por vencida.

A mis amigos de la carrera química industrial generación 20, en especial a Rodrigo y Heriberto, fueron el mejor equipo, gracias por compartir tantos momentos y siempre apoyarme, se han convertido en una parte muy especial en mi vida.

A la doctora Francisca Alicia Rodríguez Pérez por brindarme su apoyo incondicional en todo el transcurso del proyecto y la tesis, gracias por darme esta gran oportunidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo y la colaboración en la realización de esta tesis a:

Dra. Alicia Rodríguez Pérez por su confianza, apoyo brindado y la asesoría en este

proyecto. A todas las personas que contribuyeron para la realización de este trabajo: Dr.

Arturo Ortega Díaz y José Arturo Martín Tereso por brindarme su apoyo.

Al Fondo Sectorial CONACyT-SENER-Sustentabilidad energética por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo de esta investigación a través del proyecto con registro número 292862 y al proyecto titulado Ingeniería química y aplicaciones electroquímicas en el medio ambiente con clave CI2265.

Parte experimental de esta tesis se publicó en el siguiente artículo arbitrado:

Carolina Otero, Adriana Urbina, Eligio P. Rivero, Francisca A. Rodríguez, Desalination of brackish water by electrodeionization: Experimental study and mathematical modeling, *Desalination*, 504, 15, (2021), 114803.

ÍNDICE

RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS PARTICULARES	2
CAPÍTULO 1: Antecedentes	3
1.1. <i>Problemática del agua</i>	3
1.1.1. <i>Aguas salobres</i>	3
1.2. <i>Procesos para remoción de sal en aguas salobres</i>	7
1.2.1. <i>Membranas</i>	7
1.2.1.1. <i>Membranas artificiales</i>	8
1.2.1.2. <i>Membranas de intercambio iónico</i>	8
1.2.1.3. <i>Clasificación de las membranas de intercambio iónico</i>	9
1.2.2. <i>Ósmosis inversa</i>	11
1.2.3. <i>Intercambio iónico</i>	12
1.2.4. <i>Resina</i>	13
1.2.5. <i>Electrodialisis</i>	14
1.2.6. <i>Electrodeionización</i>	15
CAPÍTULO 2: Características del reactor y su montaje	17
2.1. <i>Equipo</i>	17
2.1.1. <i>Fuente de poder</i>	18
2.1.2. <i>Multímetro</i>	18
2.1.3. <i>Kit de medidor multiparamétrico</i>	19
2.2. <i>Componentes de la celda</i>	20
2.2.1. <i>Tapas prensa</i>	20
2.2.2. <i>Tapas de conexión</i>	21

2.2.3.	<i>Juntas</i>	22
2.2.4.	<i>Electrodos</i>	22
2.2.5.	<i>Espaciadores</i>	23
2.2.6.	<i>Promotores de turbulencia</i>	24
2.2.7.	<i>Membranas</i>	25
2.2.8.	<i>Resina de intercambio iónico</i>	25
 CAPÍTULO 3: Métodos y condiciones		27
3.1	<i>Arreglo y proceso de la remoción de sal mediante EDI</i>	27
3.2	<i>Cuantificación de iones cloruro</i>	30
3.3	<i>Cuantificación de iones sodio</i>	32
 CAPÍTULO 4: Resultados y discusiones		35
4.1	<i>Electrodialisis</i>	35
4.2	<i>Electrodeionización</i>	39
4.3	<i>Electrodialisis vs electrodeionización</i>	43
4.4	<i>Consumo de energía</i>	47
 Conclusiones		51
 Referencias		52

NOMENCLATURA

ED Electrodiálisis

EDI Electrodeionización

MC Membrana catiónica

MA Membrana aniónica

IO Ósmosis inversa

IX Intercambio iónico

V Voltaje

E_f Eficiencia de corriente

F Constante de Faraday [=] C/mol

I Corriente eléctrica [=] A

V_T Volumen de la solución [=] m³

t Tiempo [=] s

Z_i Carga de los iones

E Consumo de energía [=] kWh/m³

E_{cel} Voltaje de la celda

Re Eficiencia de remoción

C_i Concentración inicial [=] M

C_f Concentración final [=] M

C_{to}^{sd} Concentración a diluir al inicio [=] M

C_{tf}^{sd} Concentración a diluir al final [=] M

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un estudio experimental para la separación de los iones Na^+ y Cl^- en las aguas salobres; cuyo objetivo se centra en desarrollar, mejorar y comparar el método de electrodiálisis con y sin efecto de una resina de intercambio iónico (catiónica-aniónica).

La estructura del reactor, en el cual se llevó a cabo la experimentación, consta de tres recipientes, en los cuales dos de ellos llevan soluciones de NaCl a 0.01 M ($0.5844 \text{ g L}^{-1} \text{ NaCl}$, concentración considerada dentro de los valores de aguas salobres, $0.5 - 30 \text{ g/L}$), simulando las aguas salobres, mientras que en el tercer recipiente contiene una solución de 0.01 M NaNO_3 como enjuague, al igual que contenía una celda de electrodiálisis con y sin resina. La celda está compuesta por cuatro compartimentos separados con membranas de intercambio iónico intercaladas (dos membranas catiónicas Nafion y una membrana aniónica Selemion), con un área expuesta de 30 cm^2 , en los extremos, se utilizaron dos electrodos, un ánodo de titanio platinizado y un cátodo de acero inoxidable, cada uno con 30 cm^2 de área expuesta. Se manejaron dos potenciales de celda, 7 y 14 V . Durante la experimentación se midieron valores de pH y conductividad en todos los recipientes, se recolectaron muestras para obtener la concentración de iones cloruro mediante el método argentométrico, y para la concentración de iones sodio se utilizó un equipo de espectrometría de absorción atómica con llama. Los resultados experimentales mostraron que el lecho de resina de intercambio iónico ayuda a la separación de los iones Na^+ y Cl^- , ya que a las mismas condiciones experimentales (14 V , 0.01 M NaCl inicial) con resina mixta, la solución a diluir mostró una disminución de iones cloruro del 72% mientras que sin resina mixta presentó un 39.29% de disminución con respecto a la inicial, por otra parte, la disminución de los sodios fue de 24.60% y 99.8% sin y con resina catiónica-aniónica, respectivamente.

INTRODUCCIÓN

El consumo de agua potable se ha incrementado en los últimos años, debido a esto se han desarrollado nuevos métodos para tratar agua salobre, una de ellas es la tecnología híbrida de electrodeionización (EDI), que es la combinación de electrodiálisis (ED) con intercambio iónico (IX).

Las aguas salobres son aquellas que tiene un contenido de salinidad mayor al agua dulce pero menor al agua de mar, con un rango de contenido de sal de 0.5-30 g/L. Estas aguas se encuentran en zonas muy cercanas al mar, se presentan en estuarios y otros ecosistemas acuáticos, se puede encontrar en acuíferos subterráneos asociados con rocas salinas. El agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El agua subterránea aportó 34 385 millones m³ en el 2017. En lo que respecta a las aguas subterráneas, en nuestro país se encuentran 653 acuíferos, los cuales a finales del 2017 se tenían publicadas las disponibilidades de todos ellos [31].

El proceso de desalinización en las aguas salobres tiende a tener un impacto medioambiental menor que al desalinizar agua de mar, ya que se utiliza un consumo energético mucho menor. Uno de los métodos continuo para desalinizar las aguas salobres es la electrodeionización, en el cual se obtiene aguas con alta pureza, otra característica que favorece este método es la facilidad y seguridad de utilizarlo, este proceso sólo requiere de energía eléctrica, membranas y un material para el intercambio iónico (resina catiónica-aniónica), sin utilizar algunos otros productos químicos que sean dañinos al medioambiente y produzca residuos peligrosos, por lo cual no produce contaminantes.

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 [1].

Las investigaciones previas que se han realizado respecto a la electrodiálisis, se proponen dos métodos distintos en los cuales unos es el utilizar la resina mixta, así como la variabilidad de voltaje, esto para buscar el método que presente un mejor resultado al analizar las aguas potabilizadas y así seleccionar las mejores condiciones para su futuro uso. La principal condición en la celda es el utilizar la resina mixta, ya que ésta ayuda a que se realice con mayor éxito el intercambio iónico.

Cabe destacar que en el presente trabajo se enfoca al estudio de los iones Cl⁻ y Na⁺ de un efluente ideal, se eligió una concentración de 0.01 M NaCl que es igual a 0.5844 g L⁻¹ (solución que simula agua salobre, ya que está dentro del intervalo de la clasificación de agua salobre 0.5-30 g L⁻¹) con el fin de obtener agua baja en sales. Por lo tanto, en este estudio servirá para realizar investigación futura para tratar efluentes reales en donde se tienen más de dos iones y el tratamiento de separación es más complejo.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Remover el cloruro de sodio a partir de una disolución que simula aguas salobres mediante el método de electrodiálisis con y sin resina de intercambio iónico (catiónica-aniónica) a diferentes valores de potencial, para comparar cual método y condiciones son las más adecuadas para su desalinización.

Objetivos particulares

- Comparar el efecto de la resina de intercambio iónico en el proceso de electrodiálisis.
- Demostrar la viabilidad de la desalinización en aguas salobres por medio de electrodeionización.
- Estudiar el proceso de EDI a 2 diferentes voltajes.
- Determinar el consumo de energía durante el proceso de electrodiálisis con y sin resina de intercambio iónico.

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES

1.1 La problemática del agua

La crisis de la escases del agua en México, enfrenta problemas que obligan a hacer una administración más estricta para poder satisfacer la demanda de la mayoría de los habitantes, ya que en algunos lugares padecen de agua.

A nivel mundial se estima la disponibilidad de agua promedio anual en 1 386 billones de hectómetros cúbicos (hm^3). De ésta, 35 billones de hm^3 son agua dulce (2.5 %). Del agua dulce, el 70 % no están disponibles por encontrarse en glaciares, nieve, hielo; 10.5 millones de hm^3 se encuentran como agua subterránea, solamente 0.14 billones de hm^3 se encuentran en lagos, ríos, humedad en suelo y aire, humedales y plantas [4].

El abastecimiento del agua en México afronta diferentes problemáticas que van desde la sobreexplotación de los mantos acuíferos, los problemas en la red de distribución del agua, la contaminación y la falta de un control sobre las concesiones, incluyendo la parte agrícola.

Un remedio para esta problemática es la desalación de las aguas salobres, el cual puede ser efectuado por diferentes métodos de tratamiento sobre aguas subterráneas.

1.1.1 Aguas salobres

Se considera que el agua es salobre cuando su concentración de sales disueltas se encuentra en el intervalo de 0.5 a 30 g/L. Aunque el agua salobre puede ser de origen superficial, generalmente procede de acuíferos costeros. Los acuíferos de aguas salobres de origen fósil completamente aislados del mar, son también potencialmente útiles en la desalación [14]. La desalación se puede realizar tanto de recursos hídricos originados en agua de mar (fase salina ysalobre) como de agua subterránea con alta salinidad.

En el caso de las aguas salinas almacenadas en los acuíferos, su origen es diferente, según el acuífero este en conexión directa con el mar o que no exista en la actualidad. Este último caso puede darse tanto en zonas situados más al interior, como en las zonas costeras.

En el caso de contacto hidráulico con el mar (Figura 1.1), el agua existente en el acuífero está distribuida según su salinidad en tres zonas susceptibles de aprovechamiento: zona de agua dulce, zona de agua salobre (o interfaz) y zona de agua de mar.

Esta situación, está determinada por el estado de equilibrio entre la cota piezométrica del agua dulce del acuífero, que en condiciones naturales descarga al mar y la cota del nivel del agua de

mar. Este equilibrio está sometido a una serie de modificaciones temporales de origen natural como pueden ser las condiciones climáticas, estacionales o movimientos relativos entre la zona emergida y la línea de costa.

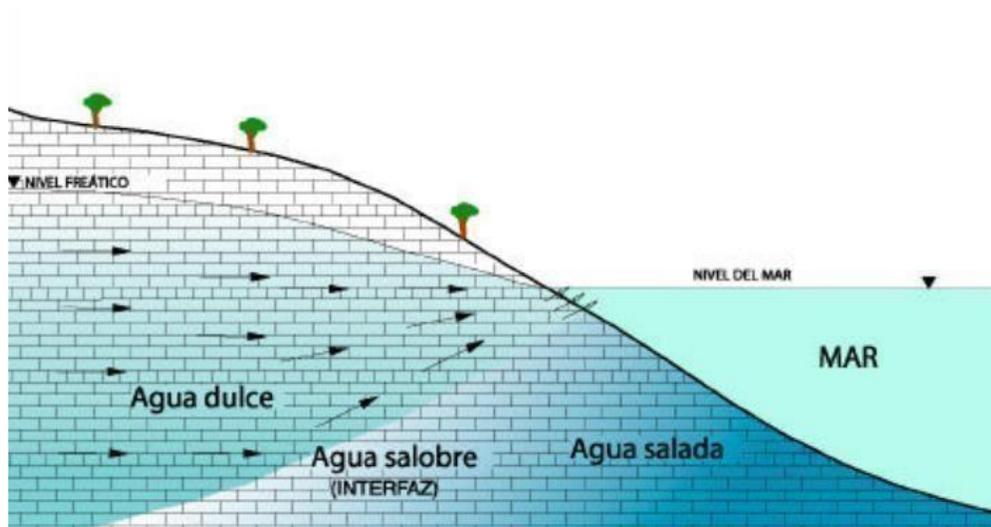


Figura 1.1 Esquema simplificado de un acuífero costero en contacto directo con el mar [13].

Debido al aprovechamiento de estos recursos (Figura 1.2) el equilibrio agua dulce– agua salada se desplaza en un sentido u otro según el tipo de afección; si la cota piezométrica en el acuífero, se sitúa por debajo de la del nivel del mar, se produce la disminución del flujo de agua dulce hacia el mar lo que favorece la entrada de agua salada hacia el acuífero, esto produce una franja en forma de cuña más ancha de mezcla entre el 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.

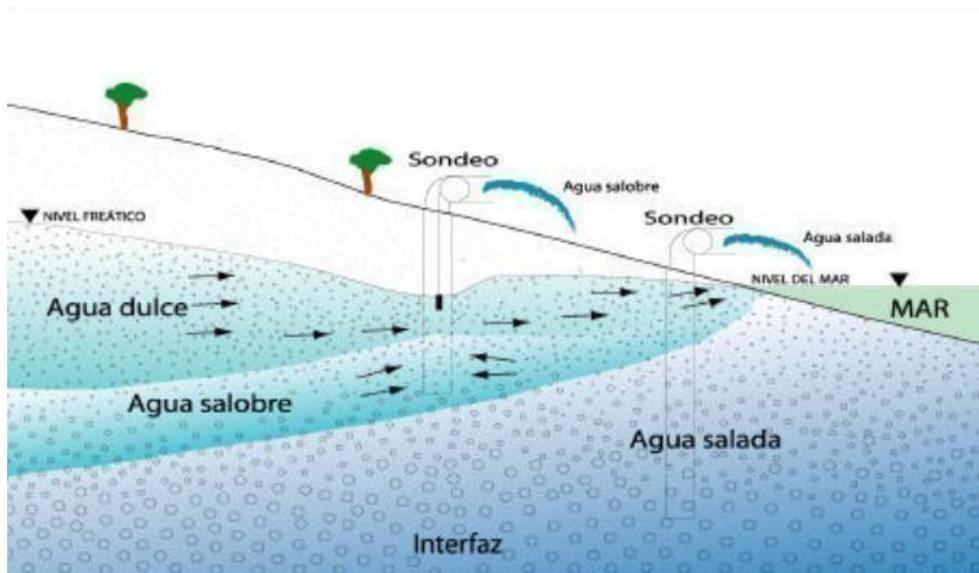


Figura 1.2 Esquema simplificado de la explotación de un acuífero costero en contacto con el mar y el efecto que crea sobre las fases [13].

Los acuíferos sin contacto hidráulico con el mar (Figura 1.3 Y 1.4) igual presentan aguas cuyas concentraciones salinas son elevadas, esto depende en función del origen y posible evolución del acuífero.

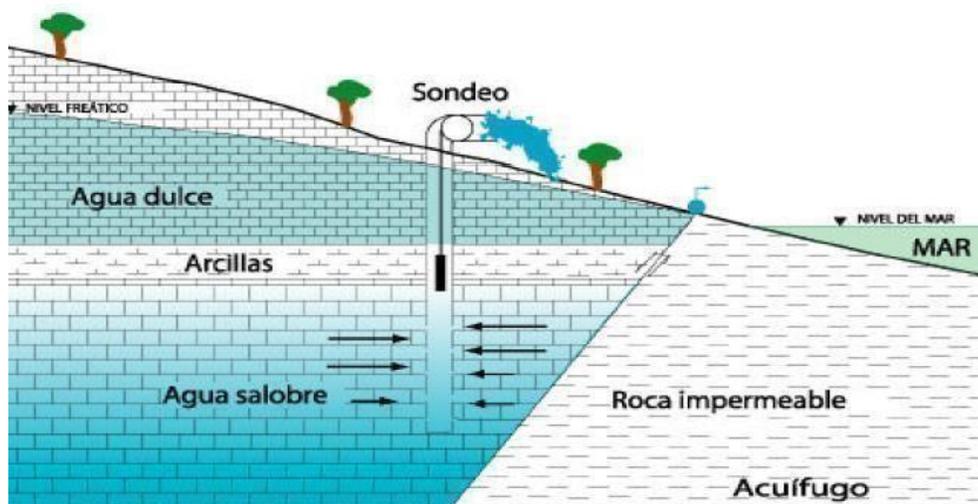


Figura 1.3 Esquema simplificado de la explotación de un acuífero costero sin conectado con el mar [13].

