



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Evaluación de la eficiencia de la técnica RED para la  
generación de energía.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**ORTIZ SALCEDO MONSERRAT KARINA**

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx 2018.**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: MARTHA AGUILAR MARTÍNEZ**

**VOCAL: ALFONSO DURAN MORENO**

**SECRETARIO: RODOLFO SILVA CASARÍN**

**1er. SUPLENTE: ALBERTO ROSAS ABURTO**

**2° SUPLENTE: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: EDIFICIO 8 DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA: LABORATORIO DE COSTAS Y PUERTOS**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**RODOLFO SILVA CASARÍN**

**SUPERVISOR TÉCNICO :**

---

**EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN**

**SUSTENTANTE:**

---

**MONSERRAT KARINA ORTIZ SALCEDO**



## **Agradecimientos**



## Contenido

1	Resumen .....	10
2	Introducción .....	11
3	Antecedentes .....	13
3.1	Problemática .....	14
3.2	Justificación.....	14
4	Hipótesis y Objetivos .....	17
4.1	Objetivo general .....	17
4.2	Objetivos específicos .....	17
4.3	Organización del trabajo .....	17
5	Marco teórico .....	19
5.1	Características del agua .....	19
5.1.1.1	Agua de mar.....	19
5.1.1.1.1	Características físico-químicas del agua de mar .....	20
5.1.1.2	Agua dulce .....	20
5.1.1.2.1	Características físico-químicas del agua dulce .....	20
5.2	Membranas .....	21
5.3	Salinidad .....	21
5.4	Desalinización .....	22
5.4.1.1	Sistemas térmicos .....	23
5.4.1.1.1	Destilación por compresión mecánica de vapor.....	23
5.4.1.1.2	Destilación flash multi-etapa .....	23
5.4.1.1.3	Desalación solar .....	23
5.4.1.2	Procesos a través de membranas.....	23
5.4.1.2.1	Electrodialisis .....	23
5.4.1.2.2	Ósmosis inversa .....	23
5.4.1.3	Congelación .....	24
5.5	Desarrollo sostenible.....	24
5.6	Energías renovables .....	25



5.7	Energías del mar .....	26
5.7.1	Corrientes de marea .....	26
5.7.2	Corrientes oceánicas .....	27
5.7.3	Amplitud de mareas .....	27
5.7.4	Oleaje .....	27
5.7.5	Energía térmica oceánica .....	27
5.7.6	Gradiente salino .....	28
5.7.6.1	Presión osmótica retardada (PRO).....	28
5.7.6.1.1	Membranas para PRO .....	29
5.7.6.2	Electrodialisis inversa (RED).....	29
5.7.6.2.1.1	Membranas de intercambio iónico.....	32
5.7.6.2.2	Espaciadores .....	33
5.7.6.2.3	Principios físicos de RED.....	34
5.8	Ley de Ohm.....	35
5.9	Equilibrio químico .....	35
5.9.1.1	Energía libre de Gibbs.....	35
5.10	Electrodos .....	37
5.11	Celdas electroquímicas .....	39
5.11.1.1	Celdas galvánicas o voltaicas.....	39
5.11.1.2	Celdas electrolíticas .....	39
5.12	Reacciones óxido-reducción electroquímica .....	39
5.12.1.1	Reacciones de oxidación.....	40
5.12.1.2	Reacciones de reducción .....	40
5.13	Potencial electroquímico .....	40
5.13.1.1	Actividad .....	40
5.13.1.2	Ley de límite de Debye-Huckel.....	40
5.13.1.3	Fuerza iónica .....	40
5.14	Ecuación de Nernst.....	41
5.15	Equilibrio de Gibbs-Donnan .....	41
5.16	Ley de Fick.....	42
5.17	Difusión de electrolitos .....	42



5.17.1.1	Difusividad en fase líquida a dilución infinita .....	42
5.18	Índice de refracción.....	43
5.19	Beneficios del gradiente Salino .....	43
5.20	Evaluación de los posibles efectos negativos del aprovechamiento del gradiente salino.....	44
6	Metodología .....	46
7	Desarrollo .....	47
8	Resultados .....	54
8.1	Estado estacionario.....	54
8.2	Reynolds bajo .....	60
8.3	Reynolds medio .....	64
8.4	Concentración en estado estacionario .....	67
8.5	Concentración en Reynolds bajo .....	70
8.6	Concentraciones para Reynolds medio .....	72
9	Conclusiones .....	75
10	Bibliografía.....	77
11	Glosario .....	82



## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Principio de tecnología RED para la extracción de energía del SGE. (37)</i>	30
<i>Figura 2. Circuito eléctrico de una celda RED (40)</i>	32
<i>Figura 3. Esquema del dispositivo.</i>	49
<i>Figura 4. Experimento en estado estacionario</i>	52
<i>Figura 5. Experimento con Reynolds medio.</i>	53
<i>Figura 6. Voltaje contra tiempo en sistema estacionario.</i>	57
<i>Figura 7. Estado estacionario en un rango mayor de tiempo</i>	59
<i>Figura 8. Estado transitorio con un Reynolds muy bajo.</i>	60
<i>Figura 9. Comparación de potencial total teórico y potencial experimental.</i>	62
<i>Figura 10. Reynolds medio.</i>	65
<i>Figura 11. Comparación de los tres grupos de flujos</i>	66
<i>Figura 12. Concentración estado estacionario (a).</i>	68
<i>Figura 13. Concentración estado estacionario (b).</i>	69
<i>Figura 14. Tabla de concentraciones para Reynolds medio (a)</i>	72
<i>Figura 15. Concentraciones para Reynolds medio (b)</i>	74



## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Componentes principales del agua de mar. ....</i>	19
<i>Tabla 2. Sistema de electrodiálisis descrito en la literatura. (42).....</i>	38
<i>Tabla 3. Lista de membranas disponibles en el mercado (50; 51; 52; 53) .....</i>	48
<i>Tabla 4. Resultados obtenidos de voltaje en régimen estacionario.....</i>	55
<i>Tabla 5. Comparación de potencial total teórico con el experimental .....</i>	62
<i>Tabla 6. Reynolds medio.....</i>	64
<i>Tabla 7. Comparación de potencia total y potencia experimental .....</i>	65
<i>Tabla 8. Tabla de concentración estado estacionario (a) .....</i>	68
<i>Tabla 9. Tabla de concentración estado estacionario (b).....</i>	69
<i>Tabla 10. Tabla de concentraciones para Reynolds bajo (a) .....</i>	70
<i>Tabla 11. Tabla de concentraciones para Reynolds medio (b) .....</i>	73



## Abreviaturas y Siglas



### ABREVIATURAS Y SIGLAS

ACS	Membrana de intercambio aniónico monovalente Neosepta
AEM	Membrana de intercambio aniónico
AMV	Membrana de intercambio aniónico Selemion
AMX	Membrana de intercambio aniónico Neosepta
C	Capacitancia
CEM	Membrana de intercambio catiónico
CMV	Membrana de intercambio catiónico Selemion
CMX	Membrana de intercambio catiónico Neosepta
CSM	Membrana de intercambio catiónico monovalente Neosepta
E	Energía potencial
FAD	Membrana de intercambio aniónico Fumasep
FAK	Membrana de intercambio catiónico Fumasep
G	Energía libre de Gibbs
H, PP-b	Heterogénea, basado en PP Ácido fuerte
H PP-b tipo1	Heterogénea, basado en PP Base fuerte, Tipo 1
IEMs	Membranas de intercambio iónico
J, MJ	Julio, megajulio
mW, W, MW, TW, GW	Milivatio, vatio, megavatio, teravatio, gigavatio
mV, V	Milivolt, volt
Pa	Pascal
PRO	Ósmosis retardada por presión
Q	Cociente de reacción
Q <sub>v</sub>	Caudal
RED	Electrodiálisis inversa
RO	Ósmosis inversa
S	Tortuosidad
SGE	Energía del Gradiente Salino
SGP	Potencial del Gradiente salino
U	Voltaje
UPS	Unidades Prácticas de Salinidad
W	Potencia
µm	micrómetro



## 1 Resumen

El aumento de la población y con ella el incremento de la demanda energética mundial, ha ocasionado la sobreexplotación y el agotamiento de los combustibles fósiles, de donde la necesidad de aprovechar fuentes de energías limpias y renovables comienza a ser una obligación apremiante. Un importante grupo de fuentes de energía renovable fueron identificadas desde antes de la revolución industrial pero su desarrollo se detuvo por la facilidad y confiabilidad de las energías basadas en hidrocarburos. Desde hace décadas, algunas fuentes han sido estudiadas y su estado de madurez tecnológica es muy avanzado; otras fuentes, sea por su reciente descubrimiento o por que las condiciones científicas y tecnológicas no estaban dadas se encuentran en etapas muy incipientes de desarrollo. Es el caso de la conversión de la energía contenida en el agua salada, la cual se vislumbra como una alternativa promisoriosa pero que aún está sujeta a la solución de importantes retos de conocimiento y técnicos. En esta tesis se evaluó la eficiencia de la técnica de electrodiálisis inversa (RED, por sus siglas en inglés) para la generación de electricidad a partir de la separación, con membranas, de los iones de Cloruro de Sodio disueltos en agua. Para ello se construyó un modelo de laboratorio capaz de producir electricidad con el cual se probaron tres diferentes flujos. Se observó que al incrementarse el número de Reynolds el sistema es más eficiente (produce mayores voltajes) porque le es más difícil llegar al equilibrio. Se detectó una dependencia del sistema a la temperatura del ambiente y del agua y se mostró que el gradiente salino entre los compartimientos del modelo no es relevante en la eficiencia del proceso.



## 2 Introducción

El aumento exponencial de la población mundial, la sobreexplotación y el agotamiento de los combustibles fósiles son situaciones globales que ponen de manifiesto la urgente necesidad del aprovechamiento de fuentes de energía limpias (1). La mayor parte del territorio mexicano es abastecida con energía proveniente de combustibles fósiles, lo cual significa un alto costo ambiental y, en la medida que estas fuentes se agoten, un importante riesgo de deficiencias en el suministro. En contraste, las energías renovables son de libre disposición, se distribuyen en amplias zonas, suelen encontrarse cerca de zonas de demanda y su aprovechamiento tiene impactos ambientalmente sostenibles.

Actualmente la lista de energías renovables incluye distintas fuentes naturales, entre las que se encuentran la energía solar, geotérmica, hidráulica, eólica, de biomasa y marina. De esta última se puede aprovechar la energía en forma de cinco fuentes: una, la energía de gradiente térmico oceánico (OTEC, por sus siglas en inglés), proviene de la característica de las masas de agua de tener muy distintas temperaturas en la superficie y en el fondo; otra forma de energía marina proviene de las fuerzas de atracción gravitacional entre la Tierra, el Sol, la Luna y otros astros, que generan ondas muy largas que viajan por el planeta y se conocen como mareas (energía mareomotriz) de éstas se puede tomar su energía cinética en forma de corrientes y la potencial en forma de columna de agua. La tercera forma es la energía cinética del viento en aguas profundas (energía eólica de mar adentro); la cuarta forma es la energía potencial o cinética que acompaña al flujo oscilatorio superficial producido por el viento y la atracción gravitatoria terrestre conocida como oleaje (energía undimotriz) y finalmente la quinta forma es la energía química disponible a partir de las diferencias de salinidad entre el agua dulce y marina (energía del gradiente salino) (2).

Desde 1950 se conoce la posibilidad de extraer energía limpia y renovable del flujo entre agua dulce y agua salada, también nombrada energía azul, energía de gradiente salino (SGE, por sus siglas en inglés) o potencial del gradiente salino (SGP, por sus siglas en inglés). El principio básico para la obtención de energía del gradiente salino es el incremento irreversible de entropía en un sistema, al mezclarse dos soluciones con distinta concentración salina, tal como ocurre en la desembocadura de un río. Este cambio en la entropía puede utilizarse para convertir parte de la energía térmica de los fluidos en energía eléctrica. Aproximadamente por cada metro cúbico de agua de río que ingresa al mar, se



disipan 2.3 MJ de energía libre, parte de la cual se puede coleccionar para generar energía eléctrica (3).

Diversos esfuerzos se han enfocado en estimar la energía que puede extraerse del gradiente salino. La posible producción de energía, a nivel mundial, a partir de gradiente salino está estimada en más de 1600 TWh (4). Los primeros estudios en los años setentas del siglo pasado, de cuantificación del potencial teórico de SGE en bocas de ríos fue estimando entre 1.4 y 2.6 TW (5). Estudios más recientes han cuantificado un potencial teórico de 0.23 TW, 3.13 TW y 1.724 TW (15,102 TWh, equivalente al 74 % del consumo mundial de electricidad en 2011), donde sólo la última evaluación consideró la salinidad del océano cerca del río (6) .

Actualmente la obtención de energía a partir de gradientes de salinidad se realiza principalmente con dos técnicas: ósmosis retardada por presión (PRO, por siglas en inglés) y electrodiálisis inversa (RED, por sus siglas en inglés). Ambas tecnologías son muy prometedoras, pero se ha demostrado que RED es más eficiente que PRO para los gradientes de salinidad conocidos entre agua dulce y agua de mar; mientras que PRO es una tecnología más atractiva para aplicar en aguas con mayores gradientes de concentración de sales (7).

Al día de hoy la compañía Noruega de energías renovables Statkraft tiene la primera planta a escala industrial de generación de energía utilizando la técnica PRO. En este prototipo se evalúa y se optimiza el proceso para maximizar la cantidad de energía que se obtiene del gradiente salino a través de mejoras continuas en la tecnología de membranas (3).

Existen muy pocos estudios que han evaluado los efectos ambientales y sociales que se producen como consecuencia de la implementación de plantas de energía de gradiente salino. Pese a no existir una metodología adecuada para la medición de dichos efectos, en la literatura especializada ya se han identificado algunos de los impactos que dichas tecnologías podrían ocasionar en los ecosistemas. Este tema queda fuera del alcance de la presente tesis.



### 3 Antecedentes

El potencial energético de gradiente salino a partir del uso de membranas de intercambio iónico (IEMs, por sus siglas en inglés) fue descrito por primera vez por Pattle, 1954, quien diseñó un módulo con capas alternas de agua dulce y salada separadas por membranas de intercambio catiónico y aniónico. El objetivo de dicho arreglo es producir un flujo neto de iones (es decir, una corriente iónica) a través de las membranas (2). Esta corriente iónica se convierte en corriente eléctrica dentro de un circuito cerrado externo gracias a la presencia de electrodos en los dos extremos del módulo y en presencia de una pareja REDOX. Este diseño es la base de la técnica RED (8).

Desde entonces y durante los siguientes 20 años los avances en el desarrollo de técnicas de conversión de SGE no fueron significativos (8) y fue hasta 1973 por la crisis energética del petróleo, que las energías renovables fueron retomadas como objeto de investigación. Norman, 1974 describió un sistema basado en el uso de membranas osmóticas. El sistema constaba de dos módulos, uno de agua dulce y otro de agua salada separado por una membrana semipermeable. El agua dulce penetra a través de la membrana al módulo de agua salada generando un cambio en la presión hidrostática debido a la diferencia de presión osmótica de las dos corrientes. Este cambio de presión hidrostática se convertiría entonces en energía mediante el uso de una turbina hidráulica y un generador. Más tarde Loeb y Norman, 1975 nombraron esta tecnología ósmosis por presión retardada. Recientemente, a la luz de una mejor comprensión del funcionamiento del sistema y del intercambio que ocurre en esta técnica sea cambiado el nombre por ósmosis retardada por presión.

Más tarde Loeb, 1978 desarrolló la técnica de RED, que, a diferencia de PRO, como ya se explicó, no aprovecha la presión del agua, sino las cargas positivas y negativas que hay en una masa de agua salada y en otra de agua dulce, separadas por una membrana selectiva con una corriente eléctrica aplicada.

Broglioli, 2009 propuso un método llamado mezclas capacitivas (CapMix), el cual hace uso de electrodos capacitivos que acumulan y eliminan iones de una solución de alta salinidad (9). En el mismo año se inauguraba en Tofte (Noruega) la primera planta de PRO, la producción de la planta era de  $1 \text{ W/m}^2$ . Las membranas fueron el principal problema de esta planta ya que se tapaban y perdían efectividad rápidamente.



En 2014 el centro de investigación Wetsus (centro de excelencia para tecnologías sostenibles de agua) y varias empresas privadas como Redstack Fujifilm, Hak, Alliander y Magneto Especial Anodos inauguraron, en Holanda, la primera planta de RED; el proyecto “Blue Energy”. Esta planta tiene una capacidad instalada de 50 GW utilizando el agua dulce del lago IJsselmeer y el agua salada del mar del Norte disponible en Afsluitdijk.

### **3.1 Problemática**

El creciente incremento de la población produce una gran demanda de energía, por lo que se han sobreexplotado las fuentes fósiles y las energías renovables existentes no son suficientes. La huella ecológica de ello, ya irreversible, debe mitigarse modificando el paradigma energético mundial.

Al cierre de 2016 el 98.5 % de la población contaba con servicio de energía eléctrica, las ventas de electricidad se incrementaron 2.8 % (equivalente a 5,871 GWh), respecto al año anterior, destacando el sector industrial que concentró el 57 % del total de ventas registradas para ese año (10).

Para poder abastecer la creciente demanda de energía eléctrica, la capacidad instalada del sector eléctrico creció a un ritmo anual de 2.9 % en la última década, pasando de 56,317 MW en 2006, a 73,510 MW en 2016, lo que significó un incremento de 30 % en solo 10 años. De lo reportado en 2016, 71.2 % del total del parque de generación, corresponde a centrales de tecnologías convencionales y el restante 28.8 % a centrales con tecnologías limpias.

Por lo anterior, la necesidad de investigar y hacer más eficientes las tecnologías para convertir las fuentes renovables es imprescindible si se pretende satisfacer las necesidades de la población.

### **3.2 Justificación**

Esta tesis se realizó con el fin de evaluar la técnica RED para la generación de energía y cómo ésta puede satisfacer en un futuro las necesidades de la población. En el contexto actual del deterioro del ambiente y agotamiento de los combustibles fósiles, la energía marina se ha convertido en una alternativa a los recursos energéticos tradicionales.

Sin embargo, al estar en un primer paso de desarrollo, extraer energía del océano se considera aún difícil y costoso. Los modelos existentes para evaluar los costos de la energía marina a menudo se simplifican demasiado, lo que lleva a grandes incertidumbres y por ello los inversionistas retroceden. Esto, a su vez, hace que la penetración de las energías marinas al mercado mundial sea sumamente lenta. Es



por ello que la investigación y desarrollo tecnológico dedicados a comprender y mejorar los sistemas, en la búsqueda de mejorar las condiciones de explotación comercial sigue siendo un reto técnico y científico.

La energía marina de la cual es estudiada en la presente tesis es el gradiente salino que se encuentra en la naturaleza cuando los ríos se encuentran o desembocan en el mar.

Las estimaciones del potencial energético mundial práctico para los gradientes de salinidad entre el agua del río y el del mar sugieren que se podría satisfacer el 3 % de la demanda mundial de energía.

La técnica RED es una de las tecnologías más ampliamente estudiadas en los años recientes; se ha demostrado que puede ser adecuada para diferentes aplicaciones como recuperación de calor residual utilizando soluciones de bicarbonato de amonio, tratamiento de aguas residuales cuando se combina con procesos biológicos, agua electrolisis del agua para la producción de hidrógeno y extracción de energía con electrodos REDOX o capacitivos (11; 12).

México se ha caracterizado por una extraordinaria diversidad de situaciones ambientales, socio-económicas y culturales.

La privilegiada ubicación geográfica de México posiciona al país de manera estratégica en el contexto mundial, entre los dos océanos más grandes del planeta. La superficie de la zona económica exclusiva (2,715,012 km<sup>2</sup>) del país, incluida la del mar territorial (231,813 km<sup>2</sup>), es más extensa que la superficie continental de México (1,959,248 km<sup>2</sup>), y constituye un espacio del territorio nacional que debe ser administrado de manera sustentable, para beneficio de la nación (13).

La longitud de costa del país, sin contar la correspondiente a las islas, es de 11,122 km. En el litoral del Pacífico y Golfo de California se tienen 7,828 km y 3,294 km en el Golfo de México y Mar Caribe.

En el territorio mexicano los ríos se encuentran en tres vertientes: Occidental o del Pacífico, Oriental o del Atlántico (Golfo de México y Mar Caribe) e Interior, en la que los ríos no tienen salida al mar, entre la vertiente Occidental o del Pacífico y Oriental o del Atlántico destacan aproximadamente 146 ríos por ejemplo el Rio Bravo que cuanta con 2001 km y descarga en el Golfo de México y el Rio Balsas que tiene una longitud de 771 km, en este río se encuentran importantes plantas generadoras de electricidad como la central de Infiernillo (14).

También existen lagunas costeras que descargan en el mar lo cual sería un mejor sitio de investigación para la energía de gradiente salino ya que son sitios más someros, lo que quiere decir que son potencialmente hipersalinos. En México



existen 125 lagunas costeras, la gran mayoría de las cuales están circundadas por una espesa vegetación de manglar, la cual, por defoliación, aporta gran cantidad de materia orgánica al sistema (15).

Con el incremento de la participación de fuentes renovables, México se beneficiaría con disminución de las tarifas de luz, generación de empleos directos para desarrolladores, fabricantes de equipo, diseñadores, instaladores y financieros, así como la generación de empleos indirectos en agricultura, al expandir los sistemas de riego; en ganadería y en avicultura, con la instalación de establos electrificados; en el comercio y los servicios (16).