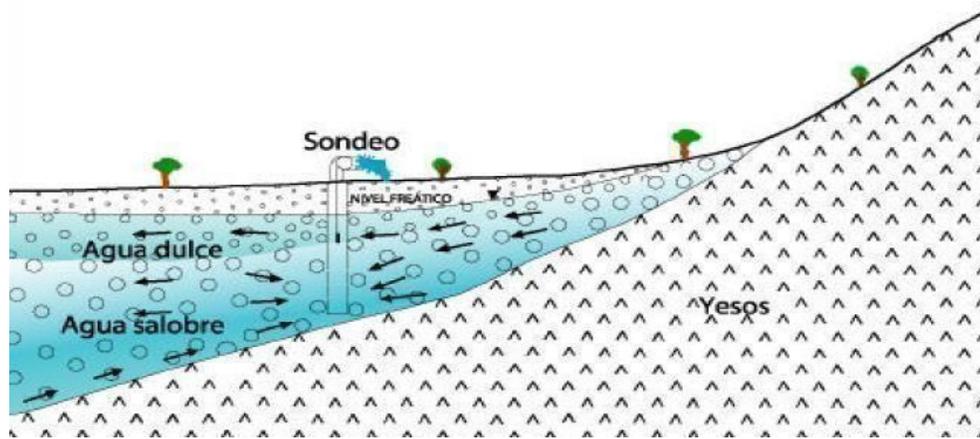


Figura 1.4 Esquema simplificado de la explotación de un acuífero salinizado situado en el interior [13].

Los acuíferos costeros se caracterizan por variación de salinidad que depende de condiciones naturales y antropológicas, donde la explotación de este recurso produce cambios en la interfaz. La extracción mediante sondeos del agua de mar, situada por debajo del muro de la interfaz, o del agua salobre, pone de relieve mayores ventajas por su menor impacto ambiental y mayor disponibilidad en comparación con la explotación con sondeo arriba de esta interfaz.

Los acuíferos con aguas salobres 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.

Un problema paralelo relacionado con los acuíferos con intrusión marina o agua salobre es sobre los acuíferos sobreexplotados, cifra que se elevó a 36 en 1981, 102 en 2011, 1060 en 2012 y el 31 de diciembre de 2016 se reportaron 105 acuíferos sobreexplotados (16.07 % de los 653 registrados en el país). Las regiones hidrológicas donde se localizan los acuíferos sobreexplotados son: Lerma-Santiago- Pacífico, Cuencas Centrales del Norte, Río Bravo, Noroeste y Península de Baja California; de estas regiones se obtiene el 58 % del agua de origen subterránea para todo tipo de uso (Figura 1.5) [15].

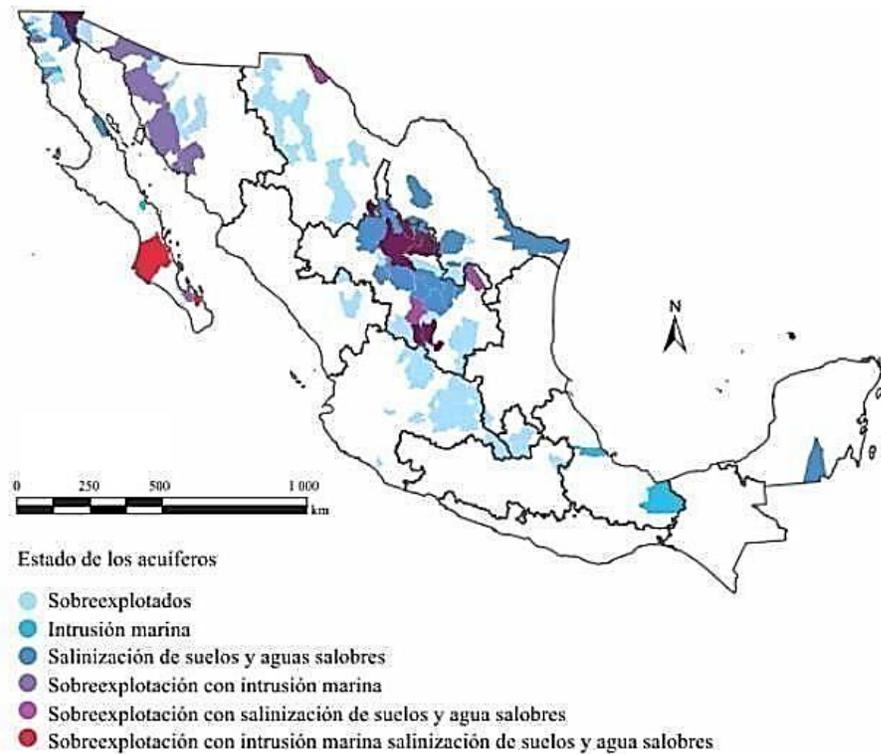


Figura 1.5 Ubicación y sobreexplotación de acuíferos en las regiones hidrológicas [15].

1.2 Proceso para remoción de sal en aguas salobres

1.2.1 Membranas

Las membranas actualmente son de gran importancia, ya que se utiliza mucho en la tecnología química y tienen una amplia gama de aplicaciones. La membrana tiene una permeabilidad selectiva (Figura 1.6), por lo cual tiene la función de delimitar y aislar estructuras determinadas. Se dice que una membrana es ideal cuando presenta una selectividad a iones específicos, deben ser semipermeables.

No se pudo dar una definición concreta la cual cumpla con todos los aspectos de una membrana. Sin embargo, Lonsdale dio una de las definiciones más completas “una membrana es un sistema de espesor muy pequeño comparado con su superficie que, cuando se interpone entre dos fases fluidas macroscópicas, ejerce un control selectivo de las transferencias de materia o de energía entre ellas” [3].

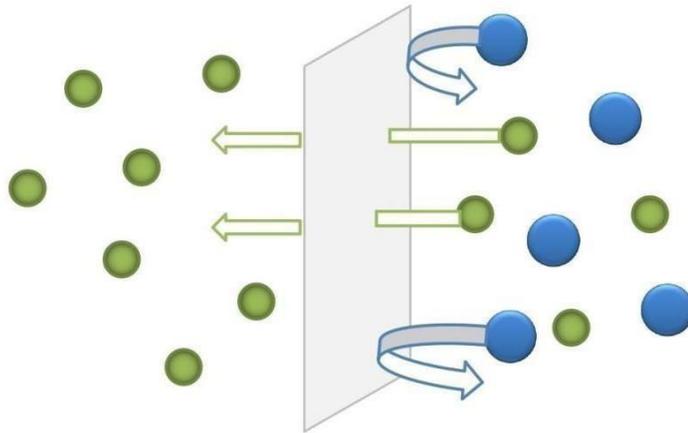


Figura 1.6 Selectividad de una membrana [Elaboración propia].

Existen membranas naturales, las cuales son creadas por la naturaleza y están operando en procesos biológicos, como las membranas celulares. También existen las membranas artificiales, las cuales son fabricadas por el hombre al igual que son aquellas que se han modificado por el hombre.

1.2.1.1 Membranas artificiales

Las membranas artificiales se pueden producir de varios materiales, ya sean orgánicos o inorgánicos, por ejemplo, la mayoría de las membranas artificiales son producidas por polímeros, que es un material orgánico, mientras que los metales, la cerámica, el vidrio son inorgánicos.

Existen varias formas de clasificar a las membranas sintéticas, por su naturaleza química, su forma, su función y tipo de modulo. En este caso nos enfocaremos más en las membranas de intercambio iónico.

1.2.1.2 Membranas de intercambio iónico

Las membranas de intercambio iónico son geles muy hinchados que contienen polímeros con una carga iónica fija. En los intersticios del polímero están los contraiones móviles. Las membranas de intercambio iónico se utilizan en la mayoría de los procesos electrodiálisis [5].

Básicamente una membrana de intercambio iónico consta de una estructura polimérica entrecruzada, que tienen fijo una gran concentración de grupos funcionales cargados, negativamente en las membranas de intercambio catiónico y positivamente en las de intercambio aniónico. El entrecruzamiento es necesario para evitar que los polímeros que portan los grupos intercambiadores se disuelvan en agua. Además, el grado de cruzamiento más utilizado es el divinilbenceno (DVB), en concreto con el vinilpoliestireno y la vinilpiridina [2].

Las membranas de este tipo tienen una elevada selectividad iónica, por lo que deben de ser altamente permeables a los contraiones e impermeables a los co-iones. La resistencia eléctrica de las membranas de intercambio iónico es de suma importancia, ya que ésta debe de ser lo más bajo posibles, esto para que el consumo de energía sea mínimo.

La resistencia eléctrica de una membrana depende básicamente de:

- Tipo de grupos de intercambiadores de iones. Los grupos poco disociados originan una mayor resistencia eléctrica.
- Grado de entrecruzamiento (Aumenta con la resistencia eléctrica, debido a la barrera en el paso de los iones, que representa el alto cruzamiento de las cadenas poliméricas en la estructura de la membrana).
- Densidad de cargas fijas en la membrana. (Disminuye al aumentar este parámetro).
- Espesor de la membrana (aumenta su resistencia eléctrica al aumentar este parámetro) [8].

Al igual una membrana debe ser mecánicamente fuerte y tener una escasa variación en su dimensión, ya que no deben de romperse, hincharse ni arrugarse por su uso constante o deformarse por la variación de temperatura. Esto depende al tipo de polímero por el que está constituida la membrana y su grado de entrecruzamiento, aunque este último afecta en la resistencia eléctrica.

Es fundamental que la resistencia química de las membranas sea alta, pues durante su aplicación se encuentran sometidas a diferentes ambientes químicos, como cambios de pH, ambientes oxidantes y/o reductores, y presencia de disolventes orgánicos. Esta propiedad depende fundamentalmente, al igual que la resistencia mecánica y dimensional, del polímero base en que están anclados los grupos intercambiadores de iones [6].

1.2.1.3 Clasificación de las membranas de intercambio

a) Por su capacidad de intercambio

- Membranas catiónicas

Las membranas de intercambio catiónico (MC) poseen grupos negativos fijos en la red polimérica, es decir, están cargadas negativamente (Figura 1.7).

El transporte de iones en una membrana de intercambio catiónico, por ejemplo, ocurre cuando los cationes móviles son atraídos por los sitios aniónicos fijos, mientras que los correspondientes contra-aniones (llamados co-iones) son excluidos, obedeciendo a un efecto de repulsión electrostática. Este efecto es llamado Exclusión de Donan [10].

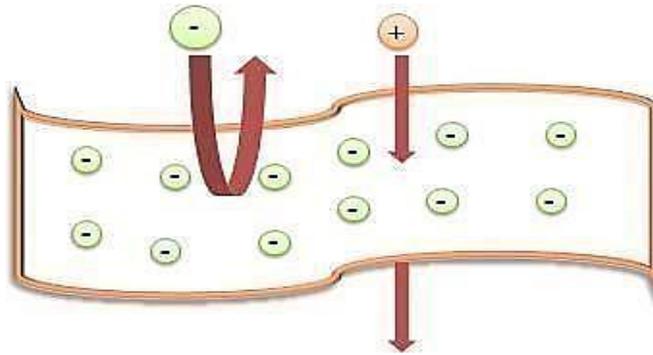


Figura 1.7 Esquema de una membrana de intercambio catiónico [Elaboración propia].

- Membranas aniónicas

Las membranas de intercambio aniónico (MA) contienen grupos positivos fijos en la red polimérica, es decir, están cargados positivamente (Figura 1.8). Las aminas cuaternarias son los principales grupos cargados en este tipo de membranas. Las membranas de intercambio aniónico están basadas en productos químicos acrílicos o de divinilbenceno estireno. Los polímeros de poliestireno-divinilbenceno son los portadores comunes de las aminas cuaternarias.

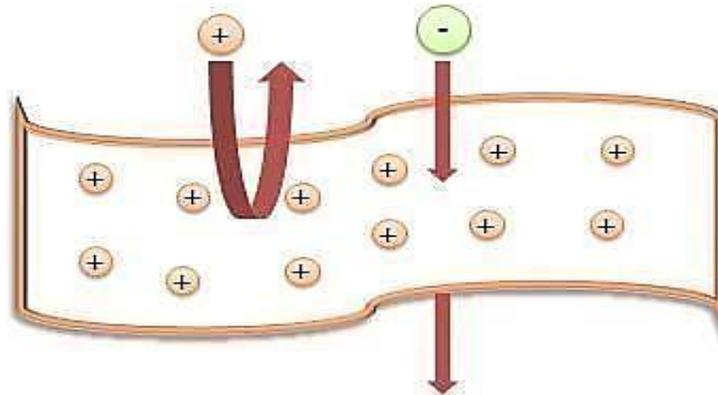


Figura 1.8 Esquema de una membrana de intercambio aniónico [Elaboración propia].

b) Por su estructura física

- Membranas homogéneas.

Las membranas homogéneas tienen propiedades uniformes en todos los puntos. Se obtienen por una reacción de condensación de polifenoles o poliaminas, el producto de la reacción es impregnado sobre un tejido sintético formando una película delgada de material intercambiador.

También pueden fabricarse por fijación de un grupo funcional fijo sobre un soporte inerte (cloruro de polivinilo, polietileno, teflón), o por inmovilización de un electrolito como en el caso del poliestireno sulfónico [11].

- Membranas heterogéneas

Estas están constituidas por dos fases poliméricas diferentes. Sus principales desventajas son; canales de flujo excesivamente grandes, alta resistencia eléctrica en disoluciones salinas diluidas, baja resistencia mecánica en su estado altamente hinchado. El excesivo tamaño en sus canales de flujo origina una elevada transferencia de agua por electro-ósmosis y una excesiva difusión de moléculas neutras entre las disoluciones separadas por la membrana [2].

1.2.2 Ósmosis inversa

La ósmosis inversa (IO), también conocida como hiperfiltración, es un proceso utilizado para remover solutos de bajo peso molecular tales como sales inorgánicas (por ejemplo, NaCl) y moléculas orgánicas pequeñas (glucosa, por ejemplo), de un solvente que por lo general es agua. Consiste en aplicar una presión (superior a la presión osmótica del sistema) en la solución con mayor contenido de sal, la cual se pone en contacto con una membrana semipermeable, esto produce la migración del agua desde el lado concentrado al lado diluido, reteniendo así la sal en la solución concentrada. El método utilizado para la remoción de sales es diferente al de la microfiltración, puesto que el mecanismo de separación entre las especies no se basa en las diferencias de tamaño entre el soluto y el solvente, sino en la solubilidad y difusividad del solvente en la membrana, es decir, las membranas utilizadas en este proceso son densas [7].

Este proceso es muy utilizado para la producción de agua potable a partir del agua de mar, compite con la destilación y la electrodiálisis, cuando la producción de agua se desea hacer a gran escala; la escogencia de uno u otro proceso depende de las condiciones existentes en el sitio en donde se desea obtener el agua potable. La presión de operación está entre los 25 y 35 bar, cuando la salinidad es de 4.5 % y la temperatura es de 30 °C. Además de la producción de agua potable a partir de agua de mar (o de aguas salobres) la ósmosis inversa se usa para: la fabricación de soluciones inyectables, la separación de virus y bacterias, la producción de agua ultra pura para diálisis renal, entre otras aplicaciones [9].

Un problema que se presenta en este proceso, es que en los poros de las membranas se pueden estancar moléculas de soluto, las cuales tengan tamaños similares al poro, además de que se necesita de altas presiones.

1.2.3 Intercambio iónico

Este proceso consiste en aprovechar la capacidad que tiene las resinas de intercambiar iones entre una fase sólida y una fase líquida en forma reversible, es decir que regresa a su estado original y sin cambio permanente en la estructura del sólido.

Generalmente, la gran utilidad del intercambio iónico (IX) descansa en el hecho de usar una y otra vez los materiales de intercambio iónico puesto que el material intercambiador puede ser regenerado ya que el cambio que sufre en la “fase de operación” no es permanente.

La parte de los intercambiadores iónicos comerciales son de material plástico sintético, como polímeros de estireno y divinilbenceno. Los intercambiadores iónicos para el tratamiento de agua son: en esencia insoluble y su vida útil esperada es de 5 a 10 años [12].

Los intercambiadores iónicos son matrices sólidas que contienen sitios activos (también llamados grupos ionogénicos) con carga electrostática, positiva o negativa, neutralizada por un ion de carga opuesta (contraión). En estos sitios activos tiene lugar la reacción de intercambio iónico.

A medida que la disolución pasa a través de la resina, los iones presentes en dicha disolución desplazan a los que estaban originariamente en los sitios activos. La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ion en particular, el pH de la disolución, si el grupo activo tiene carácter ácido o básico, la concentración de iones o la temperatura etc. Es obvio que para que tenga lugar el intercambio iónico, los iones deben moverse de la disolución a la resina y viceversa.

A medida que la disolución pasa a través de la resina, los iones presentes en dicha disolución desplazan a los que estaban originariamente en los sitios activos. La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ion en particular, el pH de la disolución, si el grupo activo tiene carácter ácido o básico, la concentración de iones o la temperatura etc. Es obvio que para que tenga lugar el intercambio iónico, los iones deben moverse de la disolución a la resina y viceversa.

Esta reacción de intercambio iónico en la matriz se puede ilustrar con la siguiente ecuación (ecuación 1.1) tomando como ejemplo el intercambio entre el protón, H^+ , que se encuentra en los sitios activos de la matriz R, y el ion Na^+ , presente en la disolución que contacta dicha matriz [12].



1.2.4 Resina

En el sentido más amplio de la palabra, una resina sintética consiste en una red de radicales hidrocarburos a los cuales están unidos grupos funcionales iónicos solubles. Las moléculas de hidrocarburos están unidas transversalmente formando una matriz tridimensional que imparte una insolubilidad y tenacidad global a la resina. La extensión, o grado de reticulación, determina la estructura porosa interna de la resina, y ésta no debe ser tan grande que restrinja el movimiento libre de los iones cambiables. Como los iones deben difundir dentro y fuera de la resina para que ocurra el intercambio, los iones de tamaño superior a uno dado pueden ser excluidos de la reacción mediante una selección adecuada del grado de reticulación.

Generalmente se presentan en el comercio como minúsculas perlas sintéticas. Estas bolitas son porosas y contienen agua, que es invisible y no se puede eliminar. Esta proporción de agua presente en las resinas de intercambio iónico se denomina como "retención de humedad". La estructura de la resina es un polímero (como todos los plásticos) en la cual un ion fijo, ha sido inmovilizado de manera permanente. Este ion no se puede eliminar o reemplazar ya que pertenece a la estructura de la resina. Para mantener la neutralidad eléctrica de la resina, cada uno de estos iones fijos están neutralizados por un contra- ion de carga opuesta. Éste es móvil y puede entrar o salir de la resina.