## 4 Hipótesis y Objetivos

En el sistema propuesto presenta un intercambio de iones para producir un potencial el cual genera energía limpia por medio de la modificación en la variación de flujos obteniendo un comportamiento óptimo donde, a mayor flujo, menor concentración obteniendo tiempo de residencia mayor.

### 4.1 Objetivo general

Fabricar un dispositivo en sistema abierto de 30 cm<sup>3</sup> para la generación de electricidad a partir de electrodiálisis inversa para comprender el proceso de flujo iónico y generar conocimiento respecto del funcionamiento de las membranas de intercambio iónico. Se realizarán los experimentos con agua salina sintética a una concentración 35 % m/m a nivel laboratorio.

### 4.2 Objetivos específicos

- Evaluar del potencial energético de la técnica RED, realizando diferentes pruebas en condiciones controladas.
- Valorar la transferencia de masa en las membranas, realizando mediciones de concentración de salinidad en diferentes puntos en el dispositivo.
- Calcular el régimen en el cual debe operar el sistema realizando pruebas en diferentes regímenes de flujo.
- Aprender el desempeño del Ti como electrodo.

### 4.3 Organización del trabajo

**Introducción:** Se describe la situación mundial que hace evidente la necesidad de emplear fuentes de energía renovable.

**Antecedentes:** Aquí se describen los fenómenos físico-químicos que se generan en la técnica RED para la conversión de energía por salinidad. La comprensión de dichos fenómenos facilita el análisis de resultados y las conclusiones del trabajo.

**Metodología:** Se describen los pasos necesarios para llevar a cabo los experimentos que se describen en el siguiente apartado.

**Desarrollo:** Se describen los experimentos de técnica RED en sistema abierto realizados el laboratorio de costas y puertos del Instituto de Ingeniería.



**Resultados:** Aquí se presenta el procesamiento de los datos obtenidos resumidos en gráficos y tablas que sintetizan los resultados de cada prueba.

**Conclusiones:** Se presenta un análisis de los resultados obtenidos en el trabajo experimental; la relación entre el número de Reynolds y la generación de potencia, así como la permselectividad de las membranas. También se describen, las futuras líneas de investigación que deja abiertas esta tesis.



## 5 Marco teórico

En este capítulo se presentan una serie de conceptos y definiciones relevantes para

### 5.1 Características del agua

El agua es un líquido incoloro, casi inodoro e insípido, esencial para la vida animal y vegetal y el más empleado de los disolventes.

En los procesos de RED y PRO para la conversión de la energía por salinidad, son importantes las características tanto del agua de mar como del agua dulce, ya que de ellas depende la viabilidad de los sistemas de generación de electricidad. Por ello, a continuación, se describen los dos tipos de agua.

#### 5.1.1.1 *Agua de mar*

El agua de mar es una solución acuosa en la que se encuentran disueltos una variedad de compuestos químicos, de los cuales la mayoría son sales y gases atmosféricos; a ellos se suman materiales sólidos de tipo orgánico e inorgánico. También forman parte del agua de mar algunos organismos microscópicos vegetales conocidos como fitoplancton y animales conocidos como zooplancton. Éstos, además de poblarla, participan de su composición actuando sobre las concentraciones de las sustancias disueltas o suspendidas.

*Tabla 1. Componentes principales del agua de mar.*

Compuesto	Peso (g)	Proporción en el contenido total de sales (%)
Cloruros	18.980	55.043
Sodio	10.556	30.613
Sulfatos	2.649	7.682
Magnesio	1.272	3.689
Calcio	0.400	1.160
Potasio	0.380	1.102
Bicarbonatos	0.140	0.406
Bromuros	0.065	0.189
Ácido bórico	0.026	0.075
Estroncio	0.013	0.038
Fluoruros	0.001	0.003
Agua	965.518	0.000
Total	1000	100



Aproximadamente el 71 % de la superficie de la Tierra lo cubren océanos y mares, mientras que del agua dulce solo abarca un 3 % del volumen.

#### 5.1.1.1.1 Características físico-químicas del agua de mar

El agua de mar tiene una densidad aproximada de 1025 kg/m<sup>3</sup>.

Alcalinidad: el agua de mar tiene un grado de acidez (pH) que fluctúa entre 7.6 y 8.4.

Conductividad eléctrica: la capacidad de conducción de la electricidad a través del agua de mar es directamente proporcional a la presión ejercida por la columna de agua (presión hidrostática).

Transmisión del sonido: en el mar, la velocidad de propagación del sonido fluctúa entre 1400 y 1600 m/s, la que a su vez dependerá de la temperatura, la salinidad y la presión, siendo la primera el parámetro de mayor incidencia debido a las variaciones que presenta dentro de la columna de agua.

#### 5.1.1.2 **Agua dulce**

El agua dulce es la que se encuentra naturalmente en la superficie de la Tierra, en campos de hielo, glaciares, icebergs, humedales, lagos, arroyos y ríos, y bajo la superficie de la tierra como acuíferos y agua subterránea.

El agua dulce a diferencia del agua de los mares se caracteriza generalmente por contar con una baja concentración de sales y sólidos disueltos.

El agua dulce es un recurso natural renovable y variable, pero también limitado. El agua dulce sólo puede reponerse a través del ciclo del agua, un proceso en el cual el agua de los mares, lagos, bosques, tierras, ríos y embalses se evapora, forma nubes y vuelve a través de la precipitación. Sin embargo, si a nivel local las actividades humanas consumen más agua dulce de la que se restaura naturalmente, esto puede resultar en una menor disponibilidad de agua dulce a partir de fuentes superficiales y subterráneas y puede causar graves daños al entorno y ambientes asociados.

#### 5.1.1.2.1 Características físico-químicas del agua dulce

El agua pura es un mal conductor de la electricidad, pero cuando contiene sales se convierte en un buen conductor porque hay presencia de iones con cargas eléctricas (17).

Posee un alta constante dieléctrica que implica la facilidad de ionización que tienen las sales que disuelven en ella.



Al agua se le llama el "solvente universal" porque disuelve más sustancias que cualquier otro líquido. Esto significa que a donde vaya el agua, ya sea a través de la tierra o a través de nuestros cuerpos, lleva consigo valiosos químicos, minerales y nutrientes.

El agua tiene un alto índice específico de calor. El agua puede absorber mucho calor antes de empezar a calentarse. También ayuda a regular el rango de cambio de la temperatura del aire, y ésta es la razón por la cual la temperatura cambia gradualmente durante las estaciones del año, especialmente cerca de los océanos.

## 5.2 Membranas

Una membrana se puede considerar una barrera o película permeo selectiva entre dos medios fluidos, que permite la transferencia de determinados componentes de un medio al otro a su través y evita o restringe el paso de otros componentes (18).

Las sintéticas comerciales, en su gran mayoría, son preparadas a partir de materiales poliméricos con características químicas y físicas variadas. Las membranas pueden ser clasificadas en dos grandes categorías: densas y porosas y de ello depende su posible aplicación.

Tanto las membranas densas como porosas pueden ser isotrópicas o anisotrópicas, es decir, pueden o no representar las mismas características morfológicas a lo largo de su espesor. Las membranas anisotrópicas se caracterizan por una región superior muy fina ( $\approx 1\mu\text{m}$ ), más cerrada (con poros o no), llamada de piel, sobrellevada en una estructura porosa.

Existen dos tipos de parámetros normalmente empleados para caracterizar membranas: parámetros de naturaleza morfología y parámetros relativos en sus propiedades de transporte. Las membranas porosas, además, se caracterizan por la distribución del tamaño del poro, porosidad superficial y espesor. Independientemente del tipo de membrana, las propiedades de transporte como permeabilidad y capacidad selectiva son parámetros indicativos de su desempeño (19).

## 5.3 Salinidad

Se entiende por salinidad la concentración de sales disueltas en el agua oceánica, el valor medio de este parámetro es de 35 ppm (35 partes por millón).



La salinidad varía entre el ecuador y los polos por dos factores principales: la temperatura y la lluvia. Entre más alta es la temperatura hay mayor evaporación, con lo que aumenta la concentración de sales. Por el contrario, las lluvias aportan agua dulce ya sea directamente o por medio de los ríos, lo que disminuye la salinidad.

La salinidad es una propiedad química que resulta de la combinación de diferentes sales que se encuentran disueltas en el agua de mar, siendo las principales los cloruros, carbonatos y sulfatos. La formación de dichas sales ocurre por de la interacción entre iones, de signos opuestos que en el caso de estar cargados positivamente se denominan cationes y si la carga es negativa se denominan aniones (20)

## 5.4 Desalinización

Un sistema de desalinización es aquel que se alimenta de agua salobre o marina y que tiene la capacidad de acondicionar y eliminar las sales al agua para obtener un producto y un rechazo o salmuera. La desalinización de agua salobre y de mar se realiza principalmente con dos grupos de técnicas las que utilizan combustibles fósiles (sistemas térmicos) y las que utilizan membranas y alta presión.

Medina menciona que la desalinización consiste en un proceso de separación de sales disueltas de agua salobre o de mar para convertirla en agua adecuada para consumo humano, industrial o de riego. Existen diversas tecnologías desarrolladas en la actualidad para desalinizar el agua de mar y aunque tienen características distintas de acuerdo con el tipo de energía, diseño y producción que requiere cada una, todas tienen el mismo objetivo: reducir la concentración de sales disueltas del agua de mar; ello permite distinguir entre los procesos que separan el agua de las sales y los que realmente efectúan la separación de las sales de la solución (21).

El 39 % de la población mundial vive a una distancia inferior a 100 km del mar. Por ello, la desalación se ha convertido en una alternativa para el abastecimiento de agua a islas y zonas costeras con elevadas demandas y recursos escasos. Actualmente, la producción total de agua desalada en el mundo podría cubrir las necesidades de una población algo superior a los 100 millones de habitantes (22).

Los principales procedimientos de desalinización el agua de mar son:



### **5.4.1.1      *Sistemas térmicos***

#### **5.4.1.1.1      Destilación por compresión mecánica de vapor**

Los sistemas de destilación por compresión mecánica de vapor funcionan comprimiendo vapor de agua, lo que causa condensación sobre una superficie de transferencia de calor (un tubo), que a su vez transmite el calor de la condensación a la salmuera del otro lado de la superficie, resultando en la vaporización de ésta. El compresor es el elemento del sistema que requiere energía. El compresor aumenta la presión en el lado del vapor y baja la presión del lado del agua salada para disminuir su temperatura de ebullición. (23)

#### **5.4.1.1.2      Destilación flash multi-etapa**

Las plantas de destilación flash multi-etapa (MSF por sus siglas en inglés) constituyen una gran parte de la capacidad de desalinización mundial. En este proceso, el agua de mar se calienta en un tanque por medio de un serpentín o tubos en paralelo que contienen algún fluido caliente; después se pasa a otro tanque, llamado etapa, donde la presión reducida permite que el agua hierva. El agua vaporizada se enfría y condensa para obtener agua sin residuos de sales (24).

#### **5.4.1.1.3      Desalación solar**

Consiste en recolectar en piscinas en tierra el agua de mar y dejar evaporar el agua durante largos periodos, para obtener la sal sin restos de agua.

### **5.4.1.2      *Procesos a través de membranas***

#### **5.4.1.2.1      Electrodialisis**

La electrodialisis consiste en el paso de iones a través de membranas permeables selectivas, bajo el efecto de una corriente eléctrica. Se colocan, en forma alternada, una serie de membranas catiónicas y aniónicas, entre dos electrodos, entre los cuales circula el agua a tratar. Las membranas, permeables sólo a los cationes o los aniones, limitan la migración de los iones entre los dos electrodos, recogiéndose así, separadamente, una corriente de agua desmineralizada y otra enriquecida en iones (25).

#### **5.4.1.2.2      Ósmosis inversa**

Este método se utilizan membranas semipermeables que permiten el paso del agua, pero no el de las sales disueltas en ella. Si se separan por una membrana semipermeable dos compartimientos abiertos a la atmósfera, uno de los cuales contiene agua pura y el otro una solución acuosa de sales, se comprueba que el agua atraviesa la membrana hacia la solución y que la presión del lado de la solución aumenta hasta alcanzar un cierto valor (presión osmótica) suficiente para



anular el caudal de agua que atraviesa la membrana. Este fenómeno constituye la ósmosis directa y se da, en forma general, entre dos soluciones acuosas de diferentes concentraciones. (26)

#### **5.4.1.3 Congelación**

Consiste en someter el agua salina a diversos tipos de congelación tomando en cuenta los puntos de fusión del agua dulce y el agua salada, los cristales de hielo (libres de sales) se separan mediante un lavado de las sales y derretidos para la obtención de agua dulce.

### **5.5 Desarrollo sostenible**

El desarrollo sostenible es “el proceso de crecimiento económico en el que la tecnología, la explotación de los recursos y la organización social y política satisfacen las necesidades del presente sin comprometer las de las generaciones futuras” (27). Esto se puede interpretar como una posición moderna ante problemas ambientales en donde las organizaciones y la sociedad deben formar parte de actividades que se puedan sostener sobre un largo plazo y que al mismo tiempo se renueven de forma automática, es decir, el desarrollo sostenible busca en sus raíces: el cuidado, la protección y la sustentabilidad del medio ambiente (28).

En años recientes y, fundamentalmente después de la múltiple crisis global, el concepto de crecimiento verde o economía para un desarrollo sostenible e incluyente ha irrumpido en la escena política internacional con mayor vigor. Escasamente utilizado antes de 2008, actualmente este término ocupa un lugar destacado en el discurso de instituciones económicas y de desarrollo internacionales. Si bien aún no existe consenso sobre el sentido preciso de esta definición, las propuestas existentes discurren en un arco que varía desde la conciliación de la reducción de emisiones con el crecimiento económico hasta un plan integral para mejorar la eficiencia de los recursos y la sostenibilidad ambiental del sistema capitalista.

Se estableció en el 2015 una serie de 17 objetivos en la agenda del 2030, dichos objetivos son universales y rigen los esfuerzos de los países para lograr un mundo sostenible. Estos nuevos objetivos presentan la singularidad de instar a todos los países, ya sean ricos, pobres o de ingresos medianos, a adoptar medidas para promover la prosperidad al tiempo que protegen el planeta (29).



El objetivo 7 del desarrollo sostenible “Energía asequible y no contaminante” señala que para garantizar energía a las generaciones futuras se debe invertir en fuentes de energía limpias, como solar, eólica, térmica y oceánica (30).

Se establecieron los siguientes objetivos para 2030:

- Garantizar el acceso universal a servicios de energía asequibles, confiables y modernos.
- Aumentar sustancialmente el porcentaje de la energía renovable en el conjunto de fuentes de energía.
- Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
- Aumentar la cooperación internacional a fin de facilitar el acceso a la investigación y las tecnologías energéticas no contaminantes, incluidas las fuentes de energía renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructuras energéticas y tecnologías de energía no contaminante.
- Ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios de energía modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo.

Se define la sostenibilidad energética, entonces, como el equilibrio entre tres dimensiones principales: la seguridad energética, la sostenibilidad ambiental y la equidad social. En otras palabras, se trata de llevar el concepto de equilibrio entre las dimensiones económica, social y ambiental, propuesto por desarrollo sostenible, al plano energético, reconociendo que la energía es clave y básica para el desarrollo de cualquier sociedad (31).

Se ha visto a lo largo del tiempo que si no se erradica la pobreza no se podrá resolver el problema energético-ambiental con el que se vive en muchas partes del planeta.

## **5.6 Energías renovables**

El marco legal mexicano define a las energías renovables como aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por el ser humano, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica, y que, al ser generadas, no liberan emisiones contaminantes (32).



Para llevar a cabo la transición energética se requiere de un conjunto de instrumentos de política nacional en materia de obligaciones de energías renovables y aprovechamiento sostenible de la energía, a mediano y largo plazos. Esto con la finalidad de fomentar una mayor participación de las energías renovables en la planeación del sector, diversificando la matriz energética y reducir, bajo criterios de viabilidad económica, la dependencia del país de los combustibles fósiles como fuente primaria de energía (33).

Desde 2016 se ha logrado implementar el mercado competitivo que impulsa su desarrollo, sin embargo, las energías renovables se siguen enfrentando a muchos retos debido a la inestabilidad de los recursos, los costos de producción y la variabilidad intrínseca de las fuentes.

## **5.7 Energías del mar**

Los océanos contienen el 97 % del agua presente en la tierra y el 71 % de la superficie de la tierra está cubierta por agua de mar. Aproximadamente 3 000 millones de personas viven a menos de 200 km de la costa y es probable que la migración duplique este número para 2025. Por lo tanto, las fuentes de energía oceánica pueden ofrecer un potencial listo para el suministro de energía, calefacción y refrigeración, agua potable y otros productos a los mercados costeros. (34).

Los mares constituyen una enorme fuente de energía, disponible en diversas formas, como son:

### **5.7.1 Corrientes de marea**

Consiste en el aprovechamiento de la energía cinética corriente marina provocada por las grandes masas de agua que circulan a lo largo del planeta debido a la diferencia de temperatura que hay entre el ecuador y los polos a las diferentes salinidades en las regiones marinas. Generalmente la energía cinética puede ser aprovechada cerca de la costa, particularmente donde se encuentran formaciones geomorfológicas como estrechos, islas y cuerpos semi-cerrados en los que la velocidad es amplificada por la reducción del área hidráulica.

El principal reto para el aprovechamiento de este tipo de corrientes es su carácter oscilatorio que hace que el sentido cambie hasta en 180° una o dos veces al día.



### **5.7.2 Corrientes oceánicas**

Los grandes sistemas de corrientes marinas del océano, son enormes masas de agua con patrones complejos, impulsadas por el viento y el calentamiento solar de las aguas superficiales cerca del ecuador.

Las corrientes oceánicas son relativamente estables en el tiempo y el espacio, atraviesan océanos, bordean y bañan costas de continentes completos y son portadoras de un gran potencial energético. El reto principal del aprovechamiento de las corrientes oceánicas es que se encuentren a grandes profundidades.

### **5.7.3 Amplitud de mareas**

Esta es la energía potencial que gana la superficie del agua por la diferencia de altura entre la pleamar y bajamar.

Las mareas cuentan con un tiempo característico en que suben y bajan. El tiempo que transcurre entre las dos alturas la máxima y la mínima se le denomina periodo y es aproximadamente de 24 horas cuando la manera es diurna o de 12 horas cuando es semidiurna o mixta. Esta diferencia de alturas puede aprovecharse interponiendo partes móviles al movimiento natural de ascenso o descenso de las aguas, junto con mecanismos de canalización y depósito, para obtener movimiento en un eje.

### **5.7.4 Oleaje**

Es el aprovechamiento energético del movimiento ondulatorio de la superficie del mar.

El oleaje es generado por la fricción del viento que sopla sobre la superficie del océano y suele ser muy irregular. Las alturas de las olas y, por lo tanto, su energía es mayor en latitudes más altas (más de 40 ° desde el Ecuador por ejemplo en las costas del norte de Estados Unidos), donde los vientos alisios soplan en grandes extensiones de mar abierto y transmiten su energía al océano en forma de oleaje. Las costas orientadas al oeste de los continentes tienden a tener mejores recursos de energía del oleaje por ejemplo la Costa del Pacífico Mexicano.

### **5.7.5 Energía térmica oceánica**

El potencial térmico del océano surge de la diferencia de temperaturas entre el agua superficial, que puede estar más de 20 °C más caliente que la temperatura a grandes profundidades. El agua caliente se utiliza para evaporar un fluido de trabajo



que moverá una turbina, mientras que el agua fría se utiliza para condensar dicho fluido y repetir el ciclo (34).

Este tipo de energía es prácticamente inagotable puesto que está relacionada con grandes procesos climatológicos, sin embargo, se busca que su instalación sea donde la temperatura superficial del agua sea muy elevada.

### **5.7.6 Gradiente salino**

Esta es la energía que se obtiene a través de la diferencia de concentraciones entre el agua dulce y el agua de mar. Se sabe que el agua de los mares en comparación con el agua de los ríos es hasta 200 veces más salina.

La energía del gradiente salino es completamente renovable y sostenible. Es la que posee la densidad de energía más alta de todas las fuentes de energía renovables marinas. En la década de 1970, se reconoció que el poder de salinidad o "la energía representada por el gradiente de concentración de salinidad entre el agua dulce y el agua de mar" podría ser un recurso atractivo, grande y sin explorar.

El principio de la energía del gradiente salino se basa en la mezcla de dos soluciones con distinta concentración salina. Por ejemplo, al entrar en contacto agua de río con agua salada, la cantidad teórica de energía que puede ser extraída es igual a la variación en la energía libre de Gibbs (8).

**Existen varias tecnologías para aprovechar el gradiente salino:**

#### **5.7.6.1 Presión osmótica retardada (PRO)**

La tecnología PRO consiste en un sistema que contiene dos soluciones con diferente concentración de sal, las cuales se ponen en contacto mediante una membrana semipermeable al agua, a través de la cual hay intercambio solo desde la solución diluida a la solución concentrada. Cuando se aplica presión hidrostática a la solución concentrada, el transporte de agua será retardado. Cuando el transporte de agua va desde la solución diluida a la concentrada a alta presión, se tiene como resultado una presurización del volumen de agua que puede ser aprovechado por una turbina de impulso (35; 36).

La tecnología PRO es recomendable cuando el gradiente de salinidad es mayor, ya que cuando las concentraciones son parecidas a las de río o mar su desempeño no es tan bueno.



#### 5.7.6.1.1 Membranas para PRO

Para esta técnica no se han diseñado una tecnología suficientemente buena para las membranas, estas deben ser lo suficientemente fuerte para soportar la presión hidráulica de la solución de extracción. Son películas hechas de algún material sintético por lo general de poliamida, estas membranas por lo general están en forma de rollo separadas por una rejilla plástica interior que la contiene.

En la técnica PRO, la membrana es un material funcional ya que el rendimiento de las membranas depende en términos de caudales y selectividades estando en función principalmente de la naturaleza de los elementos contenidos en las dos fases y de la fuerza directriz que se aplica.

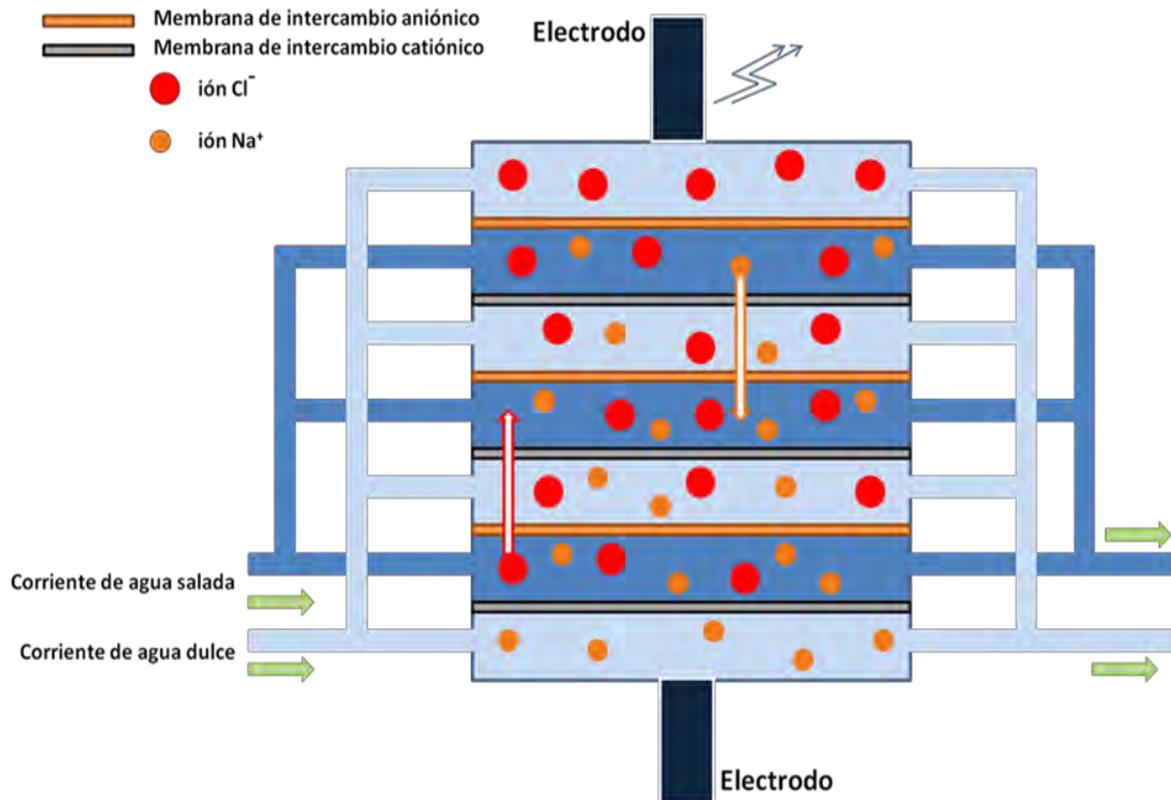
#### 5.7.6.2 *Electrodiálisis inversa (RED)*

La tecnología RED permite convertir la energía libre del mezclado de dos soluciones con diferente concentración de sal en energía eléctrica, mediante el paso de aniones y cationes a través de membranas de intercambio iónico selectivas. El paso de iones se da desde los compartimientos con soluciones concentradas de salmuera hacia los compartimientos que contienen soluciones diluidas, las cuales se intercalan entre sí. El gradiente de salinidad que se genera mediante este arreglo intercalado, constituye una diferencia de potencial químico a través de cada membrana, que se manifiesta en un potencial de membrana, el cual se traduce en una diferencia de potencial eléctrico entre las dos caras de una membrana. La diferencia de potencial total entre los compartimientos extremos de la pila se calcula como la sumatoria de los potenciales de cada una de las membranas.

La técnica de electrodiálisis inversa, hace uso de membranas de intercambio iónico (IEMs) que son responsables de controlar el paso de iones entre corrientes con diferente salinidad, lo que hace a las membranas el componente clave en el proceso de este sistema. Dichas membranas se colocan en una pila de módulos alternando una membrana de intercambio catiónico (CEM, por sus siglas en inglés) y una membrana de intercambio aniónico (AEM, por sus siglas en inglés). La distancia que separa a las dos membranas utiliza espaciadores poliméricos que garantizan el grosor de compartimiento adecuado. Estas unidades de membrana se repiten en la pila (nombrada célula par) y contienen cuatro elementos: una CEM, una AEM, un compartimento de solución concentrada y un compartimento para la solución diluida (Figura 1). En la pila de membranas, el sistema tiene canales alternados por donde se controla el flujo de entrada y salida de agua con distinta salinidad. La diferencia de concentración entre ambas soluciones actúa como fuerza transportadora de los iones que pasan a través de las membranas, las



cuales controlan su paso mediante su permeabilidad, es decir, los cationes (principalmente  $\text{Na}^+$ ) entran a través de las CEM y los aniones (principalmente  $\text{Cl}^-$ ) a través de las AEM, viajan en direcciones opuestas. La corriente iónica que atraviesa las membranas es convertida en una corriente eléctrica a través de reacciones REDOX que se llevan a cabo en los dos extremos de la pila donde se colocan los electrodos. Las reacciones REDOX son posibles porque los compartimentos terminales de la pila (compartimientos de electrodos) contienen una solución de electrolito (solución de enjuague de electrodo, ERS por sus siglas en inglés) con una pareja REDOX adecuada (por ejemplo, cloruro de  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ) (7; 8). Cuando no hay carga externa conectada a los electrodos (en condiciones de voltaje de circuito abierto) la diferencia de potencial químico entre las dos soluciones es contrarrestada por la tensión que surge en las interfaces de membrana y no se genera corriente iónica dentro de la pila. (26).



**Figura 1. Principio de tecnología RED para la extracción de energía del SGE. (37)**

Entre las ventajas de obtener energía a partir del gradiente salino se encuentran: el hecho que existe un suministro continuo de materia prima (si se usa agua de río y



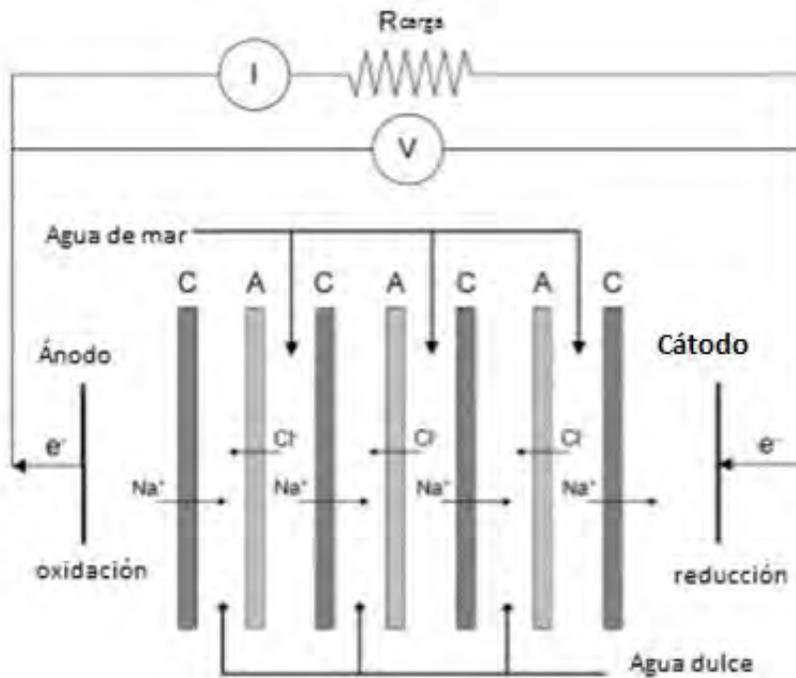
agua de mar), no hay producción de contaminantes atmosféricos que aporten al cambio climático tales como NOX o CO<sub>2</sub>, no hay aumentos de temperatura, ni desechos radioactivos y no hay fluctuaciones diarias abruptas en la producción de energía debido a cambios en radiación solar o velocidad del viento, entre otros factores que varían diariamente (38) .

Los sistemas RED descritos en la literatura (38) se pueden clasificar en dos grupos, abiertos (39) y cerrados (38).

**Sistemas cerrados:** Son sistemas con reacciones de electrodos opuestas y una solución electrolítica que recircula. No hay reacción química neta. Este tipo de sistemas puede generar energía eléctrica con pocas celdas, debido a que no hay consumo neto de energía, no hay pérdida de componentes químicos (excepto por transporte indeseado a través de las membranas externas) y no hay producción de gases. En este caso se pueden elegir electrodos inertes o electrodos que participen activamente en la reacción química, el problema que presenta este último tipo de electrodos es que un electrodo está aumentando su masa, mientras el otro se está disolviendo. Por lo tanto, sería necesario intercambiar las aguas de alimentación periódicamente, lo que impone limitaciones en el diseño, debido a que la pila debería tener compartimientos simétricos de agua de río y agua de mar. A pesar de esto también podría diseñarse un sistema que permita el intercambio de los electrodos. Se espera que en el sistema cerrado se usen reacciones altamente reversibles.

**Sistemas abiertos:** Son sistemas con generación de gases, que tienen como ventaja la obtención de productos químicos de valor agregado, la desventaja de estos sistemas es la pérdida de energía debido la existencia de una reacción electroquímica neta, en este caso se necesitaría un mayor número de celdas para superar el voltaje de equilibrio antes de que la producción de electricidad sea posible.

El campo eléctrico como se muestra en la Figura 2 a través del arreglo de membranas se genera debido a la diferencia de potencial químico entre los diferentes compartimientos que causa el transporte de iones a través de las membranas en direcciones contrarias. El potencial eléctrico y la corriente eléctrica son aprovechados debido al arreglo de los electrodos colocados en los extremos, así como del arreglo de las membranas. La pila RED mantiene el electro neutralidad mediante las reacciones de oxidación/reducción que se dan en la superficie del cátodo y ánodo.



**Figura 2. Circuito eléctrico de una celda RED (40)**

#### 5.7.6.2.1.1 Membranas de intercambio iónico

Las membranas de intercambio iónico consisten en películas con grupos cargados, éstas pueden ser de diferentes materiales como resinas, polímeros y distintos grupos funcionales con propiedades de intercambio iónico. Las membranas de intercambio iónico constan de estructuras porosas que contienen cargas fijas, neutralizadas con cargas opuestas móviles. La función de las cargas fijas es repeler iones de carga similar mientras que la membrana permanece permeable a iones de carga opuesta.

Las membranas de intercambio iónico se dividen en membranas aniónicas y catiónicas las cuales contienen grupos fijos cargados positivos y negativos, respectivamente.

##### 5.7.6.2.1.1.1 Membranas aniónicas

La membrana aniónica es, esencialmente, una resina intercambiadora de iones fabricada en forma de lámina, con un espesor aproximado de 0.5 mm, que permite el paso de los iones cargados negativamente a través de él. Las propiedades básicas de las membranas aniónicas son:



- Esencialmente impermeables al agua bajo presión
- Eléctricamente conductora
- Solo transfiere aniones y rechaza los cationes
- Baja resistencia eléctrica
- Insolubles en disolución acuosa
- Semi-rígida para facilitar su manejo durante el montaje
- Resistencia al cambio de pH de 1 a 13
- Operación a temperaturas de hasta 50 °C

Las membranas aniónicas tienen la misma forma, orificio de colectores y tamaño que las catiónicas.

#### 5.7.6.2.1.2 Membranas Catiónicas

La membrana catiónica es, esencialmente, una resina intercambiadora de cationes, fabricada en forma de lámina, con un espesor aproximado de 0.5 mm. Permite el paso a través de ella de iones cargados positivamente rechazando a los que están cargados negativamente. Las propiedades básicas de las membranas catiónicas son:

- Esencialmente impermeables al agua bajo presión
- Eléctricamente conductora
- Solo transfiere cationes y rechaza los aniones
- Baja resistencia eléctrica
- Insolubles en disolución acuosa
- Semi-rígida para facilitar su manejo durante el montaje
- Resistencia al cambio de pH de 1 a 13
- Operación a temperaturas de hasta 50 °C

#### 5.7.6.2.2 Espaciadores

Los espaciadores están formados por láminas de material plástico o polimérico que se alinean entre las membranas y proporcionan canales de flujo a través de los cuales fluye la solución (41).

Tienen varias funciones como:

- Separar las membranas evitando que se toquen y produzcan un cortocircuito.
- Provocar alternancia de los flujos a lo largo de la pila.
- Sellan las celdas que a la vez soportan a las membranas.
- Provocan una mayor turbulencia, lo cual ayuda al transporte iónico.



### 5.7.6.2.3 Principios físicos de RED

Para determinar la cantidad de energía neta que se puede producir con este método es necesario considerar la cantidad de energía que se requiere para impulsar las bombas que producen el flujo de agua. Dicho esto, se tiene que (1):

$$P_{net} = P_{total} - \frac{P_{bomba}}{2NA_m} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde  $P_{net}$  es la cantidad de energía neta que se puede obtener;  $P_{total}$  es la cantidad de energía total que se genera;  $A_m$  es el área de la membrana en ( $m^2$ ) y  $N$  es el número de pares de membranas y  $P_{bomba}$  es la energía que se gasta al utilizar el sistema de bombeo, está descrito por:

$$P_{bomba} = 2(\Delta p_t Q) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo  $\Delta p_t$  es la caída de presión de entrada y salida entre el apilamiento de las y  $Q_V$  es el caudal del flujo de la solución menos concentrada. El factor 2 se aplica en este caso porque se trata de dos flujos de agua, el de la solución menos concentrada y la más concentrada.

$P_{total}$  es la diferencia de potencial entre los electrodos, se puede analizar como un circuito de voltaje abierto VOC (del inglés open-circuit voltage) que depende de la resistencia interna del apilamiento de membranas ( $R_i$ ) y de la carga externa en el circuito.  $P_{total}$  Alcanza su valor máximo cuando ( $R_i$ ) y la carga externa son iguales. Por lo tanto, obtenemos:

$$P_{total} = \frac{VOC^2}{4R_i} \quad (\text{Ecuación 3})$$

El VOC es lo que suministra energía a todo el proceso en RED y representa la suma de las diferencias de potencial en cada membrana, que, depende principalmente de la relación que guarden los coeficientes de actividad ( $\gamma, \gamma'$ ) con sus respectivas concentraciones, ( $c$ ) para la solución concentrada y ( $d$ ) para la solución diluida, obteniendo (40) :

$$VOC = 2N\alpha \frac{RT}{F} \ln\left(\frac{\gamma_c - \gamma'_c}{\gamma_d - \gamma'_d}\right) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde,  $\alpha$  es la permeabilidad de la membrana,  $R$  es la constante universal de los gases,  $T$  es la temperatura absoluta,  $F$  es la constante de Faraday,  $\gamma$  es el coeficiente de actividad y  $\gamma'$  es la concentración de la solución salina en la superficie de la membrana.



## 5.8 Ley de Ohm

La ley de Ohm establece que el potencial ( $E$ ) de un sistema eléctrico es igual al producto de la corriente ( $I$ ) por la resistencia del sistema ( $R$ )

$$E = I * R \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Al hablar de RED se toma en cuenta un circuito en serie, entonces la resistencia interna del apilamiento de membranas ( $R_i$ ) es la suma total de las resistencias de las membranas de intercambio aniónico y catiónico. Estas resistencias están en los compartimientos de cada membrana, donde el espesor del compartimiento es  $h$  (distancia entre membranas) y  $k$  es la conductividad de la solución, el límite de difusión ( $(DBL_s)$ , por sus siglas en inglés), resistencia ( $R_{DBL}$ ) y la resistencia de los electrodos ( $R_{el}$ ), obteniendo:

$$R_i = N \left( R_{CEM} + R_{AEM} + \frac{h_c}{k_c} + \frac{h_d}{k_d} + R_{DBL} \right) + R_{el} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Todas estas resistencias se dan en ohmios menos ( $DBL_s$ ) éstos.

Existen varios factores que afectan la resistencia de las pilas como, la temperatura, tipo de iones y su concentración de la solución, disminuyen la resistencia de la solución y por tanto la resistencia de la pila. Por cada °C de cambio en la temperatura, normalmente hay un 2 % de cambio de resistencia en la pila, cuando hablamos de los iones la resistencia disminuye cuando los porcentajes de  $Na^+$  y  $Cl^-$  aumentan.

## 5.9 Equilibrio químico

### 5.9.1.1 Energía libre de Gibbs

El principio de la energía del gradiente salino se basa en la mezcla de dos soluciones con distinta concentración salina. Por ejemplo, al entrar en contacto agua de río con agua salada, la cantidad teórica de energía que puede ser extraída es igual a la variación en la energía libre de Gibbs (8).

$$\Delta G_{mix} = G_m - (G_c + G_d) \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde  $G_c$ ,  $G_d$  y  $G_m$  es la energía libre de Gibbs de las soluciones concentrada, diluida y mezclada, respectivamente. La energía libre de Gibbs como más adelante se define

$$G = \sum_i^s \mu_i n_i \quad \text{(Ecuación 8)}$$



Donde  $\mu_i$  es el potencial químico de las especies  $i^{\text{th}}$  y  $n_i$  es el número de moles de especies  $i^{\text{th}}$  de un sistema con un número total de  $s$  especies.

Por cada temperatura  $T$  y presión  $P$  dada, el potencial químico del disolvente  $i$  es definido como:

$$\mu_i = \mu_i^* + RT \ln \gamma_i x_i \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde  $\mu_i^*$  es el potencial químico del disolvente puro  $i$ ,  $\gamma_i$  el coeficiente de actividad del disolvente  $i$ , y  $x_i$  es la fracción molar del disolvente  $i$ .

Para el caso de un soluto  $i$  con una temperatura  $T$  y una presión  $P$  dadas, el potencial como más adelante se define.

$$\mu_i = \mu_i^\omega + RT \ln \gamma_i x_i \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde  $\mu_i^\omega$  es el potencial químico del soluto  $i$  a dilución infinita,  $\gamma_i$  es el coeficiente de actividad del soluto  $i$ , y  $x_i$  es la fracción molar del soluto  $i$ .

La ecuación 6 se puede reescribir sobre la base de las ecuaciones 8 y 10, conduciendo a la ecuación numero 11:

$$\begin{aligned} \Delta G_{mix} &= \sum_i^s (G_{i,m} - (G_{i,c} + G_{i,d})) \quad (\text{Ecuación 11}) \\ &= \sum_i^s ((n_{i,c} + n_{i,d}) RT \ln x_{i,m} \gamma_{i,m}) - (n_{i,c} RT \ln x_{i,c} \gamma_{i,c} + n_{i,d} RT \ln x_{i,d} \gamma_{i,d}) \end{aligned}$$

El número de moles  $n_i$  de las especies  $i^{\text{th}}$  puede expresarse en términos de la concentración molar  $c_i$ , como sigue en la ecuación 12:

$$n_i = c_i \cdot V \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde  $V$  es el volumen total del sistema con un número  $s$  de especies. Lo que lleva a la siguiente ecuación:

$$\sum_i^s n_i = \sum_i^s c_i \cdot V = n_{tot} = c_{tot} V \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde  $n_{tot}$  y  $c_{tot}$  son el número total de moles y la concentración total del sistema, respectivamente.

Así la ec 10 puede ser reescrita sustituyendo el número de moles  $n_i$ , con la concentración  $c_i$ , que de acuerdo a la ecuación 12, se define como:

$$\Delta G_{mix} = \sum_i^s (c_{i,m} V_m RT \ln(x_{i,m} \gamma_{i,m}) - ((c_{i,c} V_c RT \ln(x_{i,c} \gamma_{i,c}) + c_{i,d} V_d RT \ln(x_{i,d} \gamma_{i,d}))) \quad (\text{Ecuación 14})$$



Esta última ecuación puede ser utilizada para el cálculo de la energía libre de Gibbs que se produce de la mezcla de dos soluciones con diferentes niveles de salinidad. Dicha fórmula se basa en el promedio de salinidad entre dos soluciones con distinta concentración, sin embargo, investigaciones recientes toman en cuenta otras consideraciones para hacer más realista el cálculo de la energía extraíble del gradiente salino.

## 5.10 Electroodos

Electroodos: Los electroodos son materiales conductores de la electricidad, a través de los cuales se verifica la transferencia electrónica con la disolución en la que se encuentran las sustancias cuya transformación se desea. En electrodiálisis únicamente cumplen la función de proporcionar el campo eléctrico necesario para que se produzca el proceso. Por lo tanto, son ánodos dimensionalmente estables DSAs como los elaborados con óxidos metálicos por ejemplo los de dióxido de estaño ó Pt/Ti (platino soportado sobre titanio) como ánodos, y acero inoxidable como cátodo.

Para la elección del material de los electroodos y la pareja REDOX adecuada se deben considerar varios puntos como el consumo de energía de la reacción electroquímica, la reversibilidad de la reacción química utilizada, los sobre potenciales de la reacción química elegida sobre los electroodos, pero sobre todo minimizar la posibilidad de que el transporte de algún componente de la solución electrolítica a través de las membranas de intercambio contamine las aguas de salida.