La figura 1.9 representa esquemáticamente perlas de resinas intercambiadoras de cationes y aniones. Las líneas oscuras representan el esqueleto polimérico de la resina: es poroso y contiene agua. Los iones fijos de la resina intercambiadora de cationes son sulfonatos (SO_3^-) atados al esqueleto. En esta imagen, los iones móviles son los cationes hidrógeno (H^+).

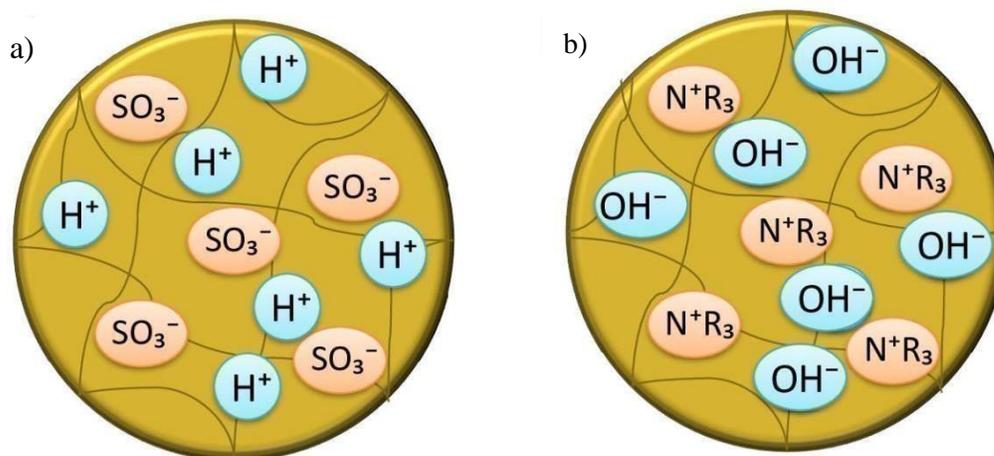


Figura 1.9 Representación esquemática de resinas de intercambio iónico. a) resina de intercambio catiónico, b) resina de intercambio aniónico [Elaboración propia].

1.2.5 Electrodiálisis

Morse y Pierce introdujeron un par de electrodos en una celda de diálisis de esta manera pudieron acelerar la separación de electrolitos en una solución de gelatina. A principios del siglo XIX se remontó los usos de la electrodiálisis por Schwein, utilizando la electrodiálisis para purificar extractos azucareros [16].

La electrodiálisis es una tecnología de membrana que permite, bajo la influencia de un campo eléctrico continuo, extraer sustancias orgánicas e inorgánicas ionizadas disueltas en una disolución acuosa, a través de membranas selectivas de intercambio iónico [2].

Este proceso de separación se lleva a cabo en un equipo en forma de filtro prensa formado por compartimientos delgados entre un par de electrodos que generan una diferencia de potencial y hacen posible el movimiento de los iones. Estos compartimientos están formados por membranas de intercambio catiónico y aniónico colocados intercaladamente, las primeras permiten el paso a cationes y las segundas a aniones, de esta forma, algunos compartimientos van quedándose sin iones (diluido) y otros compartimientos van teniendo cada vez mayor cantidad de iones (concentrado).

En la figura 1.10 se esquematiza una unidad de electrodiálisis, el arreglo típico de una celda de electrodiálisis está constituido por los dos electrodos, los compartimientos de enjuagues de los electrodos, y el arreglo alternado de membrana catiónica-membrana aniónica que forman los compartimientos por los cuales se alimenta la solución a tratar. En la figura 1.10 se denomina como solución diluida, a la corriente que pierde iones en el proceso de electrodiálisis, al aplicar una diferencia de potencial eléctrico a la celda. Y se identifica como solución concentrada, a la corriente que gana iones. Los aniones viajan en dirección al ánodo solo a través de las membranas aniónicas y los cationes viajan en dirección al cátodo a través de las membranas catiónicas [17].

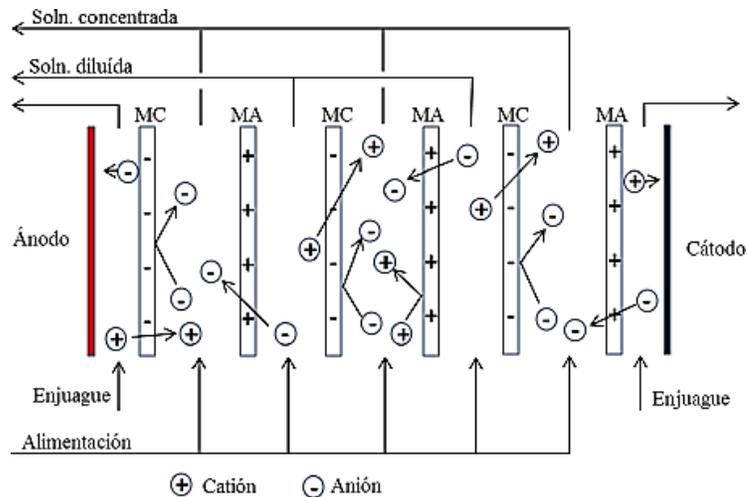


Figura 1.10 Arreglo típico del proceso de electrodiálisis para potabilización de agua. Membrana Catiónica (MC) y Membrana Aniónica (MA) [17]

Al aplicarse una diferencia de potencial eléctrico en los electrodos causa una corriente eléctrica que pasa a través de la disolución, lo cual fuerza la migración de los aniones hacia el cátodo y ánodo, donde los cationes van hacia el cátodo (electrodo negativo) y viceversa, esto a través de las membrana de intercambio iónico, las membrana de intercambio catiónico solamente seden el paso a los iones con cargas positivas, así como las membrana de intercambio aniónico solo permiten el paso a los iones negativos, estas membranas están alternadas entre los electrodos, de esta manera se obtienen compartimientos con solución diluida y concentrada. En los compartimientos donde se encuentran los electrodos circula una solución de electrolito conocida como enjuague.

La principal aplicación y más importante de la electrodiálisis es la desalinización de aguas salobres. Este proceso ha demostrado ser más barato, esto no solo es rentable desde una perspectiva económica, sino también desde el punto de vista ambiental.

La electrodiálisis es usada también para:

- Concentración de agua marina.
- Desmineralización de suero.
- Recuperación de metales y aguas de lavado de electrodeposición.
- Desalación de purga de agua de fibra de refrigeración.
- Desmineralización del vino.
- Desmineralización del azúcar.

1.2.6 Electrodeionización

La EDI surge como una solución al problema que se presenta durante la ED, el problema ocasionado por la ED es el fenómeno de polarización por concentración, esto ocasiona una alta resistencia eléctrica dentro de la celda haciendo que disminuya su eficiencia, debido a esto, para solucionar el problema ocasionado, se incluyó a la ED un lecho de resina de intercambio iónico en el compartimiento a diluir de la celda, empaquetada en un espacio entre una membrana de intercambio catiónico y una membrana de intercambio aniónico.

La electrodeionización es una combinación de electrodiálisis e intercambio iónico, la cual su función es eliminar de manera efectiva los iones del agua.

La resina de intercambio iónico en la electrodeionización elimina los cationes y aniones impuros del agua de alimentación. La corriente eléctrica fluye continuamente sobre el sistema, regenera las resinas de intercambio iónico. La continua regeneración permite producir un agua de alta calidad sin las periódicas paradas y regeneraciones que requiere un equipo convencional de intercambio iónico.

El agua que se va a purificar se denomina agua diluida o agua de alimentación y fluye a través de las cámaras de dilución. Estas cámaras contienen resinas de intercambio catión-anión,

similares a las que se encuentran en un intercambio iónico de lecho mixto convencional.

Una corriente continua discurre por todo el sistema mediante un cátodo y un ánodo localizados en los extremos. El cátodo atrae a los cationes capturados en las resinas de intercambio iónico, mientras que el ánodo atrae a los aniones. Los iones viajan a través de las resinas hacia sus respectivos electrodos. Los iones son conducidos por la diferencia de potencial eléctrico a través de las membranas de intercambio iónico a las cámaras de concentrado.

La corriente aplicada también produce una hidrólisis del agua que genera iones H^+ e iones OH^- . Estos iones regeneran continuamente las resinas de intercambio iónico, de tal manera que continúan eliminando impurezas del agua de alimentación. Las sales extraídas de las resinas son adsorbidas por otra resina de intercambio iónico adyacente para continuar su camino/desplazamiento hacia la cámara de concentrado.

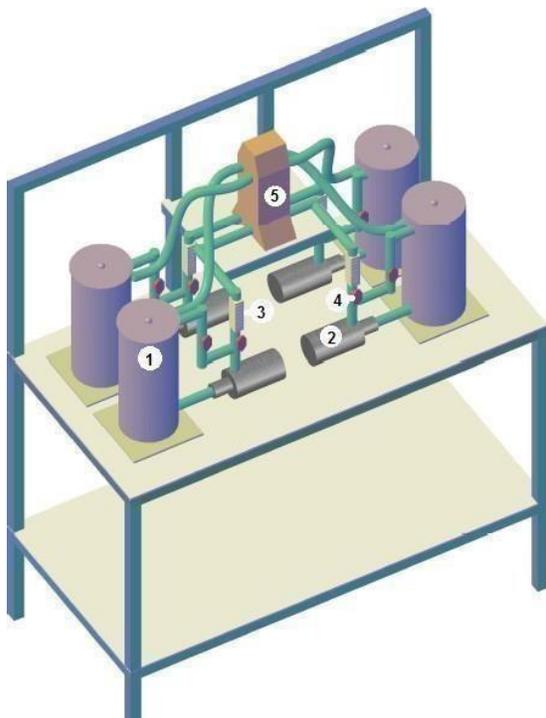
Una vez que los iones están en la cámara de concentrado, no pueden volver a la cámara de dilución. La cámara de concentrado está formada por una membrana catiónica y una membrana aniónica. Los cationes entran en la cámara de concentrado pasando a través de la membrana catiónica. Una vez en la cámara de concentrado, los cationes pasan por la cámara de concentrado y a veces se encuentran con la membrana aniónica. La membrana aniónica rechaza los cationes, atrapándolos eficazmente en la cámara de concentrado. El mismo proceso ocurre con los aniones. Los iones capturados son conducidos fuera del sistema [18].

CAPÍTULO II: PROCEDIMIENTO: CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR Y SU MONTAJE

Para la elaboración de la presente investigación se utilizaron diversos equipos para conformar el sistema de electrodiálisis como se muestra en la figura 2.1.

2.1 Equipo

Para la medición, el control de la condición y el seguimiento de la experimentación, se utilizaron diversos equipos. Estos equipos miden el pH, la conductividad, la intensidad de corriente, además de proporcionar el potencial para el funcionamiento de la celda.



N°	
1	Recipiente de acrílico con capacidad de 4 litros con tapa macho (4 piezas)
2	Bomba centrífuga de marca Little Giant Pump type U21 de 1/6 HP (4 piezas)
3	Rotámetro de plástico marca OMEGA con capacidad de 0 a 20 GPH (4 piezas)
4	Válvulas (12 piezas)
5	Celda de ED

Figura 2.1 Esquema de los componentes que conforman el sistema de electrodeionización [Elaboración propia].

2.1.1 Fuente de poder

La fuente de poder convierte la corriente alterna (AC) a corriente directa (DC), la cual es la que necesita la celda de electrodiálisis, al igual que se puede tener un control del voltaje que se le suministra, en este caso se impuso una corriente de 7 y 14 V con un B&K Precision 1672 con Triple Salida Display Quad es el equipo que se utilizó para la fuente de alimentación (figura 2.2).



Figura 2.2 Fuente de poder B&K Precision 1672.
[Tomada por la autora].

2.1.2 Multímetro

La función del multímetro es permitirnos medir las magnitudes eléctricas que se le suministran a la celda y que forman parte del circuito. Multímetro que se utilizó fue digital de alta impedancia de 6 1/2 dígitos 34410A de Agilent (figura 2.3).



Figura 2.3 Multímetro digital Agilent [Tomada por la autora]

2.1.3 Kit de medidor multiparamétrico

En todo el trascurso de la experimentación se llevó a cabo la medición de pH y conductividad con un medidor portátil de la marca OAKTON (mostrado en la figura 2.4), el cual contiene orificios en la parte superior en la cuales van las conexiones de los electrodos.

Figura 2.4 Kit de medidor multiparamétrico [Tomada por el autor].



Al igual incluye dos electrodos para medir la conductividad y el pH (figura 2.5), los cuales contienen dos soluciones para calibrar el equipo.



Figura 2.5 Electrodo y sus soluciones para la calibración [Tomada por la autora].

2.2 Componentes de la celda

La celda de electrodiálisis con o sin resina de intercambio iónico, está compuesta de dos tapas prensas construidas de acero inoxidable 316, dos tapas de conexiones de polipropileno, dos electrodos, uno de acero inoxidable 316 y el otro de titanio con recubrimiento electrocatalítico, cuatro espaciadores, tres juntas de teflón, cuatro juntas de neopreno y tres membranas como se muestra en la figura 2.6.

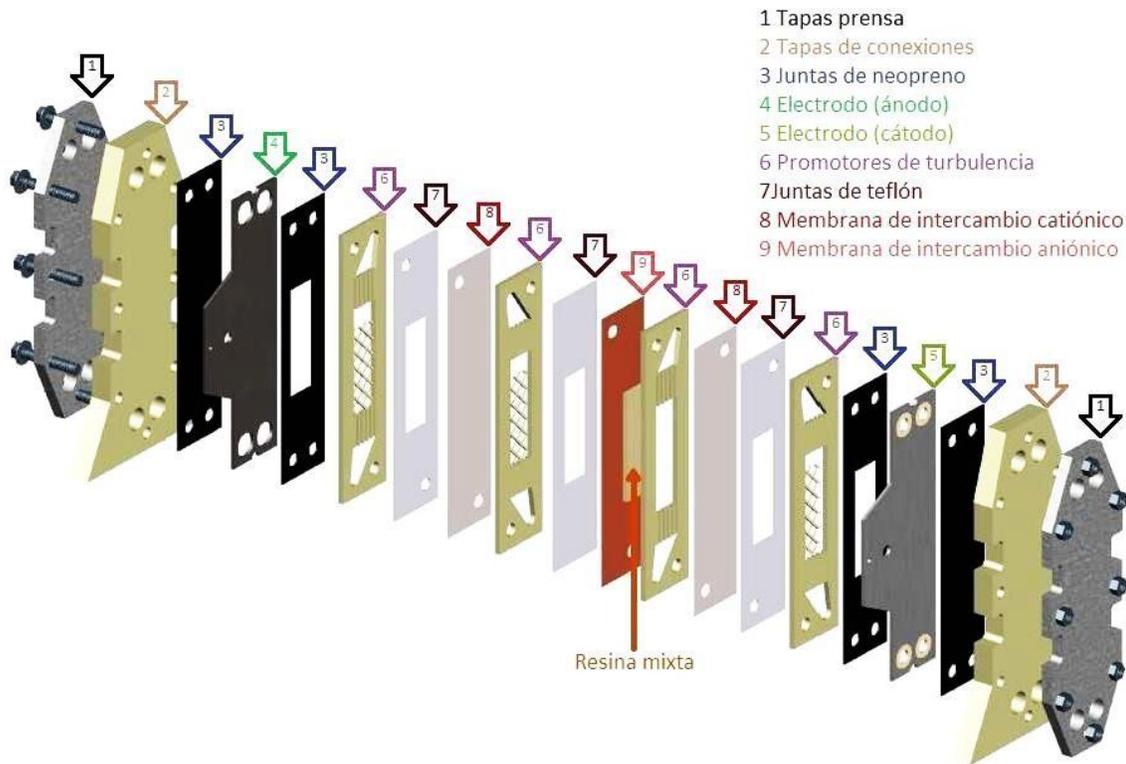


Figura 2.6 Componentes y arreglo de la celda de electrodeionización [Elaboración propia].

2.2.1 Tapas prensa

Las tapas prensa de acero inoxidable tienen la función de crear presión en la celda, de tal forma todos los componentes que forman la celda se sellan haciendo que quede compacto y no haya ninguna fuga.

Las medidas de las tapas constan con un espesor de 1.29 cm, una altura de 28 cm y una anchura de 9.8 cm, al igual que cuenta con 4 barrenos de $\frac{3}{4}$ " con un diámetro de 1.87 cm y 8 barrenos de $\frac{11}{32}$ " con un diámetro de 0.87 cm (figura 2.7).



Figura 2.7 Tapa prensa de acero inoxidable [Tomada por la autora].

2.2.2 Tapas de conexión

La función que tienen estas tapas de conexión es la de separar los electrodos y los electrolitos de las tapas prensa, además de que provee las conexiones para la entrada y salida de las soluciones.

Estas tapas tienen un espesor de 1.25 cm, una altura de 28 cm, una anchura en la parte superior de 9.8 cm y en la parte inferior una anchura de 15 cm, también cuenta con 4 entradas hembra de $\frac{3}{8}$ " NPT y 8 barrenos de $\frac{11}{32}$ ". Estas tapas están hechas de polipropileno.



Figura 2.8 Tapa de conexión [Tomada por la autora].

2.2.3 Juntas

Las juntas tienen como finalidad el sellar las uniones entre compartimientos, así como de dirigir el flujo, esto se debe a las perforaciones que tienen, éstas permiten el paso de la solución hacia el interior de los compartimientos, el corte en el centro de algunas juntas permite el paso de los iones de un compartimiento a otro a través de las membranas, las que no contienen este corte son para sellar los electrodos, así como hay juntas sin las perforaciones, éstas son para impedir el paso del flujo.

Hay 4 diferentes tipos de juntas con respecto al diseño y hay dos diferentes con respecto al material, de neopreno (figura 2.9) y de teflón (2.10). Los cuatro tipos diferentes de juntas tienen las mismas medidas de espesor que es aproximadamente de 0.1 cm, una altura de 25 cm y una anchura de 6 cm y el diámetro de las perforaciones es de 1.2 cm.



Figura 2.9 Junta de neopreno [Tomada por la autora].



Figura 2.10 Junta de teflón [Tomada por la autora].