La Tabla 2. Sistema de electrodiálisis descrito en la literatura. muestra los diferentes sistemas de electroodos, los que se pueden clasificar en dos grupos: con o sin reacciones de electroodos opuestas (42). Primero, para los sistemas con reacciones de electroodo opuestas y un enjuague de electroodo de recirculación, no hay reacción química neta. Estos sistemas tienen un voltaje de equilibrio cero. Un sistema RED con un sistema de electroodos de este tipo puede generar energía eléctrica con solo unas pocas celdas porque no hay consumo de energía para una reacción química neta. Los compartimientos de electroodos se localizan normalmente en los extremos alto y bajo de la pila de las membranas.



Tabla 2. Sistema de electrodiálisis descrito en la literatura. (42)

	anode	anolyte + bulk	repeating unit	catholyte + bulk	cathode	author electrode reactions
<b>described systems in literature</b>						
1	Cu	CuSO <sub>4</sub>	± $\begin{array}{c} \text{S} \equiv \text{R} \pm \\ \text{Cl}^- \quad \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \end{array}$	CuSO <sub>4</sub>	Cu	Pattle [4, 5, 6] cath.: $\text{Cu}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Cu}$ anode: $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2e$ net: nil
2	metal	sea	$\begin{array}{c} \equiv \text{R} \pm \text{S} \\ \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \end{array}$	sea	metal	Weinstein/Leitz [13] cath.: $2 \text{H}_2\text{O} + 2e \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ anode: $2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2e$ net: $2\text{H}_2\text{O} + 2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^- + \text{Cl}_2$
3	Ag/AgCl	NaCl	± $\begin{array}{c} \text{S} \equiv \text{R} \pm \\ \text{Cl}^- \quad \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \end{array}$	NaCl	Ag/AgCl	Audinos [11, 12] cath.: $\text{AgCl} + e \rightarrow \text{Ag} + \text{Cl}^-$ anode: $\text{Ag} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgCl} + e$ net: nil
4	Zn	ZnCl <sub>2</sub>	± $\begin{array}{c} \text{S} \equiv \text{R} \pm \\ \text{Cl}^- \quad \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \end{array}$	ZnCl <sub>2</sub>	Zn	Jagur-Grodzinski/Kramer [10] cath.: $\text{Zn}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Zn}$ anode: $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2e$ net: nil
5	C/Pt	NaCl	$\begin{array}{c} \equiv \text{R} \quad \pm \text{S} \equiv \text{R} \quad \pm \\ \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \quad \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \end{array}$	NaCl	C/Pt air	Jagur-Grodzinski/Kramer [10] cath.: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ anode: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e$ and $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2e$ separated anolyte and catholyte
6	Ti/Pt	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	$\begin{array}{c} \equiv \text{R} \pm \text{S} \equiv \\ \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \quad \text{Na}^+ \end{array}$	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ti/Pt	Turek [19, 20] cath.: $2\text{H}_2\text{O} + 2e \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ anode: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e$ net: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$
7	C	sea	$\begin{array}{c} \equiv \text{R} \pm \text{S} \\ \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \end{array}$	sea	C	Suda [17] cath.: $2 \text{H}_2\text{O} + 2e \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ anode: $2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2e$ net: $2\text{H}_2\text{O} + 2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^- + \text{Cl}_2$
<b>used systems by author</b>						
8	Ti/RuR	Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup> NaCl / HCl	± $\begin{array}{c} \text{S} \equiv \text{R} \pm \\ \text{Cl}^- \quad \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \end{array}$	Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup> NaCl / HCl	Ti/RuR	Veerman et al. [this chapter] cath.: $\text{Fe}^{3+} + e \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ anode: $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e$ net: nil
9	Ti/RuR	Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup> / Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup> NaCl	$\begin{array}{c} \equiv \text{R} \pm \text{S} \equiv \\ \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \quad \text{Na}^+ \end{array}$	Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup> / Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup> NaCl	Ti/RuR	Veerman et al. [Chapter 3 and 5] cath.: $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ anode: $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-} \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e$ net: nil
10	Ti/RuR	NaCl	$\begin{array}{c} \equiv \text{R} \pm \text{S} \equiv \\ \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \quad \text{Na}^+ \end{array}$	NaCl Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup> NaCl	Ti/RuR	Veerman et al. [Chapter 6] cath.: $2 \text{H}_2\text{O} + 2e \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ anode: $2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2e$ net: $2\text{H}_2\text{O} + 2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^- + \text{Cl}_2$
<b>suggested systems</b>						
11	graphite	Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup> NaCl / HCl	± $\begin{array}{c} \text{S} \equiv \text{R} \pm \\ \text{Cl}^- \quad \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \end{array}$	Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup> NaCl / HCl	graphite	Veerman et al. [this chapter] cath.: $\text{Fe}^{3+} + e \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ anode: $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e$ net: nil
12	graphite	Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup> / Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup> NaCl	$\begin{array}{c} \equiv \text{R} \pm \text{S} \equiv \\ \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \quad \text{Na}^+ \end{array}$	Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup> / Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup> NaCl	graphite	Veerman et al. [this chapter] cath.: $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ anode: $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-} \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + e$ net: nil



El autor experimentó con los primeros 7 sistemas y recomienda que se prueben con electrodos de Ti/RuIr y elementos nuevos como el grafito.

Se investigó según la bibliografía diferentes materiales los cuales nos pudieran servir como electrodos.

## **5.11 Celdas electroquímicas**

Los procesos electroquímicos son reacciones REDOX en las cuales la energía liberada por una reacción espontánea se convierte en electricidad o la energía eléctrica se aprovecha para provocar una reacción química no espontánea.

En una celda, el ánodo es por definición, el electrodo donde se lleva a cabo la oxidación y el cátodo es el electrodo donde se lleva a cabo la reducción.

Las celdas electroquímicas pueden ser de dos tipos: galvánicas y electrolíticas.

### **5.11.1.1 Celdas galvánicas o voltaicas**

Las celdas galvánicas, producen energía eléctrica, a partir de reacciones químicas que se llevan a cabo en los electrodos. Las reacciones ocurren espontáneamente y producen un flujo de electrones desde el cátodo al ánodo. En las celdas galvánicas están constituidas por dos medias celdas separadas entre sí por una unión líquida (pared porosa, puente salino, etc.).

Debe existir una diferencia de potencial eléctrico, y el trabajo que realiza cada unidad de carga al ir de un punto a otro.

### **5.11.1.2 Celdas electrolíticas**

Las celdas electrolíticas no son espontáneas por lo que se debe suministrar energía para que la reacción REDOX se lleve a cabo. La diferencia de potencial entre los electrodos genera una fuerza electromotriz que permite la transferencia de electrones del electrodo al ion.

## **5.12 Reacciones óxido-reducción electroquímica**

Durante la reacción de óxido- reducción tienen lugar dos procesos simultáneos, la oxidación y la reducción.



Las ecuaciones de óxido-reducción ocurren con un intercambio de electrones, sobre la superficie de los electrones de modo que una especie los cede y la otra los acepta.

### 5.12.1.1 *Reacciones de oxidación*

Proceso en la cual una especie química pierde electrones y su número de oxidación aumenta.

### 5.12.1.2 *Reacciones de reducción*

Es el proceso en la cual una especie química gana electrones y su número de oxidación disminuye.

## 5.13 Potencial electroquímico

### 5.13.1.1 *Actividad*

La actividad de cada sustancia dependerá de su concentración y de la concentración del resto de los componentes de la mezcla

$$a_i = \gamma_i C_i \quad (\text{Ecuación 15})$$

En la ecuación  $\gamma_i$  Coeficiente de actividad,  $C_i$  concentración expresada en (mol/dm<sup>3</sup>).

### 5.13.1.2 *Ley de límite de Debye-Huckel*

Cuando la concentración tiende a cero toma la forma límite:

$$\text{Log } \gamma_i = -Az_i^2\sqrt{I} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde  $\text{Log } \gamma_i$  es el coeficiente de actividad de un ion tipo  $i$ ,  $A$  es una constante y depende de la temperatura y de la constante dieléctrica del disolvente. Para soluciones acuosas a 25°C.  $A = 0.51 \text{ m}^{-1/2} \text{ dm}^{-3/2}$ ,  $z_i^2$  es el número de cargas llevadas por el ion  $i$ ,  $I$  fuerza iónica.

La ecuación de Debye – Hückel se aplica sólo a soluciones infinitamente diluidas. Pero da buenos resultados para electrolitos univalentes de concentración aproximada a 0.1 mol dm<sup>-3</sup> Para soluciones más concentradas tiene que modificarse.



### 5.13.1.3 Fuerza iónica

La fuerza iónica de una solución está dada por la relación

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2 \quad \text{(Ecuación 17)}$$

Donde  $I$  es la fuerza iónica,  $C_i$  la concentración y  $z_i^2$  el número de cargas llevadas por el ion  $i$  (valor absoluto)

### 5.14 Ecuación de Nernst

La ecuación de Nernst relaciona los potenciales estándar de reducción cuando todos los solutos son 1M y todos los gases están a 1atm de presión y 25°C. con los potenciales en condiciones distintas a las normales.

$$\Delta E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad \text{(Ecuación 18)}$$

$\Delta E$  es el potencial corregido del electrodo,  $E^\circ$  es el potencial a condiciones estándar (los potenciales estándar se pueden encontrar tabulados para diferentes reacciones producción),  $R$  la constante de los gases (8.314 J / (mol K),  $T$  es la temperatura absoluta (K),  $n$  es el número de electrones que participan en la reacción,  $F$  la constante de Faraday aproximadamente 96500 C/mol y  $Q$  es el cociente de reacción correspondiente.

Para RED se utiliza una fórmula de Nernts modificada y con ella se puede calcular el potencial de membrana en el cual se encuentra en equilibrio, por lo que el valor de dicha ecuación suministra el potencial medio en voltios en el cual la fuerza eléctrica contrarresta a la fuerza química en la misma magnitud, pero en diferente dirección.

Además de que el potencial estándar es nulo ya que se toma en cuenta que es el mismo ion dentro y fuera.

$$\Delta V_{teo} = \frac{2\alpha_{av}RT}{zF} \ln \frac{a_c}{a_d} \quad \text{(Ecuación 19)}$$

$\Delta V_{teo}$  indica el potencial teórico de membrana,  $\alpha_{av}$ , es la perm-selectividad media de la membrana para un anión y un par de membranas de intercambio catiónico,  $R$  es la constante de gas),  $F$  es la constante de Faraday (96485 C / mol),  $a_c$  es la actividad de la solución concentrada (mol / L) y  $a_d$  es la actividad de la solución diluida (mol / dm<sup>3</sup>) (43) .



## 5.15 Equilibrio de Gibbs-Donnan

Es un equilibrio especial que se establece entre dos fases, sujetas a la limitación de que uno o más de los componentes iónicos no pueden pasar de una fase a la otra fase. La restricción de movimientos puede ser debida a un campo centrífugo o gravitacional, o a la coherencia de un gel. Como consecuencia inmediata de dicha restricción se produce en un sistema en equilibrio una distribución desigual de los iones difusibles. (44)

Generalmente tal limitación está motivada por la existencia de una membrana permeable al disolvente y a los iones pequeños, pero impermeable a las partículas cargadas de tamaño coloidal. (45).

$$z_+ v_+ + z_- v_- = 0 \quad \text{(Ecuación 20)}$$

## 5.16 Ley de Fick

Si la concentración del soluto es diferente en una y otra porción de una solución, las moléculas de los solutos se moverán de la solución más concentrada a la más diluida. Este fenómeno se detendrá cuando se llegue al equilibrio.

$$\frac{dm}{dt} = -D A \frac{dC}{dX} \quad \text{(Ecuación 21)}$$

Una cantidad de sustancia ( $dm$ ), se difunde durante un periodo de tiempo ( $dt$ ). El área de la sección transversal de flujo ( $A$ ). El gradiente de concentración es  $dC/dX$ , o sea la diferencia de concentración a lo largo de la sección  $X$ , la cual es perpendicular al área  $A$ . El signo negativo significa el flujo pasivo para un gradiente negativo de concentración.

## 5.17 Difusión de electrolitos

Se denomina difusión al transporte de materia en donde la única fuerza conductora es el gradiente de concentración o un gradiente de potencial químico lo que significa que los iones se mueven en un campo eléctrico llevando las cargas, por lo tanto, la conductividad eléctrica es una medida de la movilidad de los iones.

### 5.17.1.1 *Difusividad en fase líquida a dilución infinita*

Electrolitos en agua-ecuación de Nernst-Haskell

Cuando una sal se disocia en solución, no es la molécula completa la que se difunde solo los iones individuales lo hacen. Sin embargo, la fuerte atracción



electrostática hace que los iones se difundan con la misma rapidez en proporciones estequiometrias, para mantener la solución eléctricamente neutra.

$$D_{AB}^{\circ} = \frac{RT \left[ \frac{1}{z_{(+)}^{\circ}} + \frac{1}{z_{(-)}^{\circ}} \right]}{F^2 \left[ \frac{1}{\lambda_{(+)}^{\circ}} + \frac{1}{\lambda_{(-)}^{\circ}} \right]} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde F es la constante de Faraday (96500 C/eq),  $z_{(+)}^{\circ}$  y  $z_{(-)}^{\circ}$  son las cargas del catión y del anión ( usar valor absoluto), y  $\lambda_{(+)}^{\circ}$ , y  $\lambda_{(-)}^{\circ}$  son las conductividades molares límite ( a concentración cero) del catión y de anión, en  $\text{cm}^2/\Omega^* \text{eq}$

Los valores para el catión y anión correspondiente son para de  $\text{Na}^+$   $\lambda_{(+)}^{\circ} = 50.1 \text{ cm}^2/\Omega^* \text{eq}$  para  $\text{Cl}^-$   $\lambda_{(-)}^{\circ} = 76.4 \text{ cm}^2/\Omega^* \text{eq}$  (46).

## 5.18 Índice de refracción

Se define como la relación entre la velocidad de la luz en espacio vacío a la velocidad de la luz de la sustancia. Un resultado de esta propiedad es que la luz cambiará de trayectoria cuando viaje a través de una sustancia con un índice de refracción diferente. Esto se denomina refracción.

Al pasar de un material con un índice de refracción más alto a uno con más bajo, hay un ángulo crítico en el que el haz de luz incidente ya no puede refractar, sino que se reflejará en la interfaz.

## 5.19 Beneficios del gradiente Salino

Los efectos de la aplicación de las técnicas del gradiente salino, al menos para las técnicas más avanzadas (PRO y RED) en ambientes naturales, no han sido evaluados, sin embargo, existen una serie de beneficios ambientales y sociales que la inserción a gran escala de estas técnicas puede traer, y entre éstos destacan (37; 47; 48).

- La tecnología, al ser nueva está en constante innovación lo cual permite la optimización de las membranas utilizadas.
- Se minimiza la dependencia de combustibles fósiles.
- Son sistemas libres de producción de gases invernadero en las fases de producción.
- Pueden ser independiente de la disponibilidad de agua dulce. No hay amenaza para los recursos hídricos. Además, este sistema no se ve afectado



por la variabilidad temporal de la solución de ingreso, ya que el agua del mar es abundante en el medio ambiente.

- La posibilidad de utilizar la infraestructura de plantas de desalinización cuando el agua dulce no sea abundante y se requiere ya que es indispensable.
- Si las aguas de alimentación son las adecuadas, el impacto ambiental será casi nulo.
- Durante el proceso de generación de energía el calor producido podría aumentar la temperatura, pero dicho aumento sería de sólo 0.5°C por lo que no representaría ningún peligro para organismos acuáticos.
- Al instalarse una planta generadora cerca de una comunidad ya establecida, se minimizan las largas distancias para la transmisión de electricidad presentando un beneficio social.
- Está demostrado que el gradiente salino representa una mayor recuperación de energía comparada con otras fuentes de energía marina.
- Las necesidades de pretratamiento son muy ligeras, ya que las membranas son muy resistentes a los oxidantes y al ensuciamiento orgánico, por lo que se obtienen muy buenos resultados en el tratamiento de efluentes de plantas de aguas residuales.
- La remoción máxima de sales por etapa es del 40 – 50 %.

## **5.20 Evaluación de los posibles efectos negativos del aprovechamiento del gradiente salino.**

Hasta el momento no se tienen evidencias de que este tenga un impacto ambiental ya que es una energía que no emite gases de efecto invernadero (GEI), en la literatura se analizan los siguientes puntos.

Debido a que el agua requiere de un pretratamiento, lo cual le da un valor agregado al efluente, esta podría ser usada para abastecer microempresas pecuarias de cultivo de camarones y peces que crezcan en aguas de salinidad media. Sin embargo, es importante tener en cuenta que lo más adecuado ambientalmente es devolver el agua a su cauce natural, para no provocar desequilibrios naturales mayores a los efectos que ya se tendrían al implementar esta tecnología y es importante evaluar cuidadosamente las implicaciones ambientales de esto (38).

Si se piensa en poner una planta para la obtención de energía azul se debe considerar el impacto ambiental que puede causar en el ambiente marino en donde se instala.



En el entorno hidrodinámico las plantas de aprovechamiento de la energía del mar podrían actuar como protección de la costa y cambiar los patrones de los sedimentos, lo que requiere seleccionar el lugar cuidadosamente.

1. Las plantas como hábitats artificiales: podrían atraer y promover a poblaciones de distintas especies marinas lo cual afectaría al ecosistema.
2. Ruido: este vendría principalmente de las turbinas, aunque podrían ser insonorizadas.
3. Efectos visuales: este impacto únicamente se da en las plantas de litoral y las de aguas poco profundas.
4. Conversión y transmisión de la energía: puede que haya impactos visuales y medioambientales asociados con las líneas requeridas para la transmisión de la electricidad desde la costa hasta la red.
5. Aguas tranquilas: las plantas pueden formar espacios de aguas tranquilas, que se pueden adaptar convenientemente a espacios de ocio como la realización de deportes acuáticos (canoa, etc.)

Como fue mencionado, estas tecnologías utilizan agua dulce y agua de mar o salmueras, y una de las fuentes naturales principales de ambos tipos de agua son las desembocaduras de los ríos, estuarios o deltas. Cuando se extrae el caudal de la desembocadura de un río se pueden provocar desequilibrios ecológicos, hidrodinámicos y sedimentológicos, por lo que no se puede explotar la descarga completa de una desembocadura de río, sino sólo una pequeña fracción del promedio de descarga. Algunos eventos puntales que dice la literatura que es posible que ocurran son:

- Erosión de la costa
- Desplazamientos de sedimentos, aumento de turbidez.
- Algunos de los productos utilizados en el pretratamiento del agua y la limpieza de las membranas podrían concentrarse en la cadena alimenticia, con repercusiones para los ecosistemas marinos.
- Cambios en los caudales en las zonas de mezcla.
- Afectaciones a flora y fauna.

Hoy en día, todos los efectos adversos mencionados podrían evitarse totalmente si existe una planeación adecuada que, con un equipo de personas involucradas en el diseño de la planta, generen a partir de estudios de ese sitio en particular, las estrategias para que se realicen los procesos sin cambiar las condiciones naturales de lugar. Esto requiere forzosamente de un equipo interdisciplinario con conocimientos profundos de dinámica marina de, los ambientes y su funcionamiento, y de las técnicas de construcción que puedan desarrollar tecnologías adecuadas y “a la medida” de cada sitio particular.



## 6 Metodología

1. Recopilar información a nivel laboratorio y comercial de la implementación del método RED con el fin de verificar el proceso de generación de energía.
2. Realizar una búsqueda bibliográfica de los materiales utilizados en prototipos a pequeña escala, así como la evaluación económica de los mismos.
3. Evaluar, a través de los diferentes proveedores comerciales, las membranas disponibles en México y en el mundo con el fin de encontrar la óptima para el experimento.
4. Realizar el diseño experimental del prototipo para la producción de energía por gradiente salino a nivel laboratorio, en el cual se realizaron diferentes pruebas para poder medir las concentraciones durante el experimento en régimen estacionario y en régimen transitorio.
5. Evaluar el experimento para tres flujos diferentes: uno estacionario y dos transitorios para conocer el voltaje.



## 7 Desarrollo

1. Recopilar información a nivel laboratorio de la implementación de prototipos RED a nivel laboratorio

Se encontró la implementación a nivel laboratorio en la Universidad Nacional de Colombia en la Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía en Medellín Colombia. En donde se desarrolló una celda de producción de energía por medio de gradiente salino por la técnica RED, a cargo de Sara Vallejo (38) el cual está construido, de acrílico y su objetivo era optimizar los parámetros de diseño de Veerman y en lugar de electrodos convencionales se diseñó el prototipo con capacitores. (38)

A diferencia del prototipo colombiano en el cual se buscaba optimizar los parámetros de diseño en el experimento de esta tesis se busca conocer la difusión de masa a través de las membranas, así como el tiempo de vida de las membranas y cómo funciona el dispositivo sin solución electrolítica.

El prototipo colombiano es capaz de producir la energía eléctrica suficiente para encender un led.

La ESIQUIE en el Instituto Politécnico Nacional estuvo a cargo de la elaboración de una pila RED. Dicho dispositivo es de acrílico con una solución electrolítica de ferro/ferri cianuro de potasio y membranas Excellion (49) .

En la celda en la que ellos trabajaron pudieron observar una clara disminución de la potencia del sistema conforme el tiempo avanzaba, que la celda debe operarse a régimen permanente a una tasa de flujo constante que permita obtener una potencia continúa a lo largo de su operación. El sistema utilizado fue cerrado y se probó con diferentes resistencias.

Los autores probaron diferentes tipos de membranas. A continuación, se enlistan las mejores opciones encontradas



**Tabla 3. Lista de membranas disponibles en el mercado (50; 51; 52; 53)**

Membrana							Grosor (mm)	Grosor de espaciadores (µm)	Agua salobre	Agua diluida	Densidad de potencia (W/m <sup>2</sup> )
Catión	Costo	Anión	Costo	Distribuidor	País	Dimensiones					
FKD	72	FAD	102	Fuell cell store	USA	.20x.30 m	0.082	200	30 g/L	1 g/L	0.93
FKD	72	FAD	102	Fuell cell store	USA	.20x.30 m	0.08	200	30 g/L	1 g/L	1.17
CMS	250	ACS	250	Ameridia	USA	1.05x0.53 m	0.13	200	30 g/L	1 g/L	0.6
CMX	250	AMX	250	Ameridia	USA	1.05x0.53 m	0.15	200	30 g/L	1 g/L	0.65
CMX	250	AMX	250	Ameridia	USA	1.05x0.53 m	0.15	190	35.4 g/L	0.56 g/L	0.46
CMV	33	AMV (tienen ASV)	50	Selemion	Japón	.18X.55 m	0.13	200	30 g/L	1 g/L	1.18
H,PP-b	9.90	H,PP-b- tipo 1	10.50	Excellion	USA	.33*1.0 m	0.0127	200	30 g/L	1 g/L	

ACS: Membrana de intercambio aniónico monovalente Neosepta

AEM: Membrana de intercambio aniónico

AMV: Membrana de intercambio aniónico Selemion

AMX: Membrana de intercambio aniónico Neosepta

CEM: Membrana de intercambio catiónico

CMV: Membrana de intercambio catiónico Selemion

CMX: Membrana de intercambio catiónico Neosepta

CSM: Membrana de intercambio catiónico monovalente Neosepta

FAD: Membrana de intercambio aniónico Fumasep

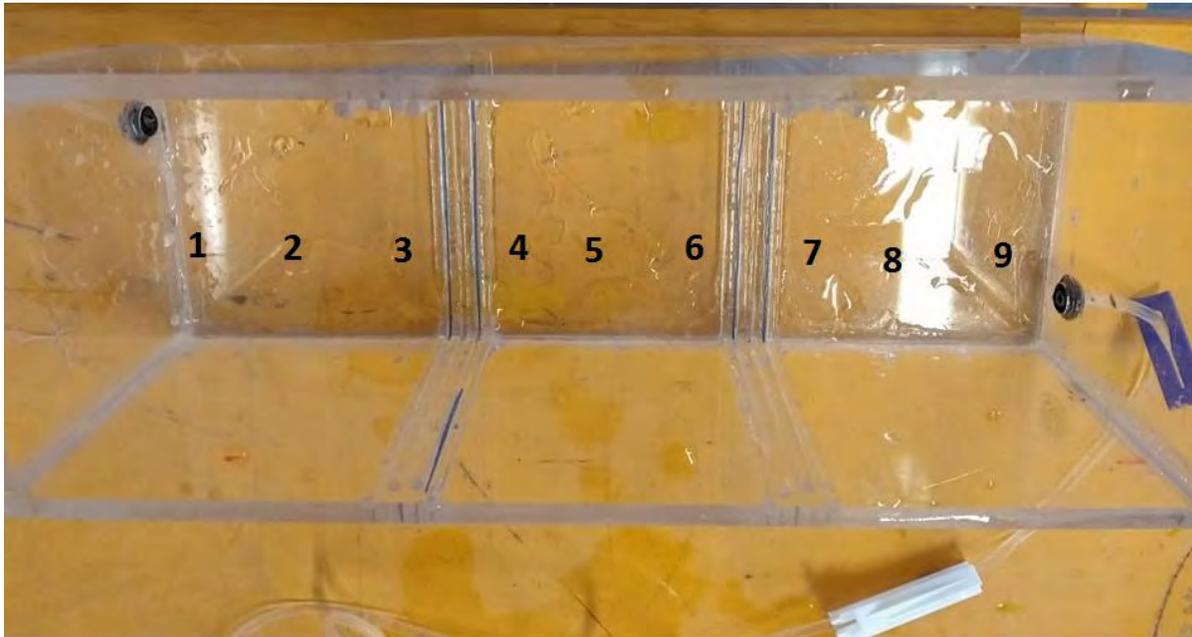
FAK: Membrana de intercambio catiónico Fumasep

H, PP-b: Heterogénea, basado en PP Ácido fuerte

H PP-b tipo1: Heterogénea, basado en PP Base fuerte, Tipo 1

Después de evaluar el costo, tiempo de traslado, disponibilidad, condiciones se seleccionaron las membranas Excellion, las cuales eran las más cercanas al punto de operación, estaban disponibles y cumplían con las características deseables tales como que la permselectividad estuviera por encima de 80 %, el grosor de espaciadores no rebasaba los 200 µm.

Se realizó el diseño y el armado de una caja de acrílico de 6 mm con las siguientes dimensiones 10x10x30 cm<sup>3</sup> sin tapa con el fin de poder ver el efecto de las membranas y como varía la concentración antes y después de éstas ya que en un sistema cerrado sería muy difícil de medir la variabilidad.



*Figura 3. Esquema del dispositivo*

Se implementó un sistema de compuertas para que exista interacción al mismo tiempo en los dos extremos de la caja de acrílico y el flujo salino se distribuya de manera simétrica, este es el modelo de flujo estacionario.

Cuando se cambió a régimen transitorio se instalaron en los costados dos mangueras con válvulas que ayudaron a regular el flujo de salida, conservando las condiciones iniciales del prototipo.

Para la elaboración del experimento de producción de energía por el método RED se emplearon los siguientes materiales

- Acrílico de 6 mm para el armado de la caja
- Acrílico de 2 mm para las compuertas
- Dos placas de titanio de 2 mm de grosor de 10\*7.5 cm como electrodos
- Agua con una concentración de 35 % m/m de NaCl (simulando agua de mar)
- Agua (agua de río)
- Multímetro modelo Steren UT55
- Refractómetro marca ATAGO MASTER-S/Milla para medición de agua de mar.
- Jeringas de 3 mm

El dispositivo está dividido en tres contenedores. En los extremos se colocó agua (de la red), para el contenedor medio se preparó una solución de agua destilada con 35



g NaCl simulando agua de mar. En los extremos, como ya se mencionó, se acomodaron los electrodos que son placas de Titanio (Ti) de 2 mm de grosor y de 10 cm \* 7 cm.

El titanio de las placas no se recubrió con oxido de Iridio (Ir) o Rutenio (Ru), como recomienda la literatura para alargar su vida, ya que el objetivo era producir una diferencia de potencial y ver el efecto de las membranas en el sistema.

El experimento dio inicio cuando se levantaron las cuatro compuertas situadas a los costados de las dos membranas Excellion ya que cuando las aguas tienen contacto con las membranas empieza el intercambio iónico.

Del lado izquierdo de la caja se colocó la membrana catiónica H, PP-b (la cual sólo deja el paso a los iones cargados positivamente), por ella pasaron los iones  $\text{Na}^+$ , en el otro extremo pasa algo similar ya que se colocó la membrana aniónica H, PP-b (la cual sólo deja el paso a los iones cargados negativamente), por ella pasan los iones  $\text{Cl}^-$ .

Cada 30 s se hicieron extracciones de la solución en nueve puntos diferentes para conocer la concentración de sal en cada uno.

Se colocaron varias gotas de cada una de las muestras en el refractómetro de medición de agua de mar el cual arrojó la concentración expresada en partes por mil.

El prototipo para las pruebas se preparó de la siguiente manera:

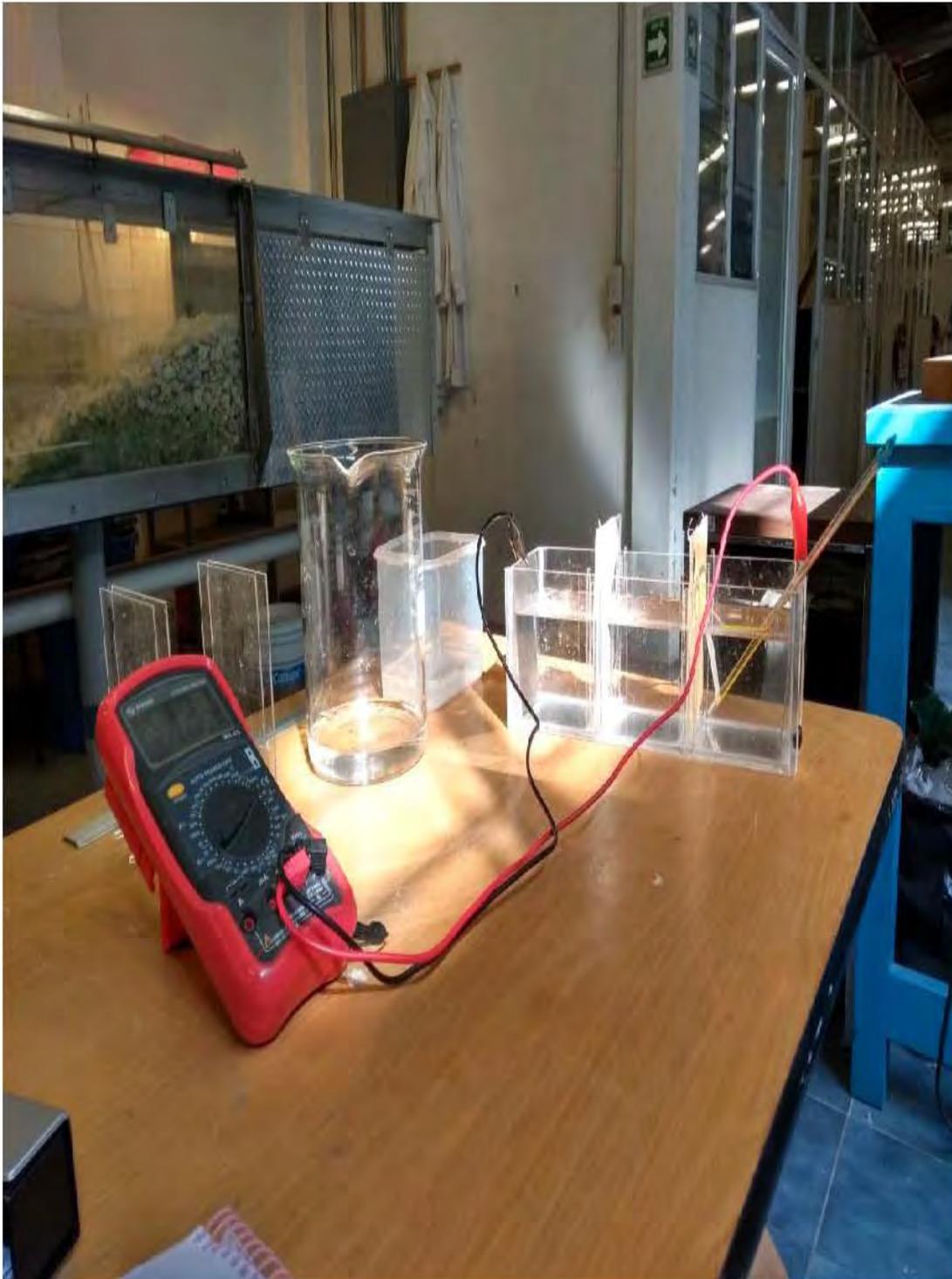
- Se colocaron los electrodos a los extremos conectados a cables banana-caimán.
- Se colocaron las membranas aniónica y catiónica.
- Se colocaron las compuertas ubicadas a los costados de las membranas con una separación de 2 mm.
- Se llenaron al mismo tiempo los tres compartimientos hasta tres cuartas partes de su capacidad, los extremos por agua destilada y el centro con agua a una concentración de 35 %m/m.
- Se retiraron las compuertas a los extremos de las membranas y se dio inicio al experimento.
- Cada 5 minutos se extrajeron muestras de nueve puntos diferentes para medir su concentración los puntos fueron ubicados como lo muestra la *Figura 3*.
- Se midieron las concentraciones con un refractómetro de agua de mar.



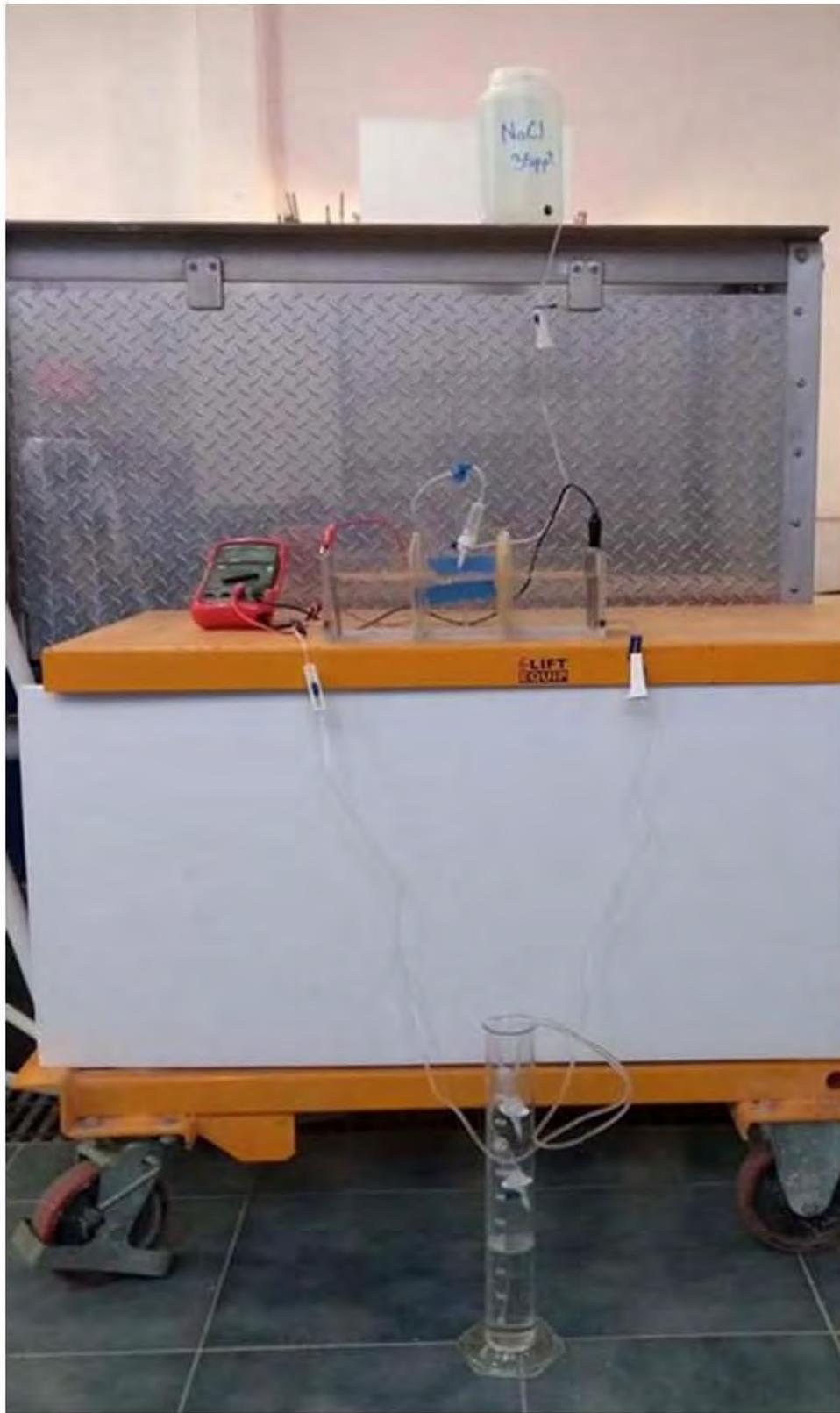
- Se realizó el mismo procedimiento con los 10 experimentos de régimen estacionario y los dos transitorios.
- En el caso de los regímenes transitorios se midió la concentración de los que iba saliendo por los oficios y del volumen final de lo que iba cayendo por dichas válvulas.

Con el modelo también se midió el voltaje experimental para los tres casos realizándose lo siguiente:

- Se colocaron los electrodos a los extremos conectados a cables banana-caimán.
- Se colocaron en los compartimientos las membranas aniónica y catiónica.
- Se colocaron las compuertas las cuales están ubicadas a los costados de las membranas con una separación de 2 mm.
- Se llenaron al mismo tiempo los tres compartimientos hasta tres cuartas partes de su capacidad, los extremos por agua destilada y el centro con agua a una concentración de 35 % m/m.
- Se retiraron las compuertas a los extremos de las membranas y se dio inicio al experimento como se puede observar en la Figura 4.
- Se midió el potencial cada minuto durante 25 min, para los tres casos.
- En el caso de los regímenes transitorios se midió la concentración de los que iba saliendo por los oficios y el volumen final de lo que iba cayendo por dichas válvulas como se muestra en la Figura 5.



*Figura 4. Experimento en estado estacionario*



*Figura 5. Experimento con Reynolds medio*



## 8 Resultados

Los resultados disponibles en la literatura son para sistemas cerrados, en este caso se realizó el experimento en sistema abierto para poder medir la diferencia de concentraciones y la difusión interna entre las membranas y las soluciones. Se cumplió así con el objetivo de entender el comportamiento de las membranas de intercambio iónico y cómo afecta al sistema estar abierto.

Se utilizó también un modelo matemático, siguiendo las ecuaciones para el cálculo de voltaje en sistema cerrado, dado que no los hay para sistemas abiertos. En este caso no se puede tener un potencial teórico ya que se necesita de una velocidad en el fluido.

### 8.1 Estado estacionario

La tabla 3 muestra los resultados de 9 experimentos, realizados con las mismas membranas, agua con una concentración 35% m/m preparada en laboratorio simulando agua de mar. La diferencia entre estos fue la hora, los dos últimos fueron realizados después de mediodía donde la temperatura ambiental sobrepasaba los 20 °C.

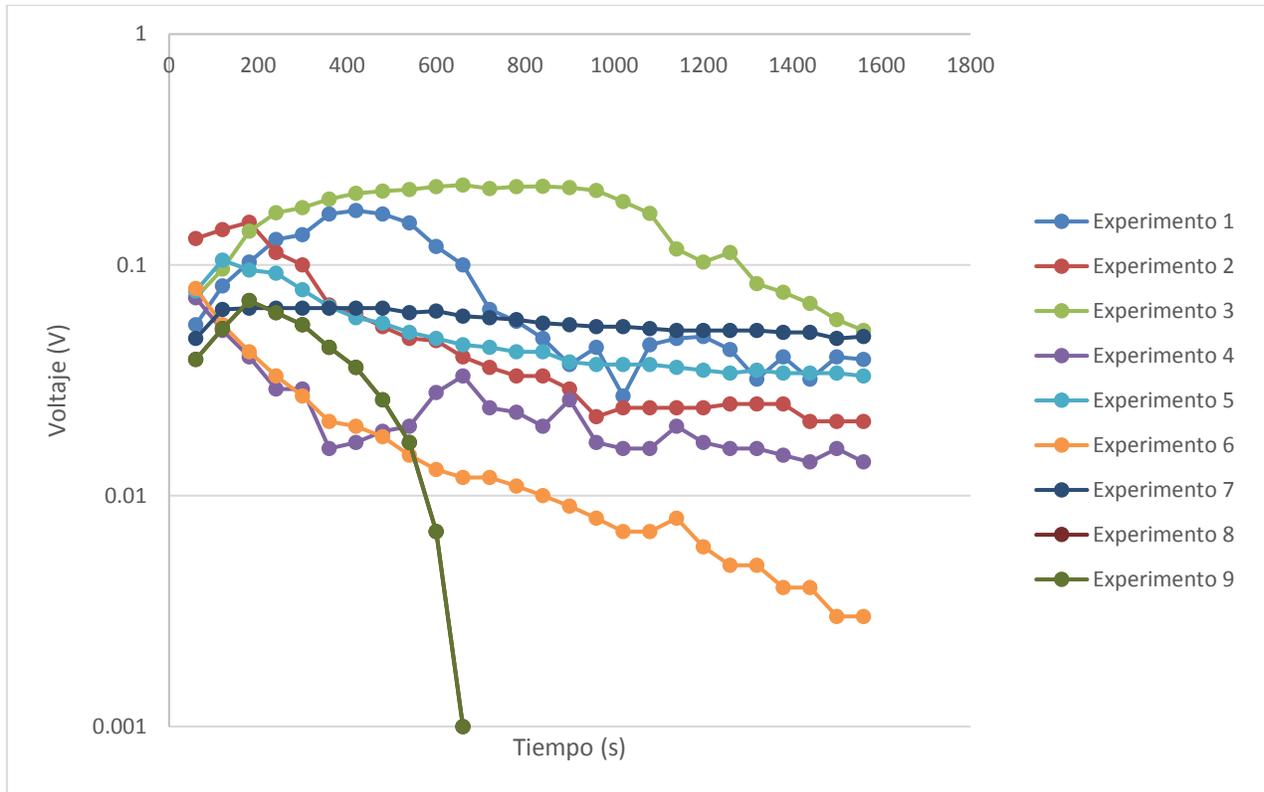


**Tabla 4. Resultados obtenidos de voltaje en régimen estacionario**

Tiempo (s)	Voltaje (V)								
60	0.055	0.13	0.072	0.072	0.077	0.079	0.048	0.039	0.039
120	0.081	0.142	0.096	0.052	0.105	0.055	0.064	0.053	0.053
180	0.103	0.153	0.14	0.04	0.095	0.042	0.065	0.07	0.07
240	0.129	0.113	0.168	0.029	0.092	0.033	0.065	0.062	0.062
300	0.135	0.1	0.177	0.029	0.078	0.027	0.065	0.055	0.055
360	0.166	0.067	0.193	0.016	0.066	0.021	0.065	0.044	0.044
420	0.172	0.061	0.204	0.017	0.059	0.02	0.065	0.036	0.036
480	0.166	0.054	0.209	0.019	0.056	0.018	0.065	0.026	0.026
540	0.152	0.048	0.212	0.02	0.051	0.015	0.062	0.017	0.017
600	0.12	0.047	0.218	0.028	0.048	0.013	0.063	0.007	0.007
660	0.1	0.04	0.222	0.033	0.045	0.012	0.06	0.001	0.001
720	0.064	0.036	0.214	0.024	0.044	0.012	0.059	0	0
780	0.057	0.033	0.218	0.023	0.042	0.011	0.058	0	0



840	0.048	0.033	0.219	0.02	0.042	0.01	0.056	0	0
900	0.037	0.029	0.216	0.026	0.038	0.009	0.055	0	0
960	0.044	0.022	0.21	0.017	0.037	0.008	0.054	0	0
1020	0.027	0.024	0.188	0.016	0.037	0.007	0.054	0	0
1080	0.045	0.024	0.167	0.016	0.037	0.007	0.053	0	0
1140	0.048	0.024	0.117	0.02	0.036	0.008	0.052	0	0
1200	0.049	0.024	0.103	0.017	0.035	0.006	0.052	0	0
1260	0.043	0.025	0.113	0.016	0.034	0.005	0.052	0	0
1320	0.032	0.025	0.083	0.016	0.035	0.005	0.052	0	0
1380	0.04	0.025	0.076	0.015	0.034	0.004	0.051	0	0
1440	0.032	0.021	0.068	0.014	0.034	0.004	0.051	0	0
1500	0.04	0.021	0.058	0.016	0.034	0.003	0.048	0	0
1560	0.039	0.021	0.052	0.014	0.033	0.003	0.049	0	0



**Figura 6. Voltaje contra tiempo en sistema estacionario.**

En la Figura 6 se observa como todos los experimentos encuentran el equilibrio, sólo el experimento 3 mantuvo un potencial alto por más tiempo para luego decaer y llegar a un valor de equilibrio similar al resto. En dicho experimento ocurrió que a los 120 s los polos se intercambiaron, se considera que el proceso que ocurrió fue una “polarización por concentración” que es un proceso en el cual se produce una acumulación en la superficie de la membrana ya que al ser un sistema abierto tiende al equilibrio.