2.2.4 Electrodo

Son materiales conductores de la electricidad, a través de los cuales se lleva la transferencia eléctrica con la disolución. En ED su función se limita a la de proporcionar el campo eléctrico necesario para que se produzca el proceso [20]. La atracción que se genera en los iones dentro de la celda es debido a los electrodos, en la cual la reducción se lleva a cabo en el cátodo y la oxidación ocurre en el ánodo.

El ánodo es de titanio platinizado (figura 2.11) y el cátodo es de acero inoxidable (figura 2.12), cada uno con 30 cm² de área expuesta. Cada electrodo, tienen 4 barrenos de 2.4 cm de diámetro, una altura de 25 cm, consta de dos anchuras, una de ellas es de 6 cm y la otra es de 10 cm.



Figura 2.11 Electrodo de titanio platinizado [Tomada por la autora].



Figura 2.12 Electrodo de acero inoxidable [Tomado por la autora].

2.2.5 Espaciadores

Los espaciadores mantienen un flujo homogéneo al paso de la solución y controlan la distribución del flujo de la entrada y salida de los compartimientos, otra de sus funciones es separar una membrana de otra. Las perforaciones permiten el paso del líquido al siguiente compartimiento.

Los espaciadores están hechos de polipropileno, con un espesor de 0.5 cm, y un diámetro en las perforaciones de 1.28 cm, con una altura de 25 cm, una anchura de 6 cm y los detalles geométricos miden 0.2 cm al igual que la distancia entre cada uno de ellos (figura 2.13).



Figura 2.13 Espaciadores [Tomada por la autora].

2.2.6 Promotores de turbulencia

Están formados por redes de materiales poliméricos localizados entre las membranas, de tal forma que el electrolito fluya a través de ellos, la principal función de los promotores de turbulencia es promover la turbulencia del electrolito y en consecuencia favorezca la transferencia de masa, además que de igual forma ayuda a que las membranas queden compactas. Hay dos promotores de turbulencia, uno de ellos va en la entrada y salida del espaciador y el otro va en el centro del espaciador. Tienen un espesor de 0.45 cm, una anchura de 3.19 cm y una altura de 9.35 cm (figura 2.14).

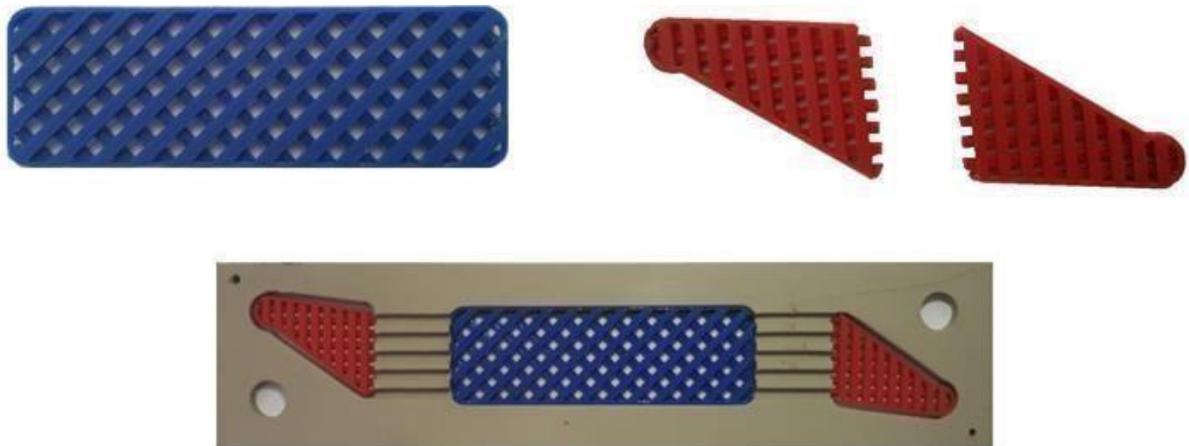


Figura 2.14 Promotores de turbulencia y colocados en los espaciadores [Tomada por la autora].

2.2.7 Membranas

Las membranas son una película fina de material polimérico, en la cual su principal función es separar los iones, esto depende de la membrana, si es catiónica o aniónica, la membrana catiónica sede el paso a los sodios e impide el paso a los cloruros, mientras que en el caso la membrana aniónica sucede lo viceversa.

Las membranas aniónicas (figura 2.16) y catiónicas (figura 2.15) tienen una altura de 25 cm, una anchura de 6 cm y un área de 30 cm² expuesta a la solución. La membrana aniónica es de Selemonio, AMW, con un espesor de membrana húmeda de 0.051 cm, mientras que la membrana catiónica es de Nafion de Dupont, N-2030, con un espesor de membrana húmeda de 0.021 cm.



Figura 2.15 Membrana de intercambio catiónico [Tomada por la autora].

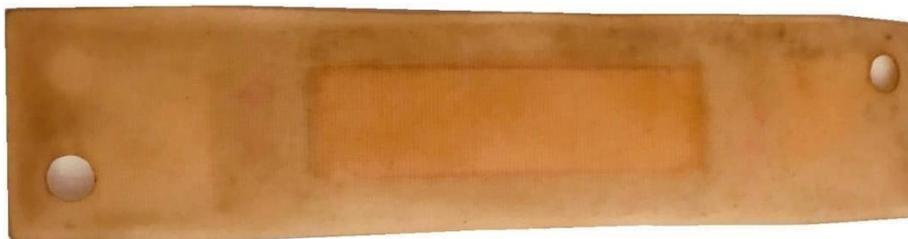


Figura 2.16 Membrana de intercambio aniónico [Tomada por la autora].

2.2.8 Resina de intercambio iónico

La función de la resina catiónica-aniónica es llevar el proceso de intercambio iónico, ayudando a una mejor remoción de los iones; ésta se regenera.

Ya que es un lecho de resina de intercambio catiónico y resina de intercambio aniónico, está compuesto de una mezcla de resina en las mismas proporciones, una parte de resina aniónica M-500 la cual en su forma inicial se encuentra Cl⁻, y otra parte de resina catiónica S 100, esta se encuentra con su forma inicial Na⁺, ambas resinas son producidas por Bayer, marca Lewatit (figura 2.17).



Figura 2.17 Resina de intercambio iónico catiónica-aniónica [Tomada por la autora].

PRODUCT INFORMATION
LEWATIT® MonoPlus M 500



General Description

Ionic form as shipped	CL-
Functional group	quaternary amine, type I
Matrix	crosslinked polystyrene
Structure	gel type beads
Appearance	yellow, translucent

Figura 2.18 Información de resina de intercambio aniónico M 500 [19].

PRODUCT INFORMATION
LEWATIT® MonoPlus S 100



General Description

Ionic form as shipped	Na+
Functional group	sulfonic acid
Matrix	crosslinked polystyrene
Structure	gel type beads
Appearance	brown, translucent

Figura 2.19 Información de resina de intercambio catiónico S 100 [20].

CAPÍTULO III: MÉTODOS Y CONDICIONES

Para llevar a cabo la investigación experimental, se realizaron 4 experimentaciones con algunas diferentes variables en cada uno. En cada experimento se utilizó el mismo flujo de 8 gal h⁻¹ (GPH) y la misma concentración (0.01M) de NaCl y NaNO₃, al igual que el mismo tiempo de experimentación, las cuales fueron de 3 horas. Las variables diferentes que se hicieron fue el potencial, que se utilizó de 7 V y 14 V a corriente directa, este potencial se utilizó con y sin resina de intercambio iónico. Los potenciales se eligieron con respecto a trabajos ya realizados con anterioridad sobre las celdas de electrodeionización [1], ya que valores muy bajos no presentarían cambios significativos en las concentraciones de las soluciones y a valores muy altos se pueden dañar las membranas o la resina.

3.1 Arreglo y proceso de la remoción de sal mediante EDI

El diseño de ED construido, está formado principalmente por una fuente de poder, un multímetro, una celda, cuatro bombas y cuatro recipientes, de los cuales sólo se utilizaron tres, el recipiente 1 y 2 contenían 1.5 L de NaCl a 0.01 M, mientras que en el recipiente 3 contenía 1.5 L de la solución de enjuague de NaNO₃ a 0.01 M, los cuales estaban conectados a la celda como se muestran en la figura 3.1.

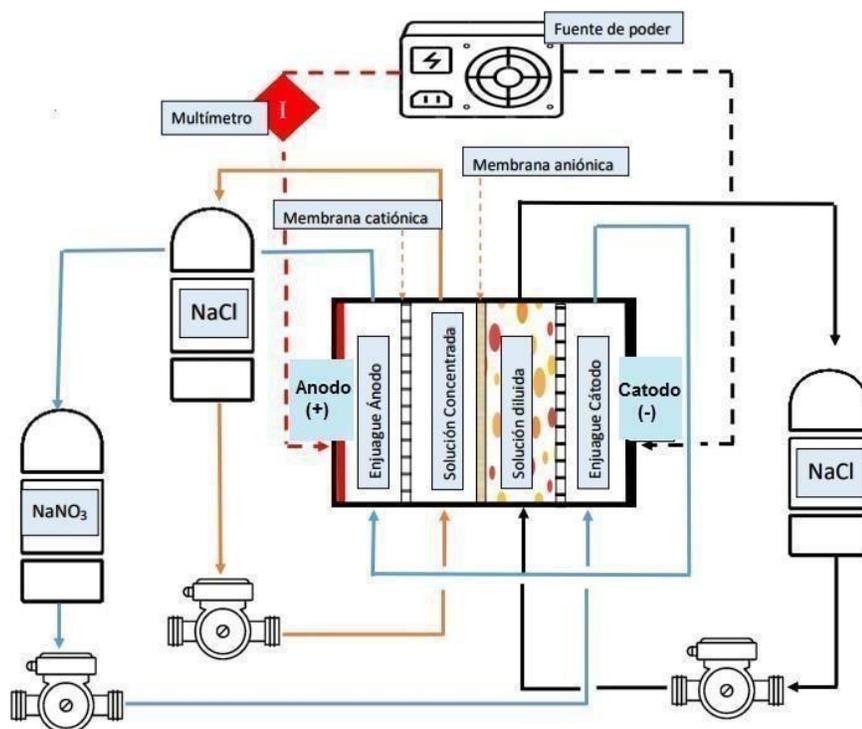


Figura 3.1 Esquema del sistema de electrodeionización y sus conexiones [Elaboración propia].

En donde las soluciones de NaCl estaban conectadas al centro de la celda, es decir, en los dos espaciadores internos, mientras que la solución de enjuague pasaba por los dos espaciadores externos, en los cuales su entrada y salida están cruzadas (figura 3.2).

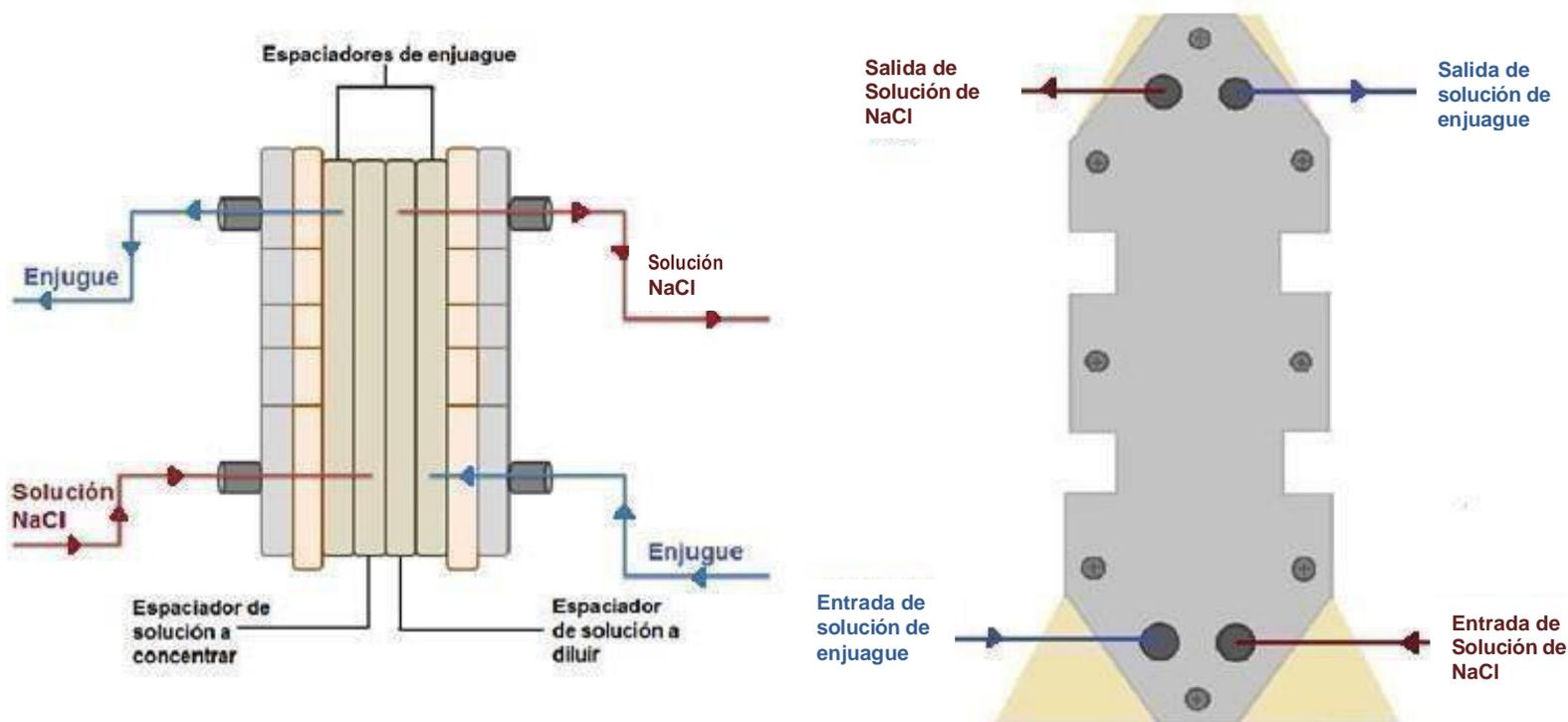


Figura 3.2 Esquema de las conexiones de las soluciones de la celda [Elaboración propia].

El agua de alimentación es una solución que fue preparada de NaCl a 0.01 M (0.5844 g/L NaCl) como simulador de agua salobre, ésta fluye a través de los dos espaciadores internos, en donde el agua a diluir, su espaciador contiene resina de intercambio aniónica- catiónica.

El agua de alimentación y la del enjuague al fluir por todo el sistema, se aplicó una corriente eléctrica a los electrodos que pasa a través de la disolución, forzando a la migración de los iones, donde los iones viajan a través de la resina hacia sus respectivos electrodos, el cátodo atrae a los cationes capturados en la resina y el ánodo atrae a los aniones, esto a través de las membranas de intercambio iónico, donde la membrana catiónica solo sede el paso a los iones con carga positiva (Na^+), mientras que la membrana aniónica sede el paso solamente a los iones con cargas negativas (Cl^-), donde estos iones son conducidos a la cámara de concentración, la cual se obtiene por la alteración de las membranas en los espaciadores, obteniendo así un compartimiento con solución diluida y otro de solución concentrada. Así como se muestra en la figura 3.3.

Al igual se produce una hidrólisis del agua debido a la corriente aplicada a la celda, produciendo iones OH^- y H^+ , los cuales regeneran continuamente la resina de intercambio iónico, haciendo que sea continua la remoción de la sal en el agua de alimentación.

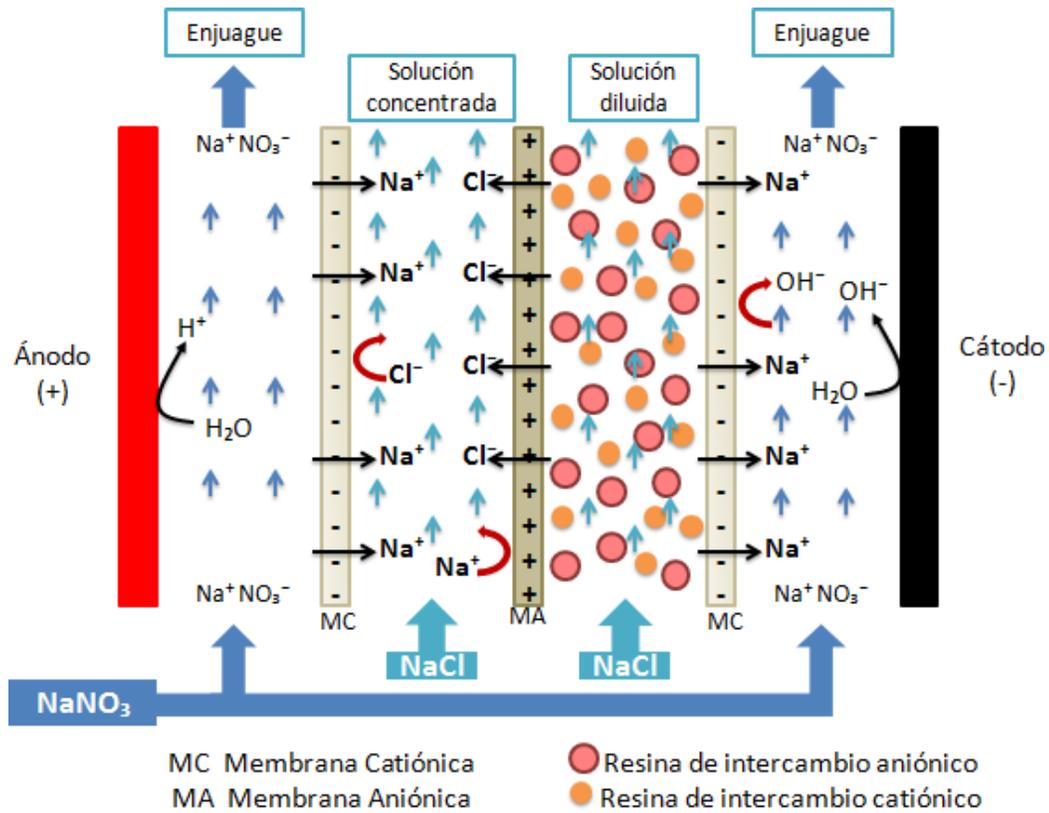


Figura 3.3 Esquema del interior de la celda de EDI y como se lleva a cabo el transporte de iones [Elaboración propia].