En la *Figura 7* se muestra el mismo experimento utilizando un rango mayor de tiempo. También durante los diferentes experimentos se observó que al subir la temperatura del ambiente a 20 °C o más la eficiencia decaía y la diferencia de potencial decaía hasta cero como fue el caso de los experimentos 8 y 9 (*Figura 6*). La diferencia de estos dos experimentos fue que la temperatura oscilaba entre 12 y 18 °C la bibliografía menciona que para sistemas cerrados la temperatura no altera el funcionamiento, sin embargo, en estas pruebas queda demostrado que para sistemas abiertos la temperatura ambiental sí incide en la reacción química.

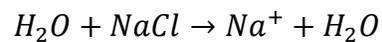
A grandes rasgos, en el centro del sistema después de un tiempo el agua se desala lo que quiere decir que transfiere iones a través de las membranas de intercambio iónico



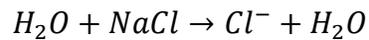
como antes fue explicado, de un lado se depositan los cationes  $\text{Na}^+$  o aniones  $\text{Cl}^-$ , en los costados de las membranas se lleva la reacción química en donde se depositan dichos iones.

La reacción que ocurre dentro del prototipo es reversible, lo que quiere decir que son reacciones en las que los reactivos no se transforman en productos en su totalidad, ya que estos vuelven a convertirse en reactivos, dando lugar a un proceso de doble sentido, en el prototipo con ayuda de las membranas que no dejan el paso a todos los moles se obtuvo que:

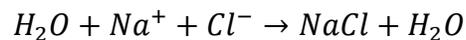
La membrana catiónica, sólo deja el paso a los cationes  $\text{Na}^+$

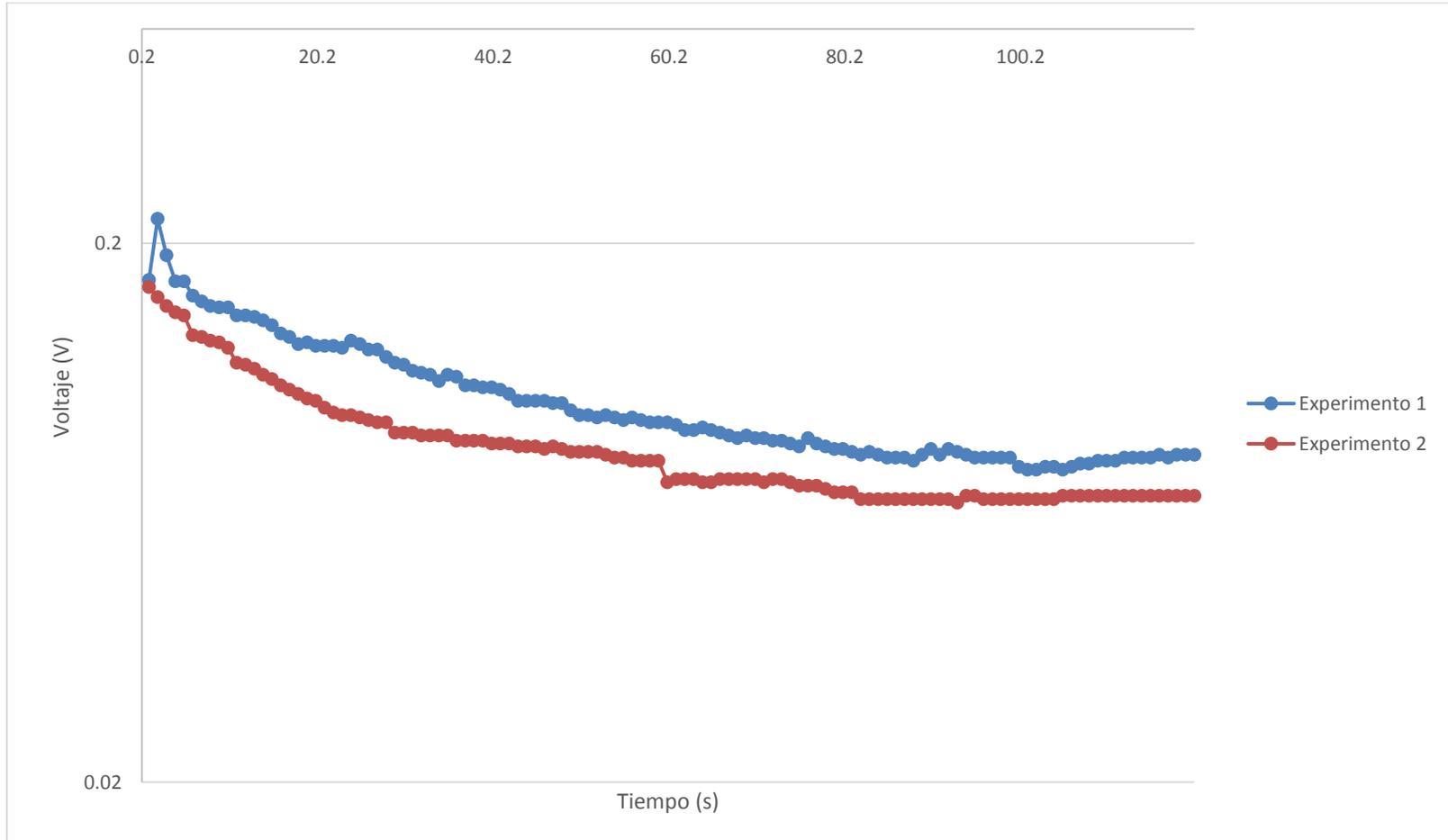


La membrana aniónica, sólo deja el paso a los aniones  $\text{Cl}^-$



Al juntar de nuevo los productos de cada lado de las membranas se obtiene la siguiente ecuación en donde los iones vuelven a unirse.





*Figura 7. Estado estacionario en un rango mayor de tiempo*



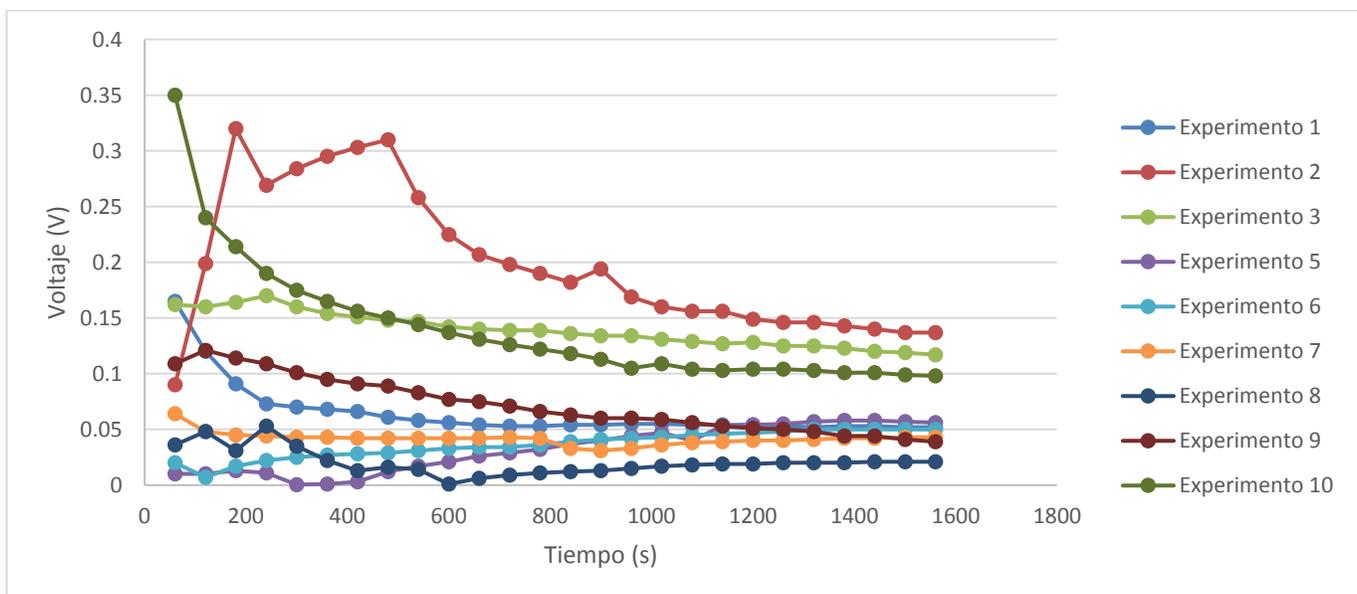
## 8.2 Reynolds bajo

El experimento con Reynolds bajo como se explicó anteriormente el experimento tuvo una entrada de agua con una concentración de 35% m/m y dos salidas inferiores, modificando la velocidad del sistema y el intercambio de iones.

Los modelos fabricados en países como Holanda, Colombia e Italia son sistemas cerrados, con una velocidad cero (en los experimentos en las tablas 5 y 6), por lo que es muy difícil compararlos con los experimentos realizados en el laboratorio. En las ecuaciones que se han hecho de Electrodiálisis Reversible la velocidad juega un papel importante para la obtención de un voltaje teórico.

La *Figura 8* muestra diferentes experimentos evaluados para un Reynolds muy bajo. Ahí se puede observar que al igual que en estado estacionario tienden a un estado de equilibrio, los experimentos se realizaron en un rango de temperatura de 12 °C y 16 °C.

Al comparar los experimentos del modelo con otros modelos, como el colombiano, en donde el potencial era de 0.8 mV, se encontraron varias razones para las diferencias de potencial: la primera es que el sistema colombiano es cerrado y no ocurre ninguna reacción a diferencia del mexicano. En los modelos estudiados ocurren dos reacciones en los polos del sistema, cuenta con una solución electrolítica, la velocidad inicial es menor, las membranas son diferentes, el espacio entre membrana y membrana era menor por lo que existe menor resistencia, el electrodo es diferente.



*Figura 8. Estado transitorio con un Reynolds muy bajo.*



No hay mucha diferencia entre el sistema estático y de Reynolds bajo ya que el movimiento no es suficiente como para modificar al sistema de manera significativa y tiende al equilibrio en potenciales más altos. Aunque como se puede observar los potenciales tienden a subir con un poco de movimiento, en el sistema estático se obtuvieron potenciales de 0.0 lo cual es un error ya que se está diciendo que no se está produciendo energía lo que explica que no hay intercambio de iones.

En un modelo matemático siguiendo las ecuaciones para electrodiálisis reversible se obtuvieron los siguientes resultados:

Para evaluar la técnica RED se desarrollaron los modelos matemáticos expuestos para sistemas cerrados con el fin de comparar los resultados obtenidos:

Se calculó primero la fuerza iónica de acuerdo con la  $I = \frac{1}{2} \sum c_i z_i^2$  (Ecuación 17) para la solución concentrada, así como para la solución diluida (en el caso del experimento agua destilada) para poder calcular la actividad que será utilizada posteriormente.

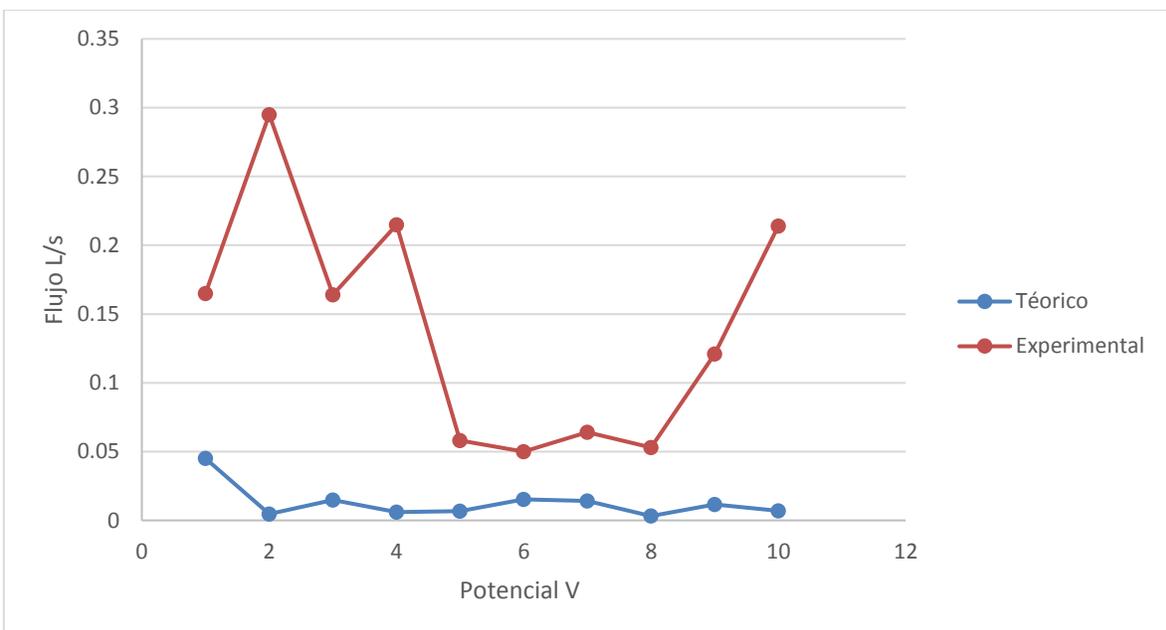
Posteriormente se calculó  $\Delta V_{\text{theo}} = \frac{2\alpha_{av}RT}{zF} \ln \frac{a_c}{a_d}$  (Ecuación 19) y  $VOC = 2N\alpha \frac{RT}{F} \ln \left( \frac{Y_c - Y'_c}{Y_d - Y'_d} \right)$  (Ecuación 4) sabiendo que  $\alpha$  es la permeabilidad de las membranas.

Siguiendo el modelo de la membrana y los modelos de resistencias  $R_i = N \left( R_{CEM} + R_{AEM} + \frac{h_c}{k_c} + \frac{h_d}{k_d} + R_{DBL} \right) + R_{el}$  (Ecuación 6) se puede obtener el potencial total de la membrana  $P_{\text{total}} = \frac{VOC^2}{4R_i}$  (Ecuación 3) la cual indica la generación total en el sistema.



**Tabla 5. Comparación de potencial total teórico con el experimental**

Experimento	Flujo (l/s)	P total (V) teórico	Pmáx (V) experimental
1	0.00078846	0.045038	0.165
2	0.00007051	0.004694	0.295
3	0.00023077	0.014815	0.164
4	0.00009487	0.006128	0.215
5	0.00010256	0.006777	0.058
6	0.00023718	0.015205	0.05
7	0.00021795	0.014032	0.064
8	0.00004744	0.003175	0.053
9	0.00017949	0.011655	0.121
10	0.00010641	0.007025	0.214



**Figura 9. Comparación de potencial total teórico y potencial experimental.**

Se puede observar en la *Tabla 5* que en todos los casos el potencial total teórico es inferior que el potencial experimental y esto es porque las ecuaciones que se utilizaron fueron diseñadas para modelos en un sistema cerrado.



La gran diferencia del modelo teórico al modelo experimental se debe a varios factores como: en el sistema cerrado no existe reacción química en los electrodos, en el cátodo y ánodo se mantiene la neutralidad a diferencia del sistema abierto en donde ya se lleva a cabo una reacción química y se pierde energía, al existir tanta diferencia entre membrana y membrana las resistencias aumentan lo cual hace disminuir el potencial, aunado a que la velocidad de flujo es muy pequeña. A mayor flujo, el gradiente no alcanza a disminuir y es difícil llegar al equilibrio.

En algunos casos como en los experimentos 5, 6, 7 y 8 la diferencia entre el potencial total y el potencial teórico no fue tan notoria, los errores antes mencionados son clave para los experimentos 1, 2, 3, 4, 9 y 10.

En el caso de los experimentos 2 y 10 los valores de potencial fueron elevados debido a que se presentó un cambio de polaridad por concentración y el potencial en lugar de descender y llegar al equilibrio, se incrementó.

En los casos 4 y 10 sucedió que el flujo de entrada era superior al de los otros experimentos.

El potencial experimental del prototipo realizado en Colombia es de 0.8 V cuando el teórico es 1.1 V es un sistema cerrado de una mono celda con una distancia entre membrana y membrana muy pequeña en donde no hay reacción química en donde el margen de error es menor al prototipo que es en un sistema abierto.

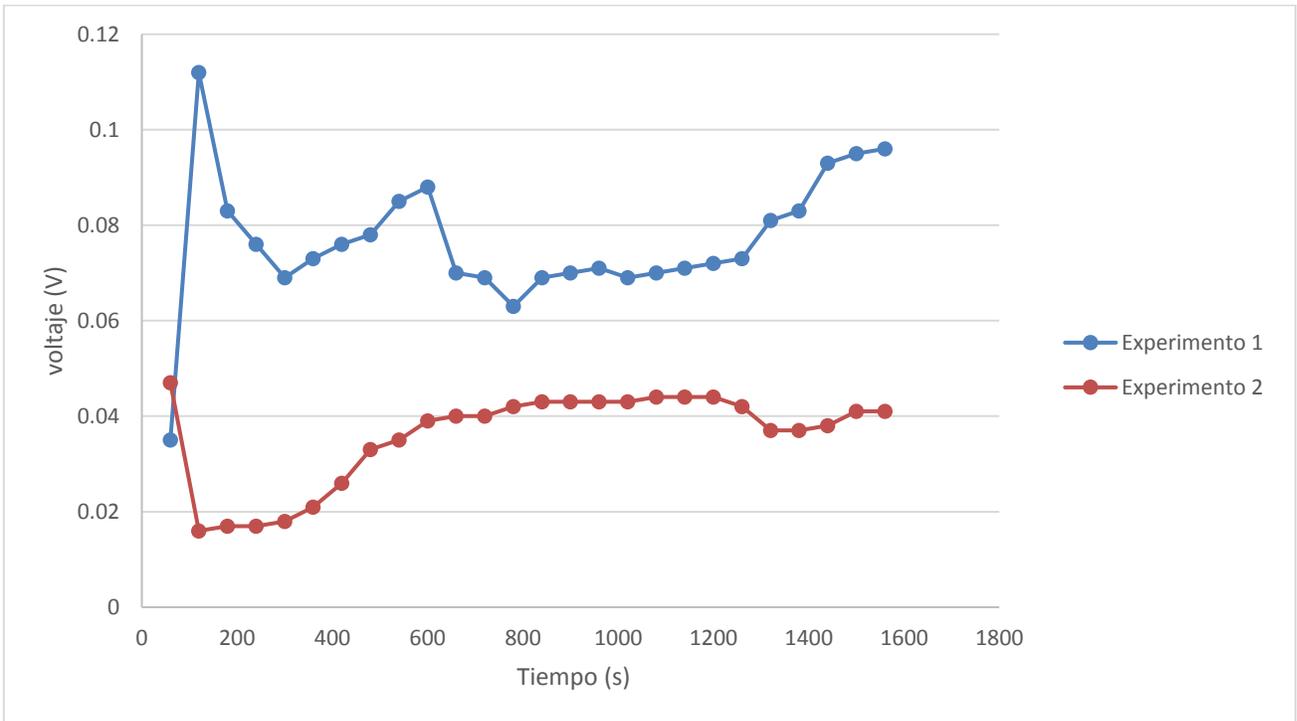


### 8.3 Reynolds medio

*Tabla 6. Reynolds medio*

Tiempo	Voltaje (V)	Voltaje (V)
60	0.035	0.047
120	0.112	0.016
180	0.083	0.017
240	0.076	0.017
300	0.069	0.018
360	0.073	0.021
420	0.076	0.026
480	0.078	0.033
540	0.085	0.035
600	0.088	0.039
660	0.07	0.04
720	0.069	0.04
780	0.063	0.042
840	0.069	0.043
900	0.07	0.043
960	0.071	0.043
1020	0.069	0.043
1080	0.07	0.044
1140	0.071	0.044
1200	0.072	0.044
1260	0.073	0.042
1320	0.081	0.037
1380	0.083	0.037
1440	0.093	0.038
1500	0.095	0.041
1560	0.096	0.041

La *Tabla 6* muestra los experimentos con un Reynolds medio. Es evidente que entre mayor sea el movimiento, el sistema tarda más en llegar al equilibrio, los potenciales dados son parecidos a los experimentos anteriores incluso menores que algunos de ellos, pero a diferencia de los otros este arreglo en el sistema no tiende al equilibrio. Se observó durante el experimento que después de parar el flujo de agua con sal de entrada, el potencial tendía a incrementar, esto explica que los sistemas de electrodiálisis reversible buscan un punto de equilibrio.



**Figura 10. Reynolds medio**

La Figura 9 muestra la gran variación entre ambos experimentos reiterando que a mayor velocidad existe mayor movimiento y con esto hace tardío el punto de llegar al equilibrio.

En el caso donde el Reynolds fue un poco más alto se obtuvo lo siguiente:

**Tabla 7. Comparación de potencia total y potencia experimental**

Experimento	Flujo (L/s)	P total (V) Teórico	Pmáx (V) Experimental
1	0.003846154	0.0136938	0.117
2	0.000961538	0.053107	0.047

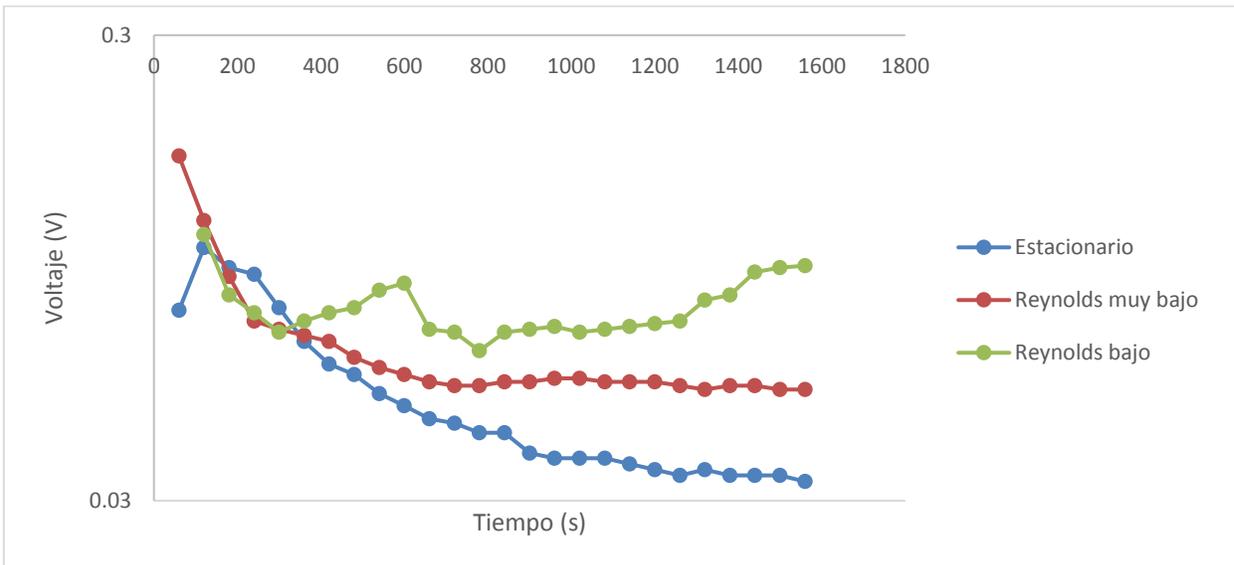
Se puede observar que en uno de los casos la diferencia entre el potencial total y el experimental es grande en comparación al caso en donde la diferencia es mínima. Debido a que como tarda en llegar al equilibrio las variaciones son mayores, los factores por la diferencia entre los mismos se parecen a los casos anteriores en donde influyen varios factores como la reacción, la temperatura, la velocidad que, aunque aumenta sigue siendo baja.

La literatura explica el funcionamiento de las soluciones electrolíticas, estas son parte fundamental ya que es realmente en donde se lleva el intercambio de iones, los



electrodos solo son el en el dispositivo no se estudió con una solución electrolítica basado en el par seleccionado. La literatura (42) dice que el par que funciona correctamente con electrodos de Ti es la solución electrolítica de  $K_4[Fe(CN)_6]/K_3[Fe(CN)_6]$  la cual es altamente peligrosa por los iones cianuro que aunque no participan en la reacción si existiese alguna fuga contaminarían grandes cantidades de agua y no se estaría estudiando de manera correcta una técnica nueva para generación de energía.

El experimento 2 es muy parecido a los anteriores con Reynolds más bajo el 1 a diferencia el flujo de este es bastante alto en comparación lo que nos dice que obtendremos mejores potenciales a Reynolds más alto ya que tarda más tiempo en llegar al equilibrio y que están relacionados proporcionalmente como en el caso del experimento.



**Figura 11. Comparación de los tres grupos de flujos**

En la Figura 11 se observa la tendencia de que a un número mayor de flujo el sistema funciona mejor ya que llegar al equilibrio es más difícil lo cual nos dice que el movimiento dentro del sistema e indispensable para la generación del potencial.



## 8.4 Concentración en estado estacionario

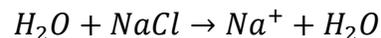
En la serie de experimentos también se midió la concentración en los tres apartados para entender un poco qué es lo que pasaba con las membranas, la selectividad de éstas, el proceso de separación entre ion- ion que se da gracias a las membranas, así como el arreglo matemático.

Cada 5 minutos se midió la concentración en 9 puntos ubicados a lo largo del sistema.

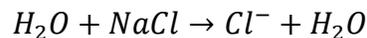
En todos los casos las líneas sobre puestas en las gráficas es el lugar en donde se encuentran las membranas, las pruebas fueron realizadas a una temperatura de 16°C tomando la muestra a la mitad del sistema en donde se encontraba el volumen total y fueron tomadas ahí ya que es donde menos fugas existían y se podía apreciar más el efecto de las membranas.

En todos los casos expuestos se llevan a cabo las reacciones antes mencionadas:

La membrana catiónica, sólo deja el paso a los cationes  $\text{Na}^+$



La membrana aniónica, sólo deja el paso a los aniones  $\text{Cl}^-$



Al juntar de nuevo los productos de cada lado de las membranas se obtiene, en donde los iones vuelven a unirse.



Al juntar de nuevo los productos de cada lado de las membranas se obtiene, en donde los iones vuelven a unirse.

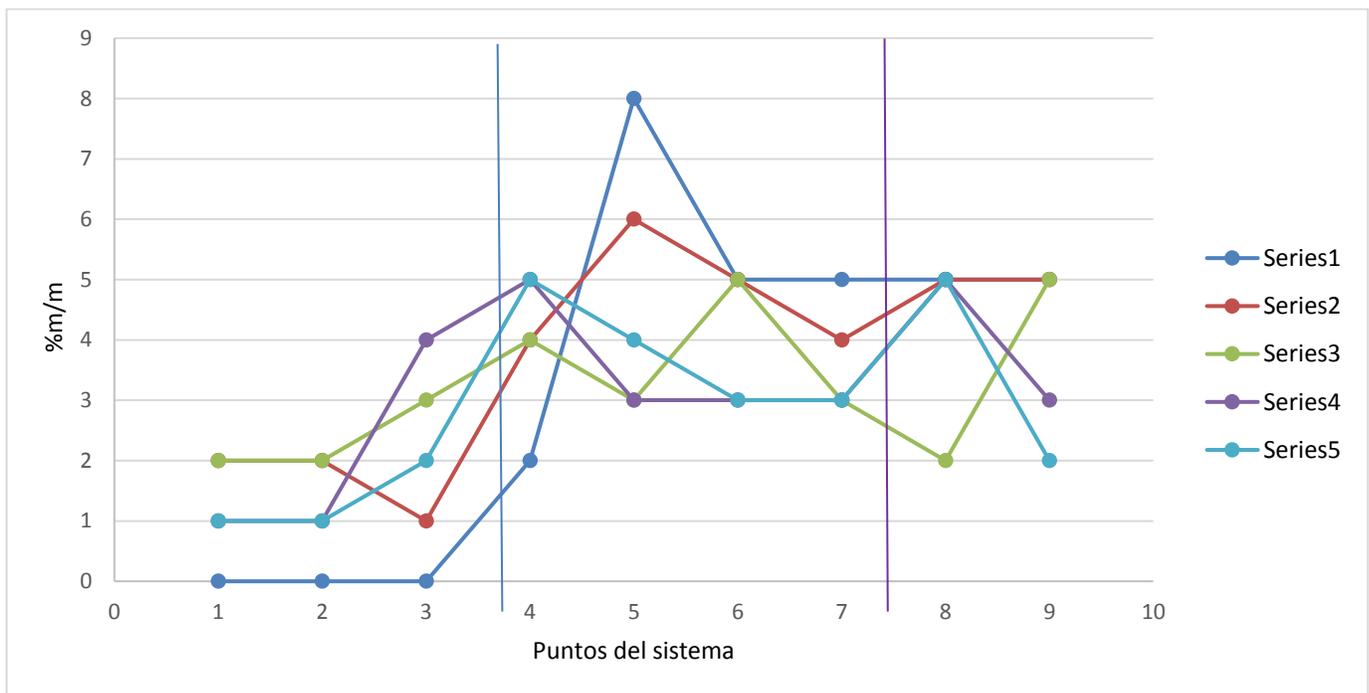
A diferencia de los primeros experimentos de los demás es que el agua se depositó durante 25 min sin ningún movimiento, después de este tiempo se juntó el agua por los orificios de los costados.

En los experimentos en donde el movimiento no es completamente cero y que el agua llevaba una cierta velocidad, junto el agua en donde al final de dichos experimentos se midió la concentración y se notó que el agua es menos salada que el agua inicial y que se había formado de nuevo agua salada.



**Tabla 8. Tabla de concentración estado estacionario (a)**

Tiempo (s)	Pruebas								
	%m/m punto 1	%m/m punto 2	%m/m punto 3	%m/m punto 4	%m/m punto 5	%m/m punto 6	%m/m punto 7	%m/m punto 8	%m/m punto 9
300	0	0	0	2	8	5	5	5	5
600	2	2	1	4	6	5	4	5	5
900	2	2	3	4	3	5	3	2	5
1200	1	1	4	5	3	3	3	5	3
1500	1	1	2	5	4	3	3	5	2



**Figura 12. Concentración estado estacionario (a)**

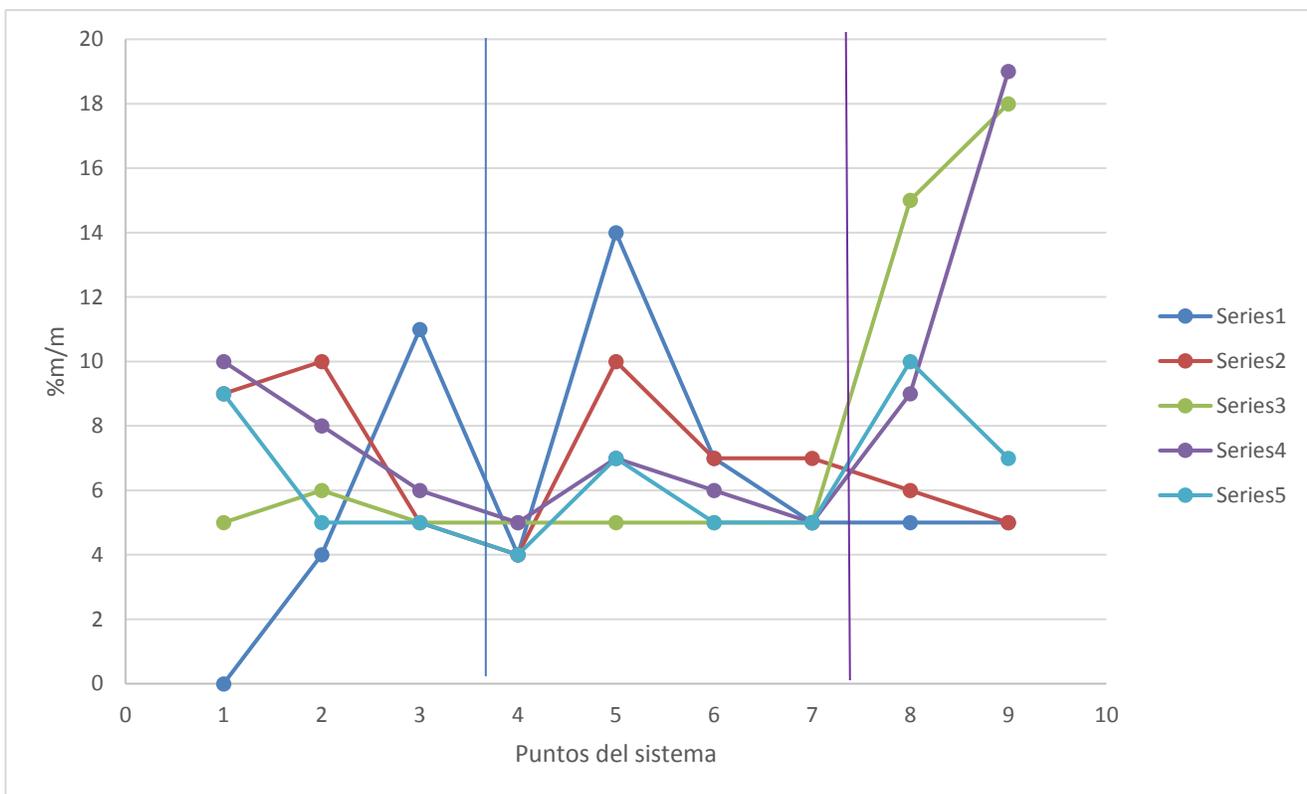
En la Figura 11. Se observa que después de 5 minutos la concentración en el centro del sistema disminuyó de 35 %m/m a 8 %m/m y continuó disminuyendo hasta 3 %m/m donde el agua ya no es salada, se dio el efecto de desalación a la par de la producción de un potencial eléctrico.



En los costados de las membranas que es donde se está dando el intercambio iónico la concentración va aumentando del lado en donde el agua era destilada, matemáticamente la difusión de la sal debe ser pequeña y es imposible realizar la medición de manera exacta con el refractómetro.

**Tabla 9. Tabla de concentración estado estacionario (b)**

Tiempo (s)	Pruebas								
	%m/m punto 1	%m/m punto 2	%m/m punto 3	%m/m punto 4	%m/m punto 5	%m/m punto 6	%m/m punto 7	%m/m punto 8	%m/m punto 9
300	0	4	11	4	14	7	5	5	5
600	9	10	5	4	10	7	7	6	5
900	5	6	5	5	5	5	5	15	18
1200	10	8	6	5	7	6	5	9	19
1500	9	5	5	4	7	5	5	10	7



**Figura 13. Concentración estado estacionario (b)**

En el caso b ocurrió algo muy parecido al caso a en donde la concentración en el centro del dispositivo disminuyo, aunque contaban con una concentración después de los 5 minutos más alta 14 ppm, los costados de las membranas presentaron varias fluctuaciones y que en un caso fue mucha la diferencia entre el punto 3 y 4. Se



percibió que después de un tiempo el punto 3 tiende al equilibrio como se veía en las gráficas anteriores cuando se estudiaba la variación del potencial.

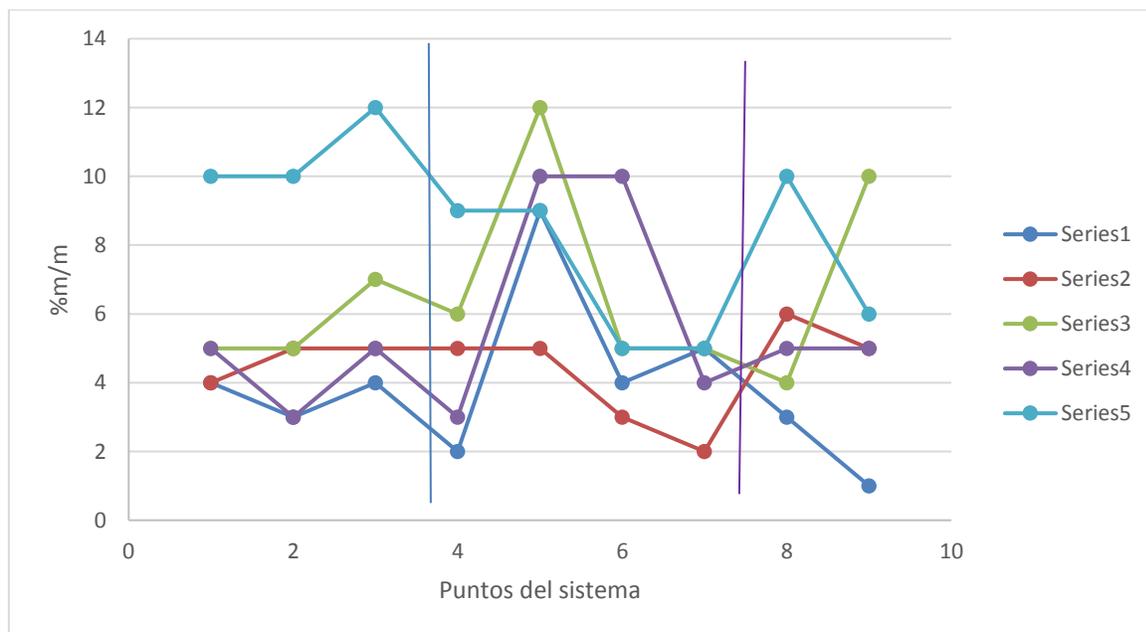
Y como con un número de Reynolds tendiendo a cero se comporta igual que en un estado estacionario y tiende al equilibrio.

La línea amarilla explica las fugas que existieron en el modelo y como la concentración en los electrodos aumento considerablemente en los últimos ensayos desde comenzar con una concentración alta descender en el centro y aumentar hacia el final del modelo.

### 8.5 Concentración en Reynolds bajo

*Tabla 10. Tabla de concentraciones para Reynolds bajo (a)*

Tiempo (s)	Pruebas								
	%m/m punto 1	%m/m punto 2	%m/m punto 3	%m/m punto 4	%m/m punto 5	%m/m punto 6	%m/m punto 7	%m/m punto 8	%m/m punto 9
	300	4	3	4	2	9	4	5	3
600	4	5	5	5	5	3	2	6	5
900	5	5	7	6	12	5	5	4	10
1200	5	3	5	3	10	10	4	5	5
1500	10	10	12	9	9	5	5	10	6



*Figura 13. Concentraciones para Reynolds bajo (a)*



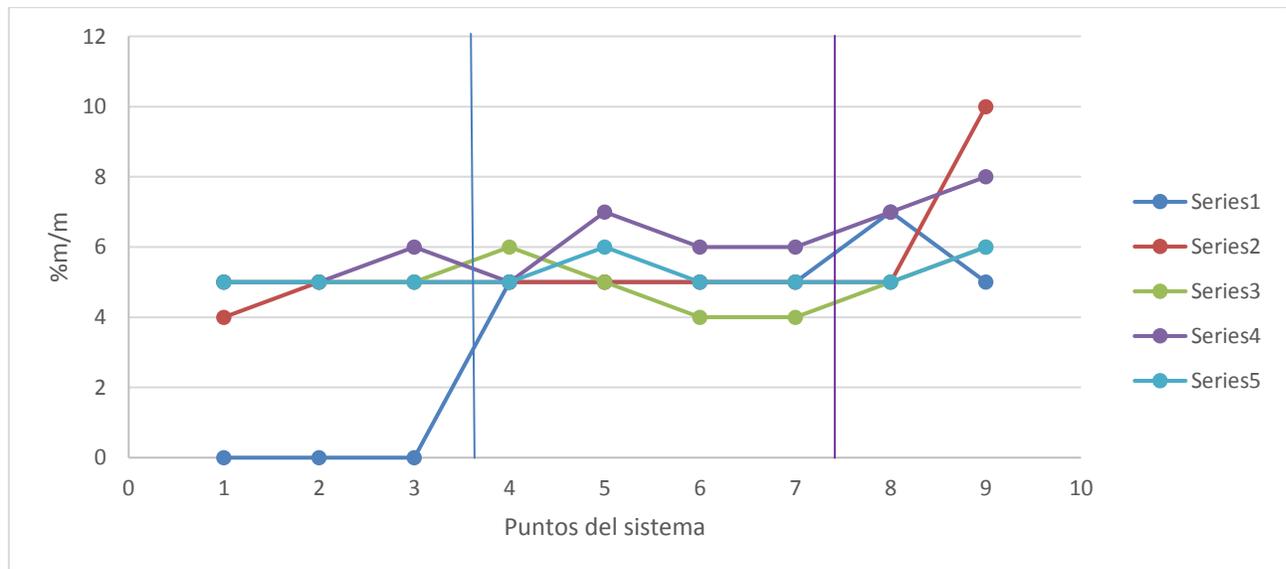
Cuando una fuerza externa empieza a interrumpir el equilibrio a diferencia del experimento anterior la concentración en el punto central va variando a diferencia del anterior ya que está tarda más tiempo en llegar al punto de equilibrio la tendencia que se ve ahora a partir del segundo 900.

La concentración entre los puntos 3,4 y 6,7 a diferencia de los sistemas estáticos se comportan de manera más irregular ya que suben y bajan de manera irregular ya que un movimiento que está en la parte de arriba interrumpiendo el equilibrio y en la parte inferior con las dos salidas controladas por dos válvulas, el sistema de del flujo de salida fue por goteo lento, lo que provocó que en los diferentes puntos no se llegara al equilibrio en los primeros momentos como en estado estacionario.