Teniendo en cuenta que los iones se encuentran en la cámara de concentrado, éstos no pueden volver a la cámara de dilución, ya que ésta está conformada por dos membranas de intercambio iónico, una cationica y otra aniónica. Ya que al entrar los cationes a la cámara de concentrado a través de la membrana cationica se llegan a encontrar con la membrana aniónica, la cual rechaza a los cationes atrapándolos en la cámara de concentración, al igual este procedimiento ocurre con los aniones. Estos iones son alojados fuera del sistema llevándolos al recipiente 2, mientras que la solución a diluir se aloja al recipiente 1. En los compartimentos donde se encuentran los electrodos circula una solución de electrolito conocida como enjuague.

Toma de muestra

Así como se muestra en la figura 3.4, se tomaron muestras en los recipientes a concentrar y a diluir por la válvula que se encuentran debajo de éstos, las cuales se volvían agregar al mismo recipiente, nuevamente se tomaban las muestras, de la cual, a partir de esa, se tomaron los analitos a cuantificar su concentración de iones cloruro e iones sodio.

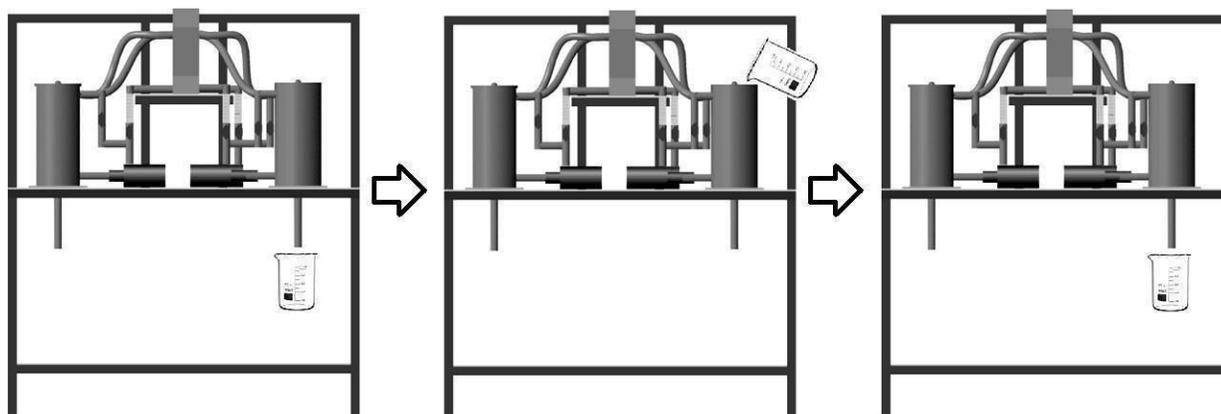


Figura 3.4 Procedimiento de toma de muestra [Elaboración propia].

3.2 Cuantificación de iones cloruro

Para la determinación de concentración de iones cloruro en ambos recipientes, fue a través del método argentométrico. Este método se basa en una valoración en la cual se utiliza como solución patrón el nitrato de plata y como indicador cromato de potasio. Esta valoración es de precipitación, la cual es un método ya establecido en: Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, Ediciones Díaz de Santos, S. A., 17 Edición, 1992.

Utilizando una micropipeta se tomó 1 mL de muestra de cada recipiente, este procedimiento se realizó cada 20 min.

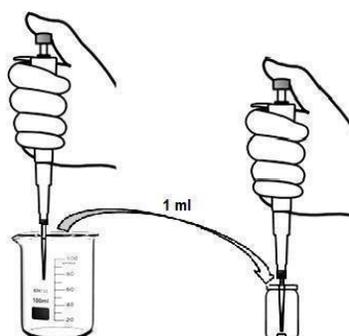


Figura 3.5 Preparación de muestra para valoración [Elaboración propia].

Posteriormente se valoró con dicho método (montaje mostrado en la figura 3.6).

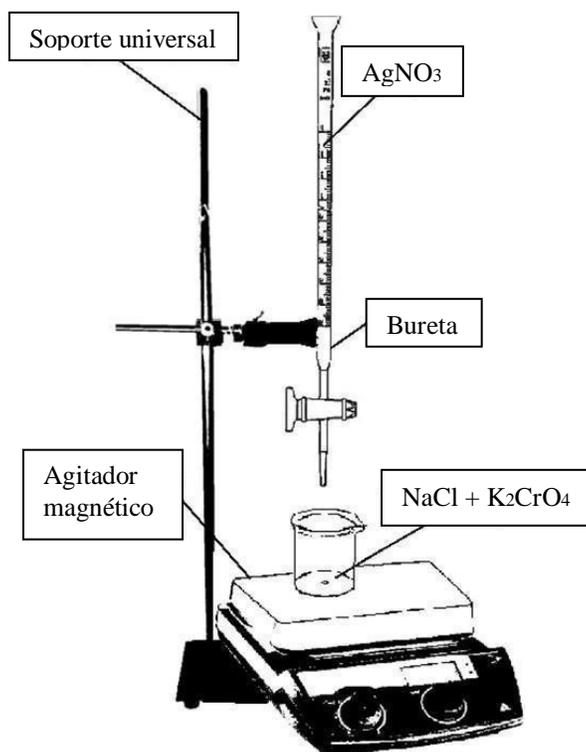
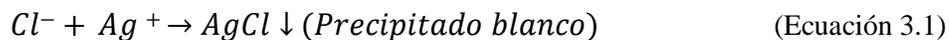


Figura 3.6 Montaje del método argentométrico [Elaboración propia].

Al inicio la muestra era incolora, pero al agregarle una gota del indicador cromato de potasio se torna de un color amarillo, esto es debido a que el indicador es de color amarillo. Se le agregó lentamente la solución patrón a la muestra, con constante agitación, donde la plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata (ecuación 3.1), en las inmediaciones del punto de equivalencia al agotarse el ion cloruro, empieza la precipitación del cromato (ecuación 3.2). La formación de cromato de plata puede identificarse por el cambio de color de la disolución a anaranjado-rojizo, así como en la forma del precipitado. En este momento se dio por terminada la valoración. Al terminar la valoración, los residuos formados, se almacenaron en un frasco previamente etiquetado.

Las reacciones que ocurren en la determinación de iones cloruro son:



Precipitación de cloruros con plata en el método argentométrico.



Precipitación de la plata concromato como indicador.

3.3 Cuantificación de iones sodio

La técnica de espectrofotometría de absorción atómica consiste en transformar la muestra problema (que puede encontrarse en disolución o sólida) en átomos en estado de vapor y medir la radiación electromagnética absorbida por dichos átomos.

La absorción atómica es el proceso que ocurre cuando átomos de un elemento en estado fundamental absorben energía radiante a una longitud de onda específica. La cantidad de radiación absorbida aumenta al incrementar el número de átomos del elemento presentes en el “camino óptico”, esto permite utilizar a la absorción atómica con fines cuantitativos. Este método puede detectar cantidades tan bajas como 10^{-14} gramos [21].

La absorción de radiación por átomos libres involucra una transición de estos átomos desde el altamente poblado estado basal hasta un estado electrónico excitado. El equipo que se utilizó se muestra en la figura 3.7.



Figura 3.7 Espectrómetro de absorción atómica utilizado en la cuantificación de iones Na^+ [Elaboración propia].

Los equipos que hacen estos análisis se componen como se muestra en la figura 3.8 de:

- Una fuente de radiación: emite la línea espectral del elemento de interés.
- Un sistema de atomización (nebulizador): para suministrar energía suficiente para disociar al analito y formar átomos libres.
- Un monocromador: para aislar la línea espectral medida.
- Un detector: acoplado con un sistema medidor o de registro de los datos obtenidos.

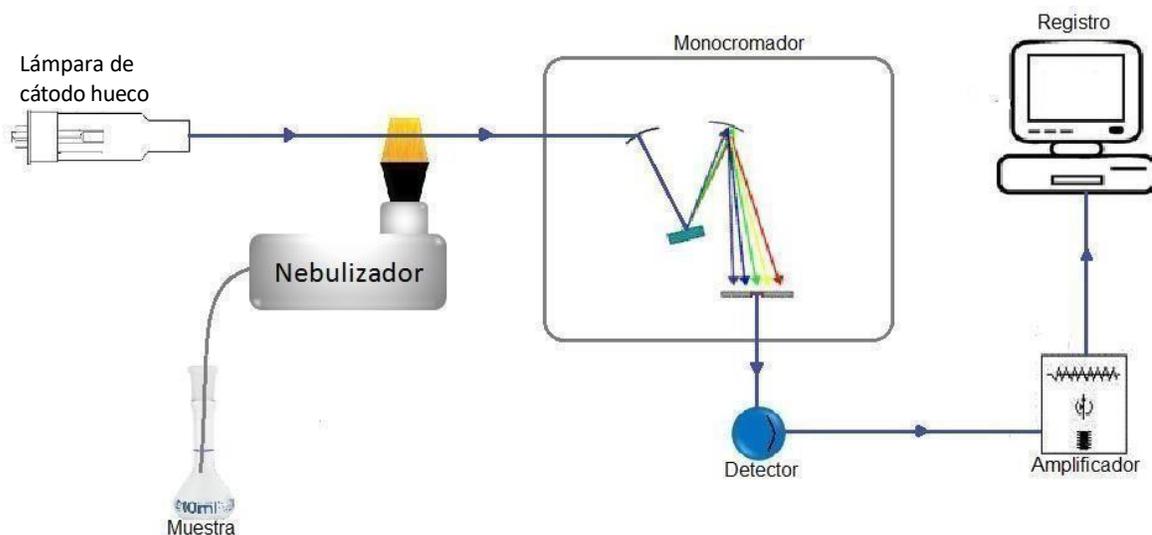


Figura 3.8 Componentes de un espectrómetro de absorción atómica [Elaboración propia].

Para las muestras de sodio, se tomaban 5 mL de ambos recipientes con una micropipeta, los cuales eran colocados en matraces volumétricos de 10 mL, los cuales posteriormente se aforaban con agua desionizada, como se muestra en la figura 3.9. Estos eran llevados al espectro de absorción atómica para cuantificar su concentración.

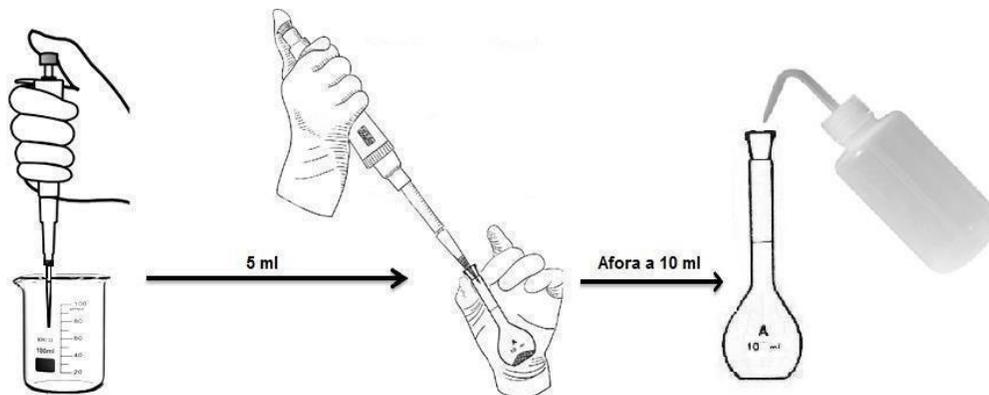


Figura 3.9 Preparación de muestra para espectrometría [Elaboración propia].

Para llevar a cabo la cuantificación, como principio se hizo una curva de calibración. Una curva de calibración es la representación gráfica de una señal que se mide en función de la concentración de un analito, el cual se crea preparando estándares de concentraciones conocidas. Estos estándares fueron preparados a partir de una solución madre de cloruro de sodio, de esta solución se tomaron diferentes volúmenes para cada uno, esto es para que al final se aforara con agua desionizada a cada matraz, y así cada punto obtuviera diferentes concentraciones (figura 3.10), en la cual al interpolar la muestra caiga dentro de la recta.

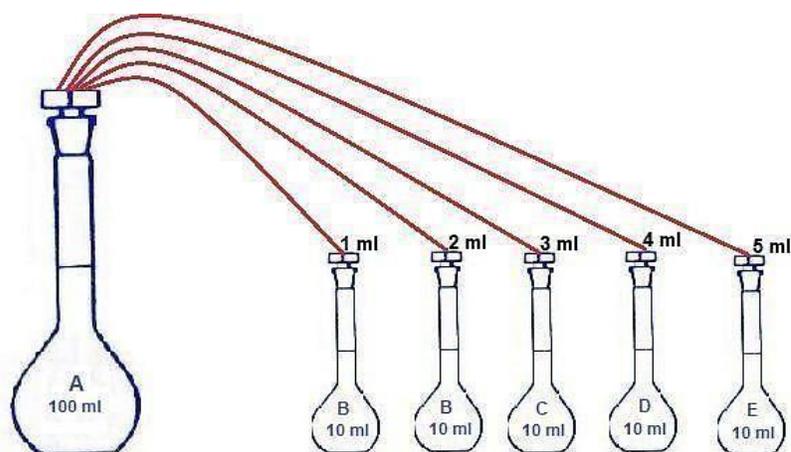


Figura 3.10 Preparación de soluciones para la construcción de una curva de valoración
[Elaboración propia].

La curva de calibración tiene que tener como mínimo 5 puntos en el intervalo de concentración seleccionada, los cuales al formar la línea recta su coeficiente de correlación (r^2) tiene que ser muy cercano a uno para hacerla válida. Una vez obtenida la curva de valoración se midió la absorbancia de cada muestra.

Se introdujo la muestra en estado líquido (disolución) y se lleva a una cámara de nebulización, ahí se convierte en un aerosol. Se “seleccionan” las partículas con un tamaño adecuado y entran en contacto con una flama para eliminar el disolvente y promover la formación de pequeñas partículas de sal seca. Luego ocurre la vaporización del analito, esto es, tener átomos libres del analito. Sobre el vapor se hace incidir la radiación electromagnética que será absorbida. Finalmente se obtiene una diferencia entre la cantidad de radiación introducida con la cantidad de radiación que sale y se determina entonces la cantidad de radiación absorbida por los átomos [22].

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Electrodiálisis

Para la electrodiálisis se realizaron dos experimentos a diferente voltaje, 7 y 14 V, en cada una de ellas se obtuvo el pH, la conductividad, la concentración de iones cloruro y iones sodio, esto para estudiar el comportamiento y el efecto del voltaje que es aplicado al sistema. Se tomaron lecturas de pH cada 10 min de cada recipiente, estos recipientes tenían una agitación constante debido al reflujo que se llevaba a cabo por las bombas.

Para el primer experimento se fijó un potencial de 7 V, y tal como se mencionó en la parte de prueba de métodos, el flujo volumétrico y la concentración inicial de las soluciones se mantuvieron iguales en cada experimentación. En cada experimento se obtuvieron datos de pH del primer recipiente (solución a diluir) en un intervalo de 5.84 a 6.37 y del segundo recipiente (solución a concentrar) de 6.33 a 6.41, como se muestra en la figura 4.1. En ambos recipientes se obtuvo un pH muy similar y casi constante. Por lo tanto, el transporte de los iones (Na^+ y Cl^-) a través de las membranas, no generan cambios significativos de pH en las soluciones de los recipientes a un voltaje de 7 V, es decir las concentraciones de los iones (Na^+ y Cl^-) en las superficies de las membranas son más grandes que los iones del agua (H^+ y OH^-) y por lo tanto no existe una variación significativa de pH [23].

En el segundo experimento, se fijó un voltaje de 14 V, el pH se mantiene casi constante, figura 4.1, muy similar al del primer experimento (7 V), pero a partir de 110 minutos; es decir, una hora y cincuenta minutos, el pH empieza a cambiar en ambos recipientes, en el recipiente uno, que es el de la solución a diluir, el pH empieza a disminuir hasta llegar a un pH de 4.73, mientras que en el recipiente dos (solución a concentrar) el pH comienza a aumentar a un pH de 7.56, esto es debido que al aplicar un mayor voltaje, se puede generar la disociación del agua, produciendo iones OH^- y H^+ , debido al acomodo de las membranas de intercambio iónico, los iones se introducen en la solución a concentrar y diluir de manera que provocan un cambio en el pH.

pH en función del tiempo

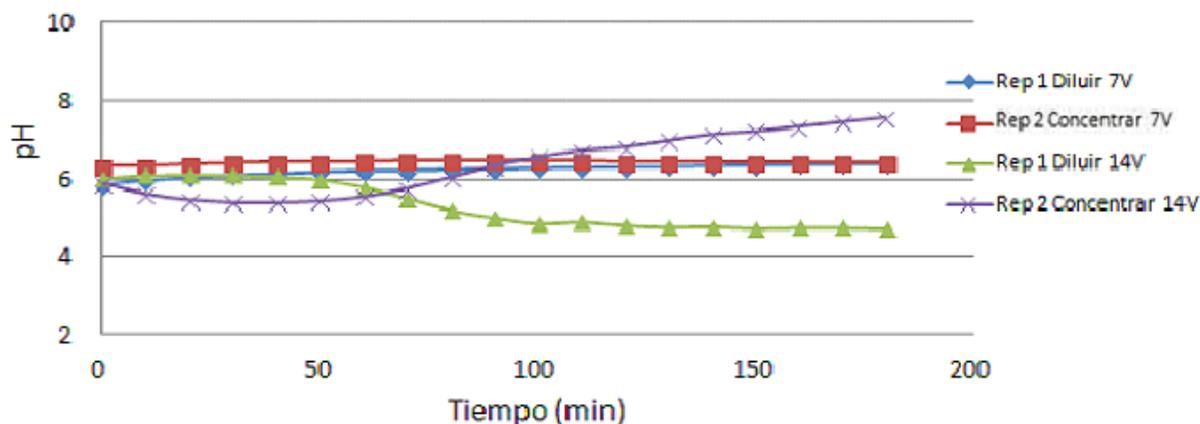
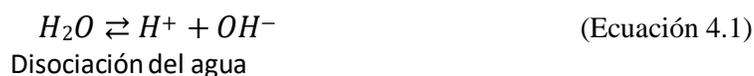


Figura 4.1 Comportamiento del pH vs tiempo de electrodiálisis a 7 y 14 V a una concentración de 0.01 M NaCl en una celda tipo filtro prensa a 8 GPH.

Como ya se mencionó, el cambio de pH puede deberse a la disociación del agua provocando que iones OH^- predominen en el tanque a concentrar y los iones H^+ se acumulen en el tanque a diluir, Shah y col. observaron la disminución del pH en el tanque a diluir durante la desalación de agua salobre en un reactor tipo batch, esto lo atribuyeron a la disociación del agua [24].

Por otro lado, el grupo de investigación de Kikonenko y colaboradores, dan una explicación de cómo se lleva a cabo la disociación del agua. La reacción de la disociación de agua esta descrita según la siguiente ecuación [25]:



Debido a que el coeficiente cinético de disociación de agua es muy pequeño ($k_f = 2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) [25], no es posible que ocurra intercambio iónico en la interface de las membranas. Esta constante de disociación debe ser 5 veces más grande para producir *fluxes* de H^+ y OH^- y así ser percibidos en las soluciones de los tanques durante la electrodiálisis. Sin embargo, para explicar las altas velocidades de disociación de agua, Greben y Simons [25], proponen que los iones H^+ y OH^- son generados en los grupos ionogénicos, grupos iónicos fijos en las membranas de intercambio iónico y son considerados como centros catalíticos en donde también el campo eléctrico tiene un papel importante. Bajo un campo eléctrico aplicado, para el caso de la membrana de intercambio aniónico, los OH^- producidos, salen de la capa de reacción (2 nm de espesor, capa de reacción de la membrana adyacente a la solución) hacia el seno de la membrana, mientras que los H^+ migran hacia la solución y posteriormente hacia el seno de la solución, donde el pH de la solución se percibe ácido (solución a diluir). El proceso es similar con la membrana de intercambio catiónico, pero ahora el H^+ migra hacia el seno de la membrana y el OH^- migra hacia la solución

y entonces el pH de la solución incrementa, (solución a concentrar).

La conductividad de una disolución depende del número de iones, que por lo general aumenta cuando la concentración de electrolitos aumenta debido a que estos son portadores de cargas y la conductividad es una medida de la facilidad con la que una corriente eléctrica pasa a través de un conductor, en este caso el conductor es la disolución de sal. La conductividad es otro parámetro que se registró lectura cada 10 min, como se muestra en la figura 4.2, a 7 V descendió un 22.15 %, a 14 V disminuye un 39.29 %, mientras que en los recipientes dos (soluciones a concentrar) tienden a ascender, a 7 V aumentó un 18.95 % y a 14 V un 39.46 %, al aplicar un mayor voltaje, éste crea una mayor fuerza hacia los iones para que migren a sus respectivos electrodos, lo que lleva una mayor remoción de sal. También se muestra que, al hacer pasar la corriente eléctrica, la rapidez de la transferencia de los iones es constante durante toda la experimentación, ya que se presenta una pendiente uniforme.

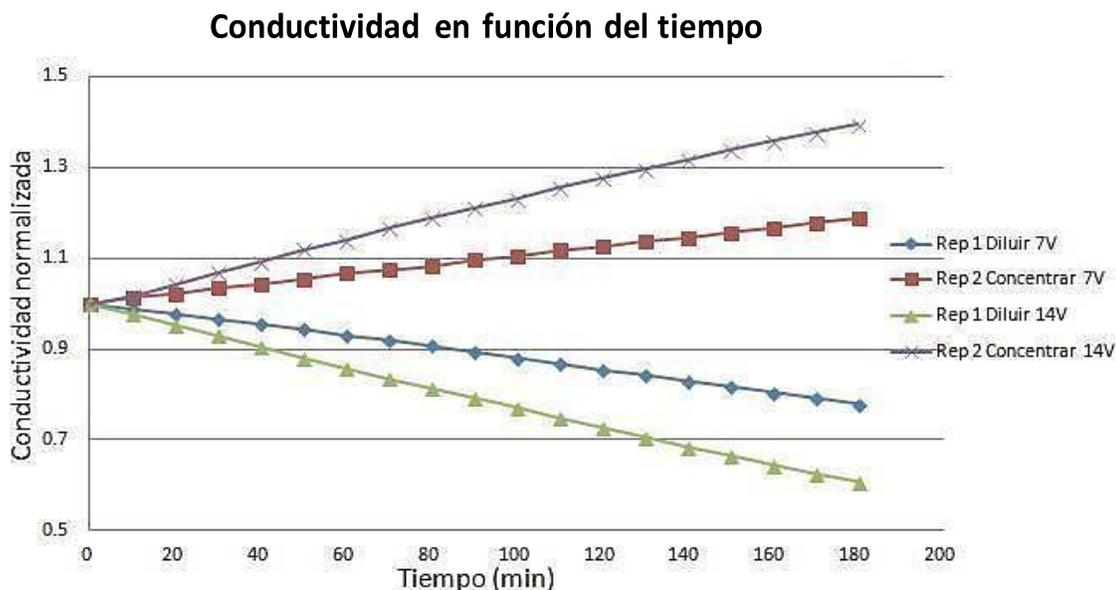


Figura 4.2 Comportamiento de la conductividad normalizada vs tiempo de electrodiálisis a 7 y 14 V, a una concentración 0.01 M NaCl en una celda tipo filtro prensa a 8 GPH.

Con el fin de corroborar que los iones se transfirieron del recipiente 1 (a diluir) al recipiente 2 (a concentrar), se cuantificó la concentración de cloruros por el método argentométrico de los dos recipientes a los dos voltajes aplicados, de 7 y 14 V, se tomaron muestras de 1 mL cada 20 min.

En la figura 4.3 se muestra el comportamiento de la concentración normalizada de los iones cloro con respecto al tiempo de electrodiálisis, nuevamente se observa un incremento en la concentración en los recipientes número 2, de 28.6 % y 39.46 % para 7 y 14 V respectivamente y un descenso en los recipientes número uno, de 29 % y 39.29 % a 7 y 14 V respectivamente. Los cambios que se presentan no son proporcionales con el potencial aplicado debido a que pudieron suceder fenómenos no relacionados en el proceso de transferencia de iones Na^+ y Cl^- , es decir a procesos como “fugas de corriente”.

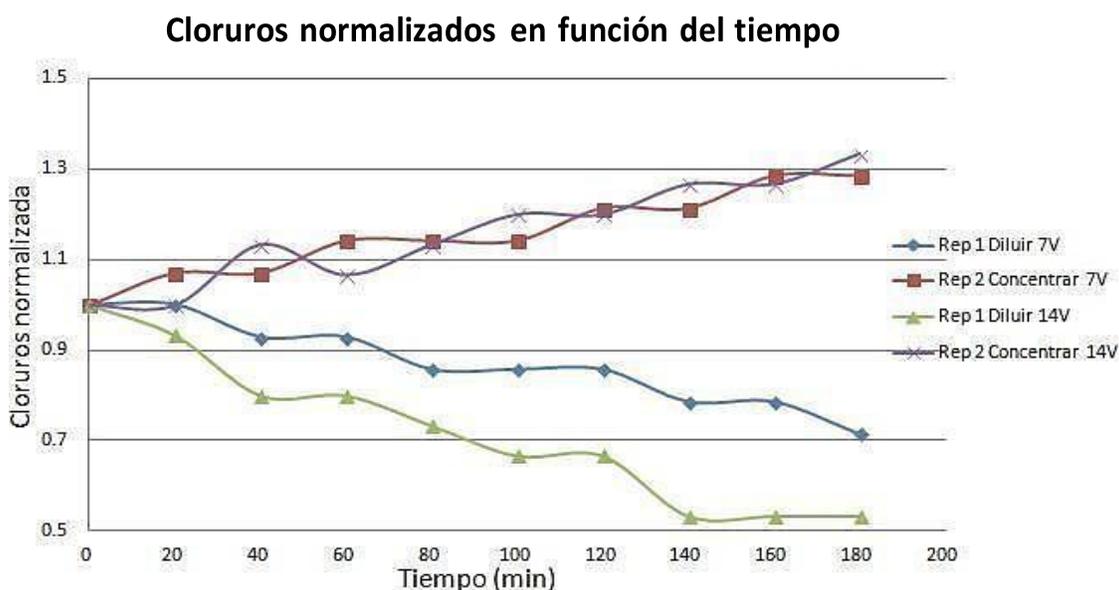


Figura 4.3 Tendencia de la concentración normalizada de iones cloruro vs tiempo de electrodiálisis a 7 y 14 V a una concentración de 0.01 M NaCl en una celda tipo filtro prensa a 8 GPH.

Las concentraciones normalizadas son, la concentración (en este caso de iones cloruro) a cada tiempo entre la concentración inicial.

También se muestra el comportamiento de la concentración normalizada la de los iones sodio, figura 4.4, se observa un crecimiento abrupto en el tanque a concentrar en los primeros 20 minutos, aumenta un 90 %, esto es algo que debe corroborarse ya que puede haber errores experimentales en el momento de utilizar la pipeta y preparar los analitos. Sin embargo, considerando las tendencias a partir de los 20 min hasta las tres horas de experimentación, en el tanque 2 (solución a concentrar), se tiene un comportamiento casi lineal con un crecimiento del 33 %, mientras que en el tanque 1 (solución a diluir), se tiene una disminución del 24.6 %.

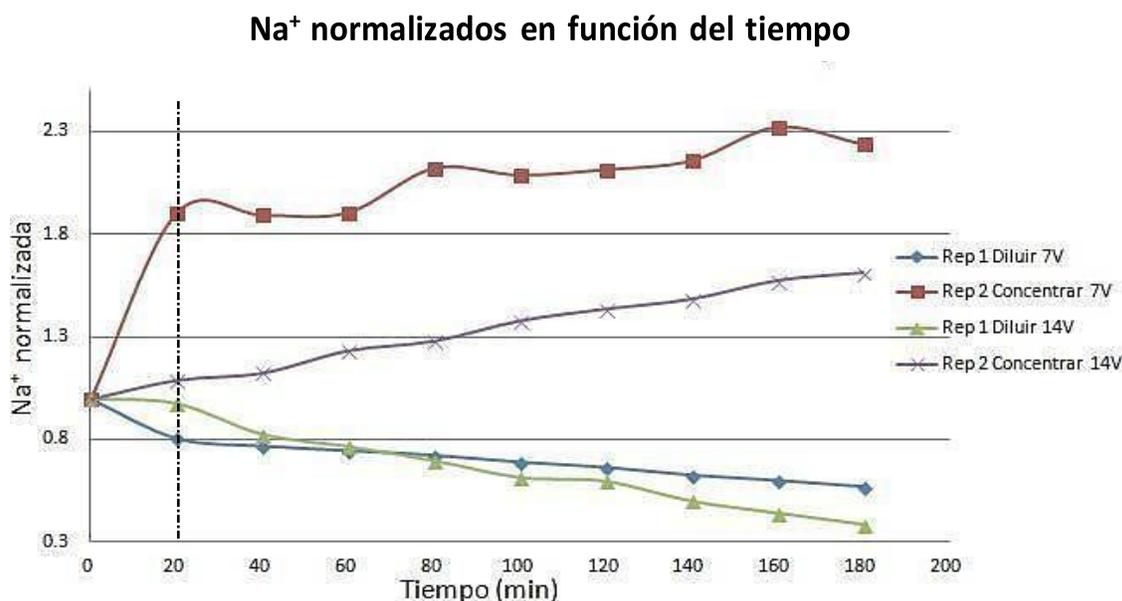


Figura 4.4 Tendencia de la concentración normalizada de iones sodio vs tiempo de electrodiálisis a 7 y 14 V a una concentración de 0.01 M NaCl en una celda tipo filtro prensa 8 GPH.

4.2 Electrodeionización

Se realizó un segundo experimento de electrodiálisis, pero en este caso se agregó un lecho de resina de intercambio iónico (aniónica-catiónica) en la cámara de disolución, a la combinación de ambos se le llama electrodeionización (EDI). Al igual que en la electrodiálisis, se realizaron dos experimentaciones, a 7 y 14 V, reportando el pH, la conductividad, la concentración de cloruros y iones sodio en todo el transcurso de la experimentación, para observar cómo actúa y afecta el voltaje aplicado a la celda.

En la figura 4.5, se muestra el comportamiento de pH cada 10 min de ambos recipientes. En el caso de 7 V, el pH se mantuvo casi constante durante la experimentación, con una variación de 6.07 a 6.32. Por otro lado, al aplicar 14 V, el pH permanece constante hasta un tiempo de 110 minutos, después se registró un incremento del pH en la solución a concentrar de 6.85 a 10.27 y una disminución del pH en la solución a diluir de 6.16 a 4.25. El cambio de pH es más notorio en el proceso EDI. Para la EDI, se tiene un mecanismo propuesto por Alvarado y colaboradores [26] la cual consiste principalmente en dos etapas. La primera etapa es la difusión de los iones (en este caso Na⁺ y Cl⁻) hacia las resinas de intercambio iónico, (aniones hacia la resina aniónica y cationes hacia la resina catiónica). Cuando los iones son transportados por difusión a los sitios activos de las resinas por la aplicación de una corriente eléctrica, una pequeña cantidad del solvente es separada en sus constituyentes (H⁺ y OH⁻), que son los responsables en la regeneración de la resina. La segunda etapa es la conducción iónica de Na⁺ y Cl⁻ de la fase sólida hacia el borde de las membranas. Al aplicar la diferencia de potencial los iones migran hacia las membranas a través del lecho empacado de resina, el cual es el responsable del transporte iónico

de la transferencia de corriente dentro del sistema. Cuando se agotan los iones en la solución a diluir, se genera un exceso de los productos de disociación del agua (H^+ y OH^-), y entonces los protones se transfieren hacia la solución a diluir y los iones hidroxilo se transfieren hacia la solución a concentrar, lo que generan cambios de pH en las soluciones.

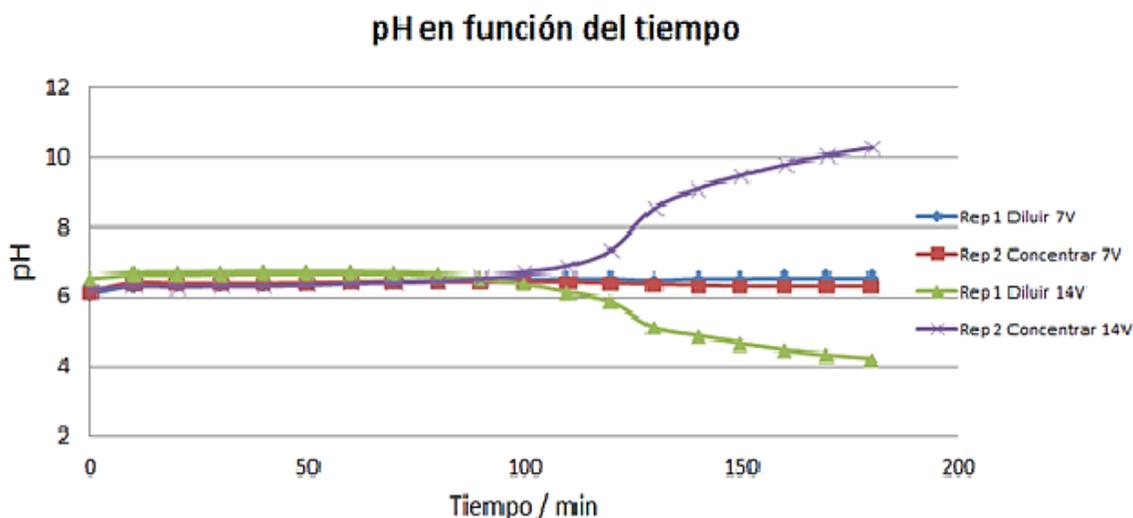


Figura 4.5 Comportamiento del pH vs tiempo de electrodiálisis con resina mixta de intercambio iónico a 7 y 14 V a una concentración de 0.01 M NaCl en una celda tipo filtro prensa a 8 GPH.

La conductividad, como en el caso de la electrodiálisis se observa que en los recipientes número 1 tiende a descender y en los recipientes 2 tienden a ascender. Como ya mencioné antes, esto sucede porque la conductividad de la disolución depende del número de iones y su movimiento. Por lo cual en los recipientes a diluir ocurre un descendimiento por la remoción de los iones Cl^- y Na^+ , mientras que en los recipientes a concentrar contiene un mayor número de iones.

Como se observa en la figura 4.6, a 7 V se tiene una disminución de la conductividad de 29.49 % y un incremento de 35.58 %, mientras que a 14 V se tiene una disminución de la conductividad de 73.35 % y un incremento de 76.9 %, como ya se había mencionado antes, con un mayor voltaje se crea una mayor fuerza hacia los iones para que migren y por consecuencia la transferencia de los iones es mayor. Así mismo, como en el caso anterior (electrodiálisis), la rapidez con la cual disminuye la conductividad es casi constante durante la experimentación. Con el fin de corroborar la transferencia de los iones del recipiente a diluir hacia el recipiente a concentrar, se cuantificaron los iones Na^+ y Cl^- .

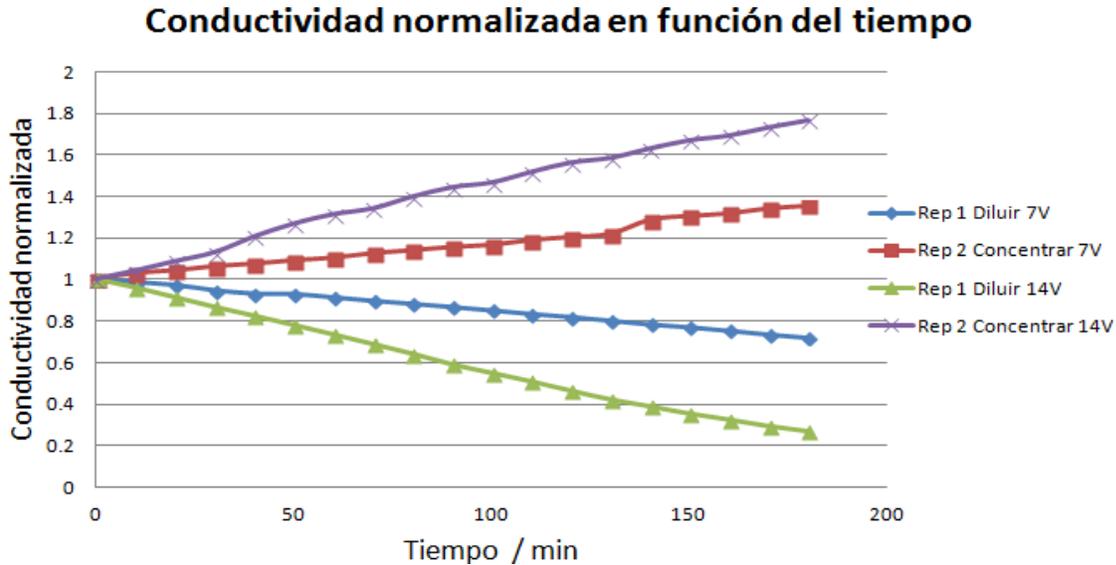


Figura 4.6 Comportamiento de la conductividad normalizada vs tiempo de electrodiálisis con resina de intercambio iónico a 7 y 14 V a una concentración de 0.01 M NaCl en una celda tipo filtroprensa a 8 GPH.

Se cuantificó la concentración de iones cloro por el método argentométrico de las muestras que se tomaron cada 20 min de los dos recipientes. En la figura 4.7, se muestra que a 7 V se tiene una disminución de 31 % y un incremento de 18.9 % de la concentración de cloruros con respecto a la inicial, y a 14 V se tiene una disminución de 72 % y un incremento de 55 %, se esperaría que la misma cantidad que disminuye en el recipiente a diluir, aumentara en el recipiente a concentrar, sin embargo, hay que tomar en cuenta que experimentalmente las membranas no tienen una efectividad del 100 % y que además, al desarmarse la celda se observaron incrustaciones de sal en los vértices. Esto es, debido a la geometría del reactor, ya que es posible la formación de zonas muertas hidrodinámicas entre los espaciadores y las membranas de intercambio iónico, evitando el transporte de los iones, es decir, que se tienen áreas muertas donde se quedan atrapadas pequeñas cantidades de sal, Kim y colaboradores estudiaron un fenómeno similar en un proceso de desalinización mediante electrodiálisis [27].

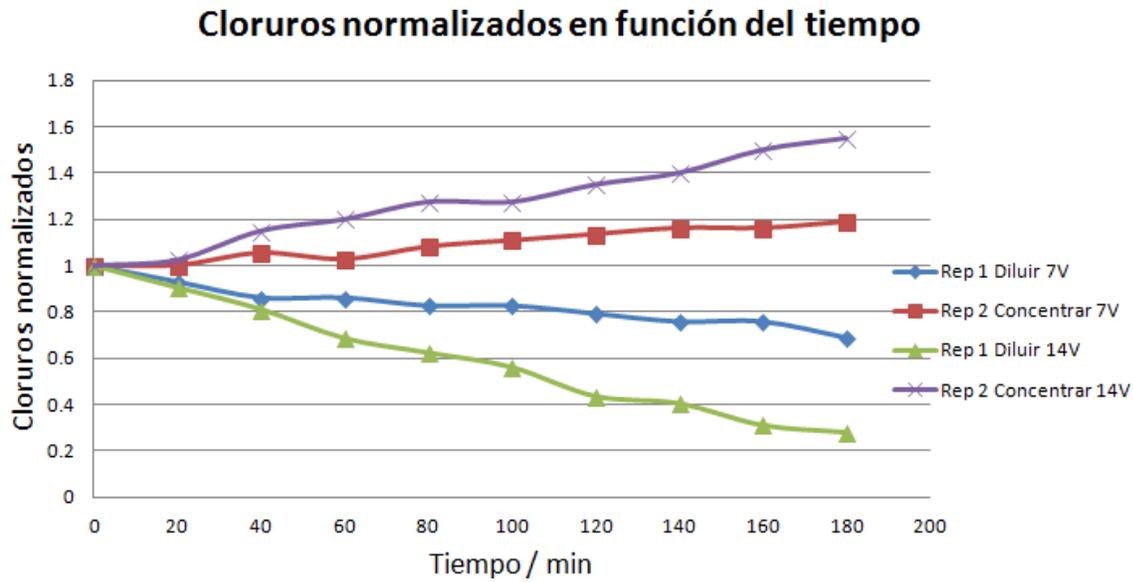


Figura 4.7 Tendencia de la concentración normalizada de cloruros vs tiempo de electrodiálisis con resina de intercambio iónico a 7 y 14 V a una concentración de 0.01M NaCl en una celda tipofiltro prensa a 8 GPH.

En el caso de los iones sodio, fueron cuantificados por espectrofotometría de absorción atómica. En la figura 4.8 se muestra la disminución de la concentración normalizada de los iones sodio de los recipientes 1 y 2 a 7 V y 14 V. El comportamiento es muy similar al comportamiento de la concentración normalizada de cloruros. Se muestra que a 7 V se tiene una disminución de 35.96 % en el recipiente a diluir y un incremento de 39.24 % en el recipiente a concentrar, mientras que a 14 V se tiene una disminución de un 99.8 % y un incremento del 92.92 % en los recipientes a diluir y concentrar, estas cantidades de disminución e incremento, son muy próximas.

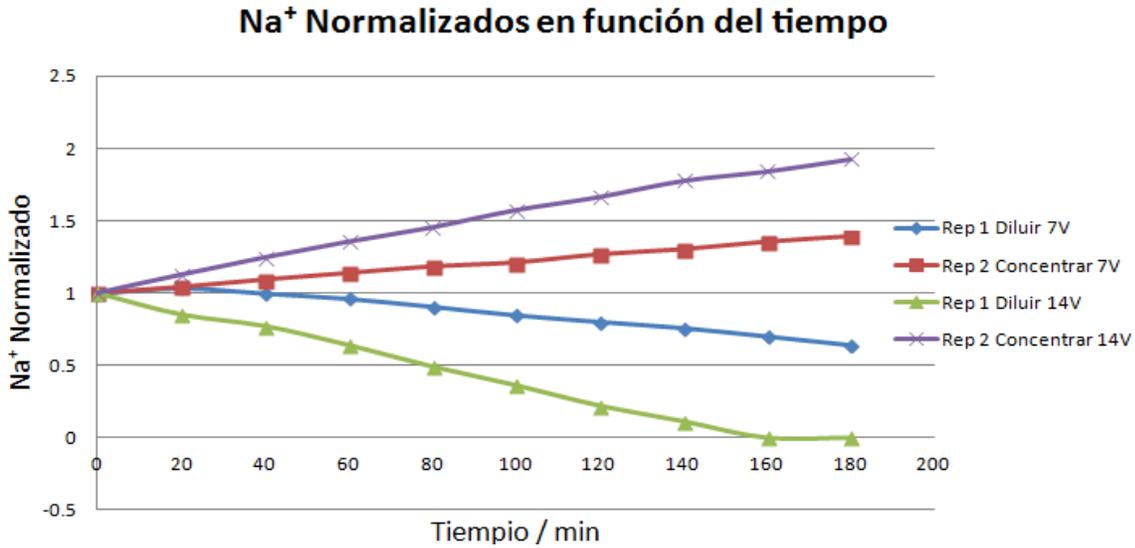


Figura 4.8 Tendencia de la concentración normalizada de iones sodio vs tiempo de electrodiálisis con resina mixta de intercambio iónico a 7 y 14 V a una concentración de 0.01M NaCl en una celda tipo filtro prensa a 8 GPH.

4.3 Electrodiálisis vs electrodeionización

Para tener una mejor visión de que método es el más apropiado para la remoción de sal en las aguas salobres, se hizo una comparación con y sin lecho de resina mixta a los mismos voltajes, como se puede observar en los resultados anteriores hubo una mejor respuesta aplicando una corriente eléctrica de 14 V, así que se hizo una comparación a ese voltaje.

En la figura 4.9 muestra una comparación del pH a 14 V con y sin resina de intercambio iónico, en ambos casos hay una variación de pH, una más notoria que la otra, como se puede observar hay una mayor variación al utilizar el lecho de resina mixta en un intervalo de 4.25-10.27, mientras que sin utilizar la resina mixta hay un intervalo de variación de 4.73-7.56, esto se debe a que ya como se había mencionado anteriormente, al aplicar un mayor voltaje se crea una hidrólisis del agua, produciendo iones OH⁻ y H⁺. En el caso con resina mixta su variación es mayor, ya que estos iones regeneran continuamente la resina de intercambio iónico.

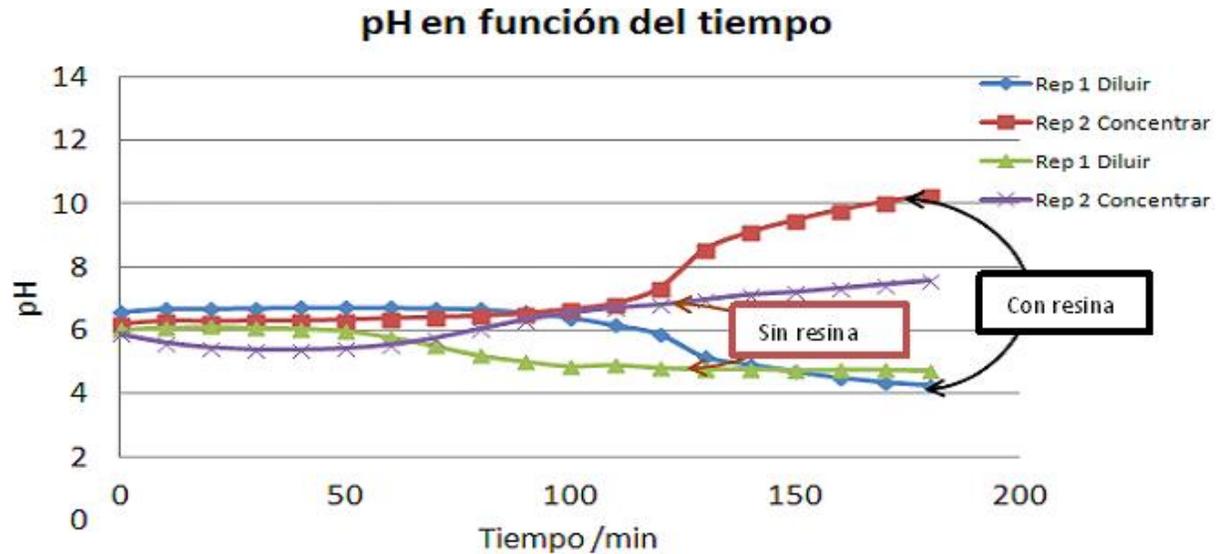


Figura 4.9 Comportamiento del pH vs tiempo de electrodiálisis con y sin resina de intercambioiónico a 14 V a una concentración de 0.01 M NaCl en una celda tipo filtro prensa a 8 GPH.

En la comparación de la conductividad al mismo voltaje, hay una gran diferencia en ambos métodos, indicándonos que hay una mayor remoción de sal al utilizar el lecho de resina de intercambio iónico al obtener un 34 % más de remoción de sal, como se muestra en la figura 4.10 y la tabla 4.1, esto se puede interpretar de ese modo ya que como antes se mencionó la conductividad de la disolución depende del número de iones, que por lo general aumenta con la concentración de electrolitos, por ello es que en los recipientes a diluir hay un descenso, ya que hay una remoción de electrolitos haciendo que su concentración de sal sea menor, y en los recipientes a concentrar la conductividad va en aumento, lo que nos indica que hay una adición de estos electrolitos haciendo que su concentración de iones sodio y iones cloruro sea mayor.

Tabla 4.1 Porcentaje final de la conductividad normalizada en disminución (Recipiente 1) y aumento (Recipiente 2) en ambos métodos.

CORRIENTE ELECTRICA	CONDUCTIVIDAD ED (Recipiente 1)	CONDUCTIVIDAD ED (Recipiente 2)	CONDUCTIVIDAD EDI (Recipiente 1)	CONDUCTIVIDAD EDI (Recipiente 2)
7 V	22.15%	18.90%	29.49%	35.58%
14 V	39.29%	39.46%	73.35%	76.90%

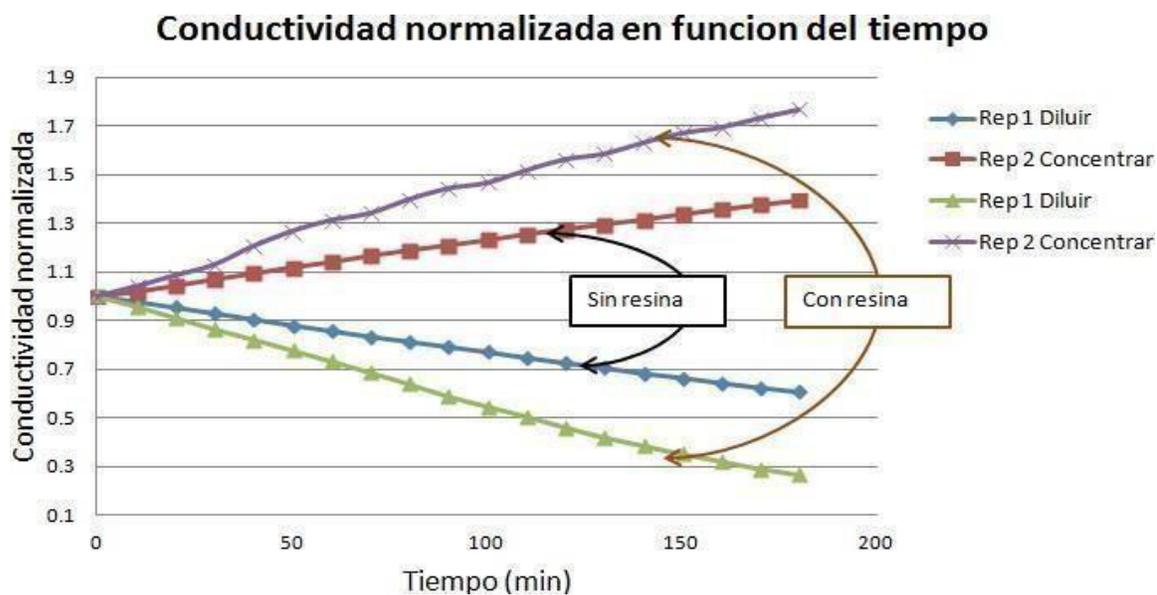


Figura 4.10 Comportamiento de la conductividad normalizada vs tiempo de electrodiálisis con y sin resina de intercambio iónico a 14 V a una concentración de 0.01 M NaCl en una celda tipo filtro prensa a 8 GPH.

En la cuantificación de Na^+ y Cl^- , en ambos casos los resultados fueron mejores al utilizar el lecho de resina de intercambio iónico, como se puede observar en las figuras 4.11 y 4.12, y en las tablas 4.2 y 4.3, ya que hay una mayor remoción de estos iones con un 32 % en Cl^- y un 75 % en Na^+ , esto se debe a que como nos indica en el pH, al crear una hidrólisis del agua que produce iones OH^- y H^+ , estos iones ayudan a regenerar constantemente la resina haciendo que la remoción de sal sea continua en el agua de alimentación. El lecho mixto de resinas de intercambio iónico ayudó a incrementar la conductividad, cuando la concentración de iones cloruro y sodio disminuyó casi a cero cuando se trabajó a un potencial de 14 V.

Hasta el momento se ha probado la efectividad en ambos procesos, por otro lado, al aplicar el tratamiento a las soluciones reales y a nivel industrial, se van a generar soluciones de salmuera, las cuales podrían ser tratadas mediante procesos de evaporación de múltiple efecto, evaporación súbita o bien osmosis inversa. Sin embargo, se tiene que hacer un estudio completo para obtener el tratamiento más eficiente y las mejores condiciones para tratar los residuos de salmuera.

Cloruros normalizados en función del tiempo

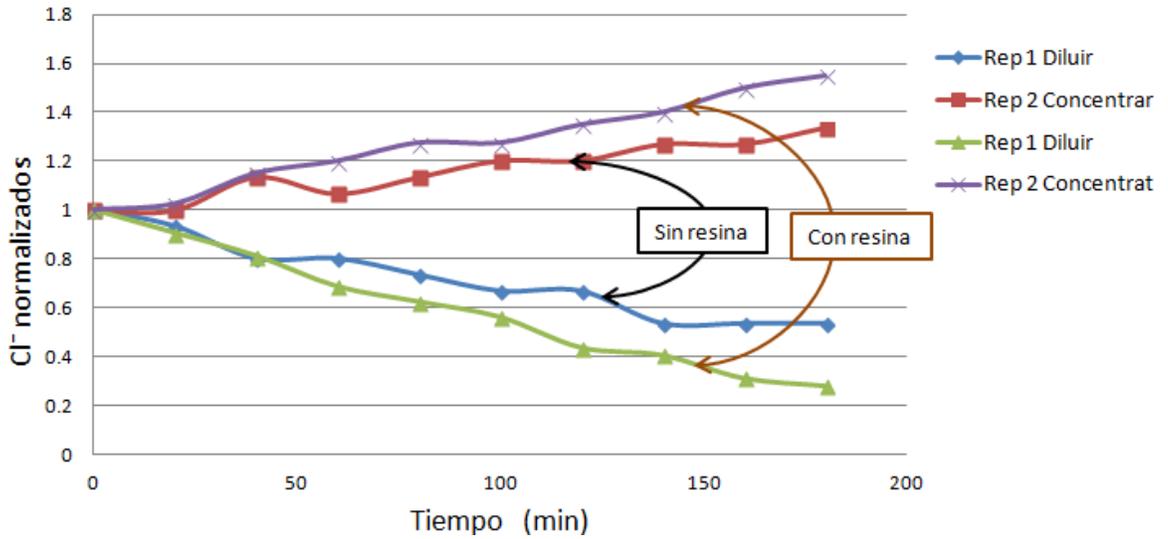


Figura 4.11 Tendencia de la concentración normalizada de cloruros vs tiempo de electrodiálisis con y sin resina mixta de intercambio iónico a 14 V a una concentración de 0.01 M NaCl en una celda tipo filtro prensa a 8 GPH.

Na⁺ Normalizados en función del tiempo

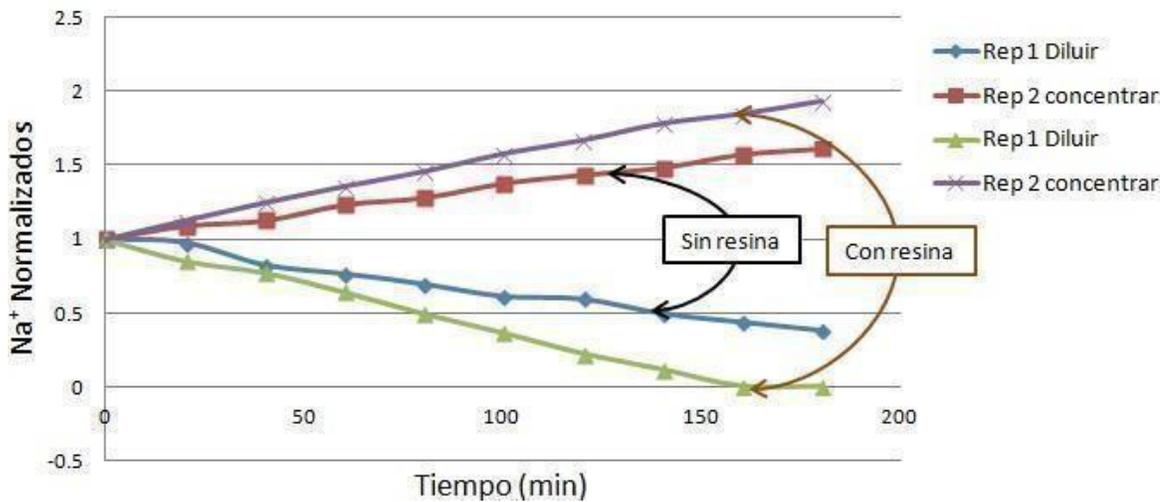


Figura 4.12 Tendencia de la concentración normalizada de iones sodio vs tiempo de electrodiálisis con y sin resina mixta de intercambio iónico a 14 V a una concentración de 0.01 M NaCl en una celda tipo filtroprensa a 8 GPH.

Tabla 4.2 Porcentaje final de la concentración normalizada de iones cloro en disminución (Recipiente 1) y aumento (Recipiente 2) en ambos métodos.

CORRIENTE ELECTRICA	IONES CLORO ED (Recipiente1)	IONES CLORO ED (Recipiente 2)	IONES CLORO EDI (Recipiente 1)	IONES CLORO EDI (Recipiente 2)
7 V	29%	28.60%	31%	18.90%
14 V	39.29%	39.46%	72%	55%

Tabla 4.3 Porcentaje final de la concentración normalizada de iones sodio en disminución (Recipiente 1) y aumento (Recipiente 2) en ambos métodos.

CORRIENTE ELECTRICA	IONES SODIO ED (Recipiente 1)	IONES SODIO ED (Recipiente 2)	IONES SODIO EDI (Recipiente 1)	IONES SODIO EDI (Recipiente 2)
7 V	21.40%	19.40%	35.96%	39.29%
14 V	24.60%	33%	99.80%	92.92%

4.4 Consumo de energía.

Para evaluar el desempeño del proceso de ED y EDI, se estimó el % de eficiencia de corriente, el consumo de energía y el % de remoción de NaCl.

Para calcular la eficiencia de corriente se utilizó la ecuación 4.2.

$$E_f (\%) = \frac{Z_i F (C_{to}^{sd} - C_{tf}^{sd}) V_T}{It} \times 100 \quad \text{(Ecuación 4.2)}$$

Porcentaje de la eficiencia de corriente [28].

Donde C_{to}^{sd} y C_{tf}^{sd} C^{sd} son la concentración de NaCl en el tanque de la solución diluida al comienzo y al final de la recirculación de la solución, I es la corriente eléctrica, Z_i la carga de los iones, F la constante de Faraday (96485 C/mol), V_T el volumen de la solución y t es el tiempo de experimentación.

Para calcular el consumo de energía en la experimentación fue por medio de la ecuación 4.3.

$$E = \frac{IE_{cel}t}{3.6 \times 10^6 V_T} \quad \text{(Ecuación 4.3)}$$

Consumo de energía [29].

Donde E es el consumo de energía en Kwh/m^3 , E_{cel} es el voltaje de la celda y 3.6×10^6 es el factor que convierte las unidades de Ws/m^3 a KWh/m^3 .

Y para calcular el porcentaje de la eficiencia de la remoción de NaCl se utilizó la ecuación 4.4.

$$Re (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_f} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Porcentaje de eficiencia de la remoción de NaCl [30].

Donde C_i es la concentración inicial y C_f la concentración final.

Tabla 4.4 Comparación entre ED y EDI sobre porcentaje de remoción, eficiencia de corriente y consumo de energía para el tratamiento de agua salobre.

Compartimento diluido	Remoción de sal (%) (ED)	Remoción de sal (%) (EDI)	Eficiencia de corriente (%) (ED)	Eficiencia de corriente (%) (EDI)	Consumo de energía kWh/m^3 (ED)	Consumo de energía kWh/m^3 (EDI)
7 V	14.10	32.14	63.79	72.66	0.42	0.81
14 V	33.98	84.25	78.69	72.99	1.71	4.54

El porcentaje de eliminación de NaCl en la Tabla 4.1 es un indicador de la capacidad de la celda de EDI para desalinizar 1.5 L de solución durante 3 h a la concentración y voltaje de NaCl especificados. Las eficiencias de corriente estimadas en ambos métodos se encuentran entre 72.99 % y 78.69 %, mayores que las informadas (25 % - 52 %) a una concentración similar de NaCl [30].

Los valores de eficiencia de corriente relativamente altos en el presente trabajo indican un menor desperdicio de cargas eléctricas en procesos no deseados como el cruce de co-iones o el flujo cruzado de H^+ y OH^- generado por la división del agua. El aumento del voltaje de la celda a 14 V muestra una menor eficiencia a la que se esperaba, ya que se aplicó el doble de voltaje, esto es debido a la división de agua inducida, aun así, se obtuvo un buen resultado.

Otro parámetro importante es el de los consumos de energía, relacionado con el costo operativo del proceso. La Tabla 4.1 muestra los resultados del consumo de energía para desalar el agua a una concentración inicial de sal de 0.01 M NaCl hasta los respectivos valores finales alcanzados en 3 h de tratamiento por lotes ED y EDI a dos voltajes de celda. Los valores muestran que cuanto mayor es el potencial, mayores el consumo de energía.

Estos consumos de energía incluyen la energía necesaria para llevar a cabo las reacciones electroquímicas en los electrodos, la energía de disipación asociada a la caída del potencial óhmico en todos los medios (membranas, resinas y soluciones) y la energía necesaria para transferir los iones entre diferentes medios de diferentes concentraciones en cada interfaz en la ruta de los iones desde la solución diluida a la concentrada. Los consumos de energía en la Tabla 4.1 están entre 0.42 y 4.54 kWh/ m³. Teniendo en cuenta el consumo de energía típico de 3-7 kWh/m³ [31] para desalinizar el agua mediante el método más común de ósmosis inversa, el EDI puede ser una opción atractiva, particularmente en una pila multicelda, donde el consumo de energía para reacciones electroquímicas tendría un impacto menor en el consumo de energía de la celda EDI.

Tabla 4.5 Tarifas generales del consumo de energía en \$/kWh para las industrias dentro del Valle de México, febrero 2021 [32].

Valle de México	Norte			Sur		
Descripción	Base	Intermedia	Punta	Base	Intermedia	Punta
Gran demanda en media tensión horaria (GDMTH)	0.9387	1.5257	1.7789	0.9478	1.545	1.802
Gran demanda en media tensión ordinaria (GDMTO)	1.312			1.354		
Demanda industrial en subtransmisión (DIST)	0.7101	1.2133	1.3628	0.9474	1.5387	1.801
Demanda industrial en transmisión (DIT)	0.559	1.0085	1.1215	0.8635	1.5313	1.7109

Observando el consumo de energía en la experimentación que se muestra en la tabla 4.1 y las tarifas generales de consumo de energía en la industria que reporta la Comisión Federal de Electricidad (CFE) plasmadas en la tabla 4.2, se puede obtener un costo aproximado del consumo de energía, tomando en cuenta la tabla 4.1 se denota que los mejores resultados se obtuvieron utilizando el método de EDI con un voltaje de 14, por lo tanto, tomando en cuenta este método, se puede tomar un aproximado para calcular la cuota del consumo de energía que se puede gastar a nivel industrial, tomado un promedio de las tarifas, las cuales da 1.2811 kWh, y el consumo de energía que fue de 4.54 kWh/m³, se obtiene un gasto de 5.8165 \$/kWh.

Ya que las tarifas del consumo de energía varían de acuerdo al país y zona regional, no es posible dar un costo específico de este consumo, por lo que se hace una comparación de acuerdo al consumo de energía específico que se tienen ya reportados en la tabla 4.6, indicando que al utilizar la EDI se genera un menor consumo de energía que ED Y IO, por lo tanto, el costo de igual manera será menos.

Tabla 4.6 Consumo de energía específico en diferentes métodos de desalinización [31].

Método	Consumo de energía específico (SEC) kWh/m ³
Ósmosis inversa	3-7
Electrodialisis	1-15
Electrodeionización	0.2-1.5

CONCLUSIONES

- A partir del análisis de resultados, se puede concluir que la electrodiálisis como la electrodeionización fueron capaces de abatir la concentración de sal en una solución que simula aguas salobres, obteniendo mejores resultados de hasta 3 veces más al utilizar el intercambio iónico. Esto se debe a que los iones que logran pasar la membrana, son depositados en la cámara a diluir donde se encuentra la resina de intercambio iónico, haciendo el proceso de intercambio de iones de la resina por los iones de la solución que simula aguas salobres que lograron cruzar las membranas.
- Obteniendo una remoción de cloruro de sodio de hasta un 84.25 % en la EDI, se demuestra que es un método viable para tratar las aguas salobres, eficiente y económico, es un proceso continuo y amigable con el medio ambiente, ya que no requiere de alguna sustancia toxica.
- En ambos métodos se utilizaron dos diferentes potenciales, de 7 V y 14 V para estudiar el efecto que esto implica en el transporte de iones. En ambos métodos se removió el contenido de Cl^- y Na^+ , pero hubo una mejor respuesta al utilizar 14 V, tal como se explica en el capítulo 4, al aplicar un mayor voltaje, éste crea una mayor fuerza hacia los iones para que migren a sus respectivos electrodos, lo que lleva una mayor remoción de sal. Al igual, al aumentar el potencial, también ayuda a la continua regeneración de la resina, ya que crea una mayor disociación de agua produciendo H^+ y OH^- , ayudando a la regeneración de la resina.
- El consumo energético es bajo en todos los experimentos realizados. Tomando en cuenta el método y el voltaje que denotó mejores resultados, se obtuvo un consumo de 4.54 kWh/m^3 , esto nos indica que los costos al utilizar este método serán bajos, basándonos en las tarifas generales del consumo de energía en $\$/\text{kWh}$ para las industrias dentro del Valle de México, febrero 2021 que se muestran en la tabla 4.2, además de obtener un valor alto de la eficiencia de corriente en la celda, de un 72.99 %.
- A partir de los resultados y las condiciones estudiadas, se demuestra que hay una mayor remoción de sal en la solución que simula aguas salobres utilizando el método de EDI, al igual se obtuvo un consumo de energía bajo, con el método de EDI se tiene una remoción de sal de 84.25 % con un consumo de energía de 4.54 kWh/m^3 , en todos los casos se tiene una eficiencia de corriente muy cercanas, por lo tanto, el método más recomendado es la EDI a 14 V.

REFERENCIAS

- [1] Camacho. M. (2018). Caracterización de una celda electrodeionización para tratamiento de aguas salobres. Tesis de licenciatura. FES-UNAM, Cuautitlán Izcalli, México.
- [2] Ochoa J. (1996). Electrosíntesis y electrodiálisis (fundamentos, aplicaciones tecnológicas y tendencias). McGraw-Hill. Madrid.
- [3] Lonsdale. H. K. (1989) What is membrane? Part II. Journal of Membrane Science, vol. 43, pp. 1-3.
- [4] Comisión nacional del agua (2020) Agua en el mundo. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/agua-en-el-mundo>
- [5] Mohammadi T., Razmi A., Sadrzadeh M. (2004) Effect of operating parameters on Ni²⁺ separation from wastewater using electrodialysis. Desalination of the University of Science and Technology Narmak. Vol. 167(1), 379-385.
- [6] Strathmann H., Turner M. K. (1991) Effective industrial membrane processes: benefits and opportunities. Turner. England.
- [7] Gorrochotegui E. (2004) Ácido láctico del lactosuero mediante un piloto de electrodiálisis. Tesis de pregrado. Universidad de los andes, Mérida. Venezuela.
- [8] Ledesma J. (2004) Preparación y caracterización de membranas de intercambio iónico a partir del anclaje de dendrímeros PAMAM en una base polimérica de acetato de celulosa. Tesis de maestría. Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica. México.
- [9] Cardenas A. (2002). Membranas Generalidades. Cuaderno FIRP #340, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Mérida. Venezuela.
- [10] Strathmann H., in W. S. Ho. Winston and K. Kamalesk, Sirkar (1992), "Membrane Handbook, Van Nostrand-Reinhold, U.S.A.
- [11] Susial P, González J, Cabrera I, Fernandez F. (2001) Dimensionamiento y Diseño de la Electrodiálisis (I) Membranas y Módulos. Ingeniería Química. Vol. 375. pp. 291 – 298.
- [12] Hidalgo F., Guamán M. (2006) Diseño y construcción de un desmineralizador de lechomúltiple. Tesis de licenciatura, Universidad de Guayaquil, Ecuador.
- [13] López J. A., Mejías M. (2012) Las aguas salobres. Una alternativa al abastecimiento en regiones semiáridas, Instituto Geológico y Minero, España.
- [14] Ministerio de sanidad y política social (2009). Guía de desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Secretaria general técnica. Madrid. Recuperado de: https://www.msbs.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/Guia_desalacion.pdf
- [15] Comisión Nacional del Agua (2017). Estadísticas del agua en México secretaria de medio ambiente y recursos naturales. Ciudad de México, México. Recuperado de: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- [16] Argudo C. (2012). Concepción integral y aplicación experimental de procesos de membranas en la reutilización de aguas depuradas. Tesis doctoral, Universidad de las palmas de Gran Canaria, Gran Canaria.
- [17] Ortega A. (2017). Estudio experimental y modelado de la remoción de arsénico de agua mediante resina aniónica electro-regenerada en un proceso híbrido de intercambio iónico/electrodiálisis. Tesis doctoral, CU-UNAM, Ciudad de México, México.
- [18] Nieto F. (2015). Mejora del proceso de producción de agua ultrapura en la central de ciclo combinado arcos de la frontera (Iberdrola). Tesis de licenciatura, Universidad de Cádiz, España.

- [19] Lenntech. (2011). Product information LEWATIT monoplus M 500. Recuperado de: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Lewatit-MonoPlus-M-500-L.pdf>
- [20] Lenntech. (2005). Product information LEWATIT monoplus S 100. Recuperado de: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Lewatit-MonoPlus-S-100-L.pdf>
- [21] Universidad Nacional Autónoma de México. (2020). Espectroscopia atómica de absorción. Recuperado de: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/exposicion_absorcion_atomica_545.pdf
- [22] López U. (2005). Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitratos en agua. Tesis de maestría, Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica.
- [23] Andreeva M., Gilb V., Pismenskaya N., Dammak L., Kononenko N., Larchet C., Grande D., Nikonenko V. (2018). Mitigation of membrane scaling in electrodialysis by electroconvection enhancement, pH adjustment and pulsed electric field application, *Journal of Membrane Science*, vol. 549, pp. 129–140.
- [24] Shah S., Walter S., Winter V. (2019). Using feed-forward voltage-control to increase the ion removal rate during batch electrodialysis desalination of brackish water, *Desalination* vol. 457, pp. 62–74.
- [25] Nikonenko V., Kovalenko A., Urtenov M., Pismenskaya N., Jongyoon Han, Philippe Sizat, Gérald Pourcelly. (2014). Desalination at overlimiting currents: State-of-the-art and perspectives, *Desalination*, vol. 342, pp. 85–106.
- [26] Alvarado L., Chen A. (2014). Electrodeionization: Principles, Strategies and Applications, *Electrochimica Acta*, vol. 132, pp. 583–597.
- [27] Kim Y., Walker W., Lawler D. (2012). Competitive separation of di- vs. mono-valent cations in electrodialysis: Effects of the boundary layer properties, *Water Research*, vol. 46, pp. 2042–2056.
- [28] Ortega A., Oliva I., Contreras K., González I., Cruz-Díaz M., Rivero E. (2017). Arsenic removal from water by hybrid electro-regenerated anion exchange resin/electrodialysis process, *Sep Purif Technol*, vol. 184, pp. 319–326.
- [29] Feng X., Wu Z., Chen X. (2007). Removal of metal ions from electroplating effluent by EDI process and recycle of purified water, *Water Research*, vol. 41, pp. 257–263.
- [30] S.Y. Pan, S.W. Snyder, H.W. Ma, H.W. Ma, Y.J. Lin, P.C. Chiang. (2018). Energy-efficient resinwafer electrodeionization for impaired, *J Water Reclamation Clean Prod*, vol. 174, pp. 1464–1474.
- [31] Lopez A., Williams M., Paiva M., Demydov D., Do T., Fairey J., Lin Y., Hestekin J. (2017). Potential of electrodialytic techniques in brackish desalination and recovery of industrial process water for reuse, *Desalination*, vol. 409, pp. 108–114.
- [32] Comisión Federal de Electricidad. (2021). Esquema tarifario vigente. Recuperado de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Industria.aspx>
- [33] Comisión Nacional del Agua. (2019). Situación de los recursos hídricos. México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos>.