Al final del experimento y de medir el volumen del agua que se juntó en un recipiente se midió la concentración final y fue de 24 ppm.

**Tabla 7. Tabla de concentración a Reynolds bajo (b)**

Tiempo (s)	Pruebas								
	%m/m punto 1	%m/m punto 2	%m/m punto 3	%m/m punto 4	%m/m punto 5	%m/m punto 6	%m/m punto 7	%m/m punto 8	%m/m punto 9
300	0	0	0	5	5	5	5	7	5
600	4	5	5	5	5	5	5	5	10
900	5	5	5	6	5	4	4	5	6
1200	5	5	6	5	7	6	6	7	8
1500	5	5	5	5	6	5	5	5	6



**Figura 14. Concentración a Reynolds bajo (b)**

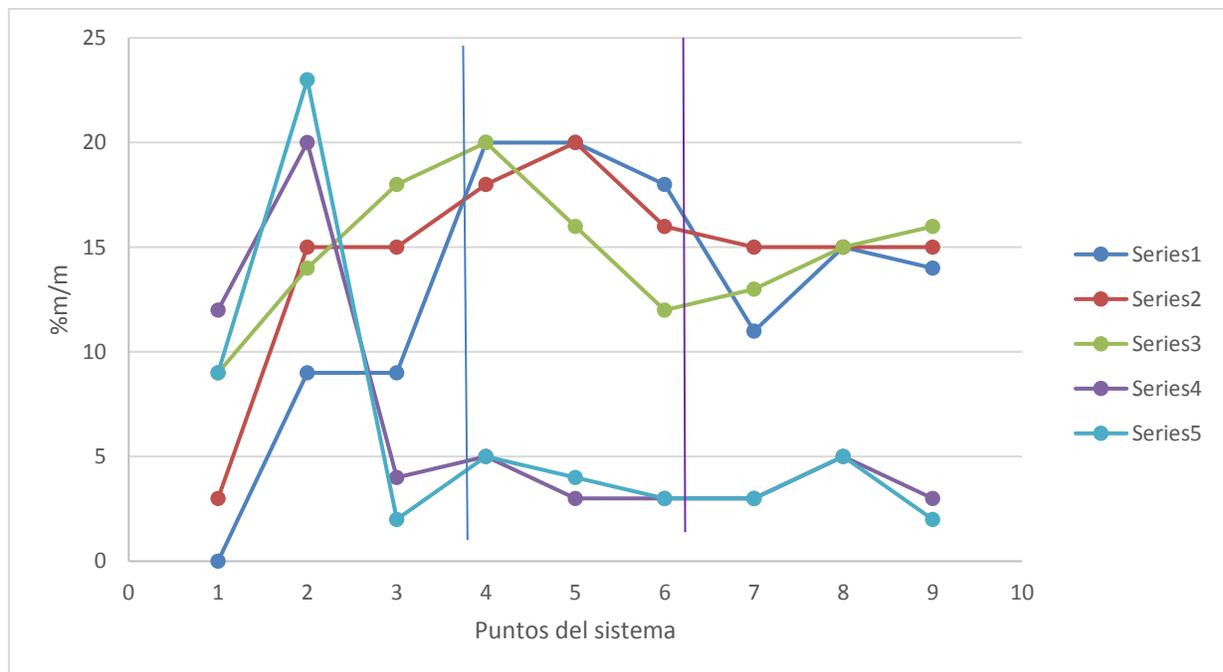


En este experimento la prueba es con un Reynolds muy bajo y adopto el comportamiento de estado estacionario debido a que el flujo es tan pequeño y no causa gran perturbación en el sistema, aunque a diferencia de que el estático o en el caso (a) es que el sistema por completo adopto el equilibrio, aunque durante los 600 s tuvo un comportamiento de manera muy irregular.

## 8.6 Concentraciones para Reynolds medio

*Tabla 8. Tabla de concentraciones para Reynolds medio (a)*

Tiempo	Pruebas								
	%m/m punto 1	%m/m punto 2	%m/m punto 3	%m/m punto 4	%m/m punto 5	%m/m punto 6	%m/m punto 7	%m/m punto 8	%m/m punto 9
300	0	9	9	20	20	18	11	15	14
600	3	15	15	18	20	16	15	15	15
900	9	14	18	20	16	12	13	15	16
1200	12	20	4	5	3	3	3	5	3
1500	9	23	2	5	4	3	3	5	2



**Figura 14. Tabla de concentraciones para Reynolds medio (a)**



Cuando el Reynolds es bajo se puede observar que en las corridas todo va variando y que llegar al equilibrio como en los casos anteriores es más complicado, había una corriente de agua entrando que modificaba el equilibrio.

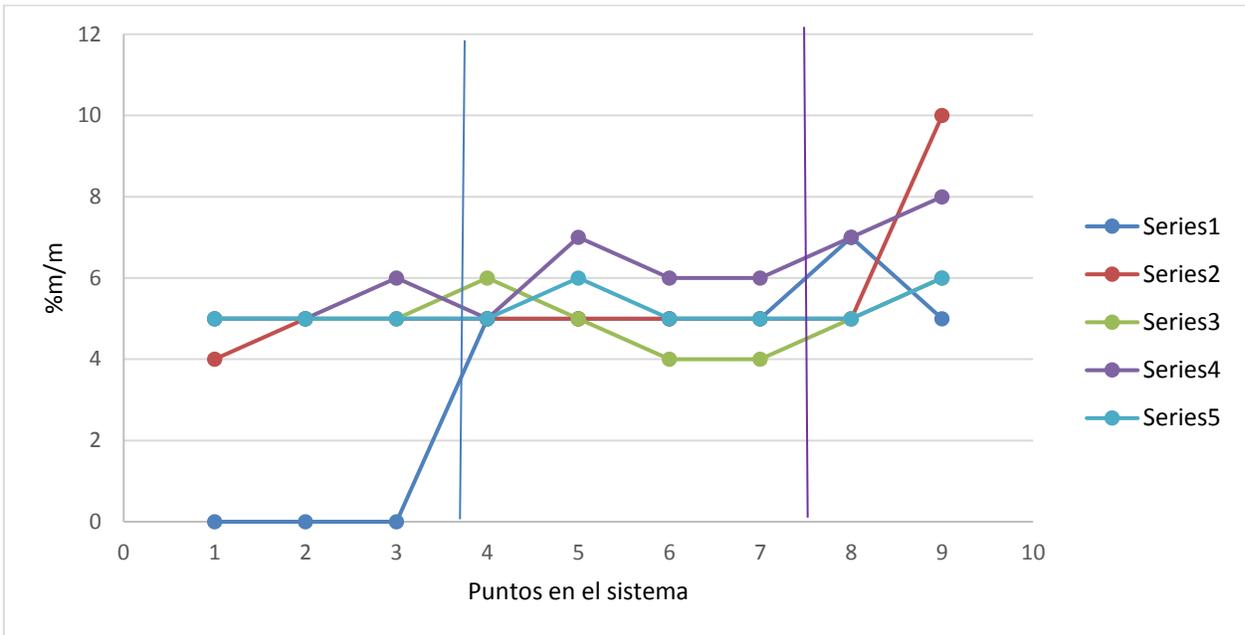
En el punto numero 5 a diferencia de los demás experimentos se mantuvo casi todo el tiempo en valores altos, al existir un mayor movimiento de iones la de entra y las salidas laterales, hubo la posibilidad de que existieran más fugas y por lo tanto los resultados en los puntos a los costados de las membranas.

Al final del experimento se llegó a un punto de equilibrio en donde ya no existía mucho intercambio de iones y por eso es por lo que al segundo 1200 las concentraciones comenzaron a disminuir al buscar el equilibrio.

Las pilas convencionales tienen un tiempo de vida en donde después de un cierto de vida su potencia disminuye y eso puede explicar lo que paso después de 1200 segundos ya que las membranas y el sistema fueron expuestas a mucho trabajo y que el potencial tendía a que la concentración se quedase en las membranas y ocurriera el efecto de polarización por concentración.

**Tabla 11. Tabla de concentraciones para Reynolds medio (b)**

Tiempo (s)	Pruebas								
	%m/m punto 1	%m/m punto 2	%m/m punto 3	%m/m punto 4	%m/m punto 5	%m/m punto 6	%m/m punto 7	%m/m punto 8	%m/m punto 9
300	0	0	0	5	5	5	5	7	5
600	4	5	5	5	5	5	5	5	10
900	5	5	5	6	5	4	4	5	6
1200	5	5	6	5	7	6	6	7	8
1500	5	5	5	5	6	5	5	5	6



**Figura 15. Concentraciones para Reynolds medio (b)**

Este experimento tiene un comportamiento más parecido al caso anterior de Reynolds muy bajo, esto da a explicar que se necesita bastante movimiento para que se vea un cambio en el sistema, puesto que aquí no fue suficiente los iones buscaron un punto de equilibrio lo que se puede ver en el segundo 600, se pretende posteriormente estudiar este fenómeno, así como realizar cambios al sistema, eliminando un gran porcentaje de las resistencias.



## 9 Conclusiones

En este trabajo se fabricó un dispositivo para la conversión de la energía química contenida en el agua salada en electricidad. El modelo se construyó con materiales que no reaccionaran con el medio. El tipo de modelo cae en la categoría de técnica RED en sistema abierto.

Se encontró que:

- En estado estacionario, la concentración de salinidad tiende al equilibrio lo cual se ve reflejado en el potencial ya que empieza adoptar valores parecidos después de un tiempo.
- La temperatura del medio ambiente es un factor importante para la eficiencia del sistema ya que se observó que si la temperatura aumenta por arriba de los 20 °C la eficiencia del sistema comenzó a disminuir.
- Cuando se tiene un Reynolds bajo los valores de potencial tienden a aumentar hasta que adoptan el equilibrio como en el sistema estacionario ya que el movimiento no es lo suficientemente alto, la concentración ya no es tan parecida en todos los puntos.
- Cuando se cuenta con un Reynolds medio en donde existe un movimiento constante dentro del sistema los potenciales tienden a elevarse esto se puede observar en las concentraciones que son cambiantes de un punto a otro en los diferentes intervalos de tiempo.
- La técnica RED es factible para generar potenciales de energía eléctrica y desalar el agua de mar lo cual ayudaría a resolver grandes problemas de escasez de agua.

Se espera en futuras líneas de investigación se evalúen cambios en: electrodos, membranas, variar la concentración de las corrientes, la temperatura del agua y así como probar el sistema abierto con diferentes soluciones electrolíticas que sean amigables con el ambiente.

También se debe probar con sistemas cerrados, reversibles y en serie para poder comparar y evaluar la eficiencia de estos.



## Conclusiones



Para futuras líneas de trabajo uno de los principales temas sería entender mejor por qué se da el fenómeno de polarización por concentración.



## 10 Bibliografía

1. *Recent development in forward osmosis: Opportunities bases on swelling and shrinking or hydrogels.* **Zhao, S. Zou, L., Tang, Ch. y D Mulcay.** 2012, *Environmental Science & Technology*, Vol. 48, págs. 157-163.
2. *On the Sustainability of Renewable Energy Sources.* **Edenhofer, O., Seyboth, K., Creutzinger, F.** 2013, *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 38, págs. 169-200.
3. *Osmotic power-power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients.* **Skilhagen. Dugstad, J. y Aaberg R.** 2008, *Desalination*, Vol. 220, págs. 476-482.
4. **Skråmestø, Ø.S., Skilhagen, S.-E. and Nielsen.** *Power production based upon osmotic pressure.* *Waterpower XVI*, Spokane, WA, USA : s.n., 2009.
5. *Salinity gradient energy potential in Colombia considering site specific constraints.* **Álvarez-Silva, O., Y A, F. Osorio.** *Medellin Colombia : Renewable Energy*, 2015, *Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 74, págs. 737-748.
6. *Practical global salinity gradient power potencial in Québec, Canada J.* **Álvarez-Silva, O, Osorio, A y Winter C...** *Canada : Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, págs. 1387-1395.
7. *Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmois and reverse electrodialysis.* **Post, J, Veerman J, Hameler, H., Euverink , G., Metz., S., Nymeijer, K. & Buisman C.** 2007, *Journal of Membrane Science*, págs. 218-230.
8. **G. Micale, A. Cipollina, A. Tamburini.** Chapter Outline. *Sustainable Energy from Salinity Gradients.* *Universita` degli Studi di Palermo, Palermo, Italy* : s.n., 2016.
9. *Extracting renewable energy from a salinity difference using a capacitor.* **Brogioli, D.** *Dipartimento di Medicina Sperimentale, Universita` degli Studi di Milano-Bicocca* : 31 Julio 2009, 2009, *Physical Review Letters*, págs. 058501-1 058501-4.
10. **Rafael Alexandri Rionda, Fabiola Rodríguez Bolaños.** *Prospectiva del sector Eléctrico 2017-2030.* *Cuidad de México* : SENER, 2017.
11. **R. A. Tufa, E. Rugiero, D. Chanda.** "Salinity gradient power-reverse electrodialysis and alkaline polymer electrolyte water electrolysis for hydrogen production. *Journal Membrane.* 2016, págs. 155-164.



12. **D'Angelo, a. Galia, and O. Scialdone.** Cathodic abatement of Cr(VI) in water by microbial reverse-electrodialysis cells. *Electroanal. Chem.* 2015.
13. **Recursos, Naturales Secretaria de Medio Ambiente y.** SEMARNAT. [En línea] 29 de Mayo de 2014. <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/zona-federal/costas-de-mexico>.
14. **Teresa Gutiérrez, Jaime Suaste.** Agua.org.mx. [En línea] [Citado el: 29 de Mayo de 2018.] [https://agua.org.mx/seccion\\_ninos/rios-de-mexico/](https://agua.org.mx/seccion_ninos/rios-de-mexico/).
15. *Coastal Lagoons of México , their origin and classification.* **Lankford, R.R.** New York : Estuarine Processes,Circulation, Sediments and Transfer of Material in the Estuary, 1977, pág. 182.
16. **SEMARNAT.** *Guia de programas de fomento a la generación de energía con recursos renovables .* CDMX : s.n., 2015.
17. **Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C.** Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. *Todo sobre el agua .* [En línea] [Citado el: ] <https://agua.org.mx/propiedades-derl-agua/>.
18. **Mercé Raventós, Sonia Duarte.** Tecnología de membranas. 2007.
19. **Alberto Cláudio, Cristiano Piacsek, Ronaldo Nobrega.** *Processos de Separação por Membranas.* Rio de Janeiro : e-papers, 2006.
20. **García, Don Julen Cabero.** *Proceso de desalacion de agua de mar mediante un sistema de osmosis inversa de muy alta conversion en tres etapas con recirculacion de permeado y doble sistema de recuperación de energía.* Bilbao : Universidad Euskal Herriko del pais Vasco Unibertsitatea, 2015.
21. **Medina, J.** *Desalinización de aguas salobres y de mar en ósmosis inversa .* Madrid Epaña : Mundi Prensa, 1991.
22. **Cruz, Carlos de la.** *La desalinización de agua de mar mediante el empleo d energias renovables .* Madrid España : Laboratorio de Alternativas , 2006.
23. *Efficiency increase in thermal desalination plants by matching thermal and solar distillation: theoretical analysis.* **Cipollina, A.** 2005, Journal for Desalination. Desalination, págs. 127-136.
24. **Germán Eduardo Dévora-Isiordia\*, Rodrigo González-Enríquez, Saúl Ruiz-Cruz.** *Evaluation of desalination processes and their development in México.* Sonora, México : s.n., 2013.



## Bibliografía



25. **García, Ulises Miguel López.** *Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua.* 2005.
26. **Etzaguery Marín, Rodolfo Silva, Angelica Felix Delgado.** *Energías del Océano "Potencial del gradiente Salino".* [ed.] Cemie-Oceano. Ciudad de México : Aún no se publican , 2017.
27. **Medina, J.** *Calidad del agua.* España : Mundi-Prensa, 2000.
28. **Ávila E. Llongueras A. García A., Lloveras J.** Estudio Comparativp Respecto a Coste y Producción de Diversas Plantas Desalinizadoras de Agua de Mar o Salobre . *Memorias del III Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos,AEIPRO.* Barcelona, España : s.n., 1996, págs. 144-153.
29. **ONU.** 17 Objetivos para transformar nuestro mundo . [En línea] 16 de enero de 2018. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/la-agenda-de-desarrollo-sostenible/>.
30. —. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo . [En línea] 16 de enero de 2018. <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html>.
31. **WEC.** *La red de líderes del sector energético que.* 2015. págs. 1-14.
32. *Fracción XVI Ley de Transición Energética. Artículo 3.*
33. **SENER.** *Prospectiva de energías renovables 2017-2031.* México : s.n., 2017.
34. **Rodolfo Silva, Jose Luis Villate ,Angélica Félix.** *Una Visión Internacional para la Energía Oceanica.* México : CEMIE-Océano, 2017.
35. *Power generation with pressure retarder osmosis:An experimental and theoretical investigation.* **Achilli, A. y Childress, A.** 2009, Journal of Membrane Science, Vol. 343, págs. 42-52.
36. *Blue energy: Current technologies for sustainable power generation from water salinity gradient.* **Jia, Z., Wang, B., Song, Sh. y Fan Y.** 2014, Renewable and Sustainable Energy Reviews, págs. 91-100.
37. *Determination of salinity gradient power potential in Québec.* **Berrouche, P. y Pillay P.** America Institute of Physics : s.n., 4 de Octubre de 2012, Renewable Sustainable Energy., págs. 053113-19 053113-19.



## Bibliografía



38. **Vallejo, Sara.** *Generación de Energía a partir del Gradiente Salino entre el agua de Río y de Mar utilizando una celda de electrodiálisis Inversa.* Medellín Colombia : Universidad de Minas en Medellín Colombia, 2013.
39. **Castaño, Sara Vallejo.** *Energy generation from salinity gradients through Reverse Electrodialysis and Capacitive Reverse Electrodialysis.* Universidad Nacional de Colombia . Medellín Colombia : s.n.
40. **Piotr Dlugolecki, Kitty Nymerij, Sybrand Metz, Matthias Wessling.** Current status of ion exchange membranes for power generation from salinity gradients. *Journal of Membrane Science.* 2008, 319.
41. **Collana, Juan Taumaturgo Medina.** *Evaluación experimental de espacidores de flujo en la transferencia de masa en un módulo de electrodiálisis reversible .* Peru : s.n., 2015.
42. **Veerman, Joost.** *Reverse electrodialysis design and optimization.* University of Groningen : s.n., 2010. pág. 225.
43. *Effect of solution concentration and composition on the electrochemical properties of ion exchange membranes conversion.* **R, Fontananova, D Messana, R.A. Tufa, I. Nicotera, V. Kosma, E. Curcio, W. van Baak, E. Drioli, G. Di Profio.** *Rendel Italia : Journal of Power Sources,* 2017, Vol. 340. 282-293.
44. **Mengual, José Ibañez.** *Procesos de transporte y separación en membranas .* Murcia : Secretariado de Publicaciones , 1989.
45. **Mengual, J. A. Ibañez.** *Fundamentos de los procesos de transporte y separación de membranas.* Murcia, España : EDITUM, 1989, 1989. pág. 171 .
46. **Reid, Prausnitz y O'Connell.** *Lange: Manual de Química.* [ed.] Norbert Adolph Lange John A. Dean. s.l. : McGraw-Hill, 2001.
47. *The power of salinity gradients: An Australian example.* **Helfer, F. y Lemckert Ch.** 2015, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, Vol. 50, págs. 1-16.
48. *A renewable energy option.* **HydroQuebec.** 2015, *Osmotic Power.*
49. **Rosa de Guadalupe González Huerta, Jesús Nahúm Hernández Pérez, Arturo Manzo Robledo.** *Generation of electrical energy from a salt gradient potential using reverse electrodialysis.* Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional,. Paisley, UK : UWS, 2018. pág. 5.



## Bibliografía



50. **Fumatech**. Ion Exchange Membranes. *Fumatech Functional Membranes for Fuel Cells and Batteries*. [En línea] [Citado el: 05 de Junio de 2018.] [https://www.fumatech.com/NR/rdonlyres/3DF915E1-47B5-4F43-B18A-D23F9CD9FC9D/0/FUMATECH\\_BWT\\_GmbHIon\\_Exchange\\_Membranes.pdf](https://www.fumatech.com/NR/rdonlyres/3DF915E1-47B5-4F43-B18A-D23F9CD9FC9D/0/FUMATECH_BWT_GmbHIon_Exchange_Membranes.pdf).
51. **Corporation, Astom**. Ion exchange membrane . [En línea] [Citado el: 05 de Junio de 2018.] [http://www.astom-corp.jp/en/catalog/pdf/Astom\\_Products\\_Catalogue.pdf](http://www.astom-corp.jp/en/catalog/pdf/Astom_Products_Catalogue.pdf).
52. **AGC**. Selemion Ion-Exchange Membranes. [En línea] [Citado el: 05 de Junio de 2018.] <http://www.selemion.com/SELC.pdf>.
53. **Excellion™ Membranes, SnowPure Water Technologies**. *ExcellMembranes*. San Clemente : Enero, 2014.
54. *Marco jurídico de las energías renovables en México*. **CEMDA**. 2017.
55. *Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile*. **Pattle, R.** 1954, Nature, pág. 174:660.
56. *Del desarrollo al postdesarrollo: otra cooperación es posible y deseable*. **Marcesí, F.** Colombia : s.n., 2012, Revista de los Pueblos , Vol. 40.
57. *Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends-A review*. **Helfer, F. Lemckert, Ch. y Anissimov Y.** Journal of Membrane Science., págs. 337-358.
58. *Osmotic Power. A new and powerful renewable energy source*. **Aaberg, R.** 2003, Elsevier Science Ltd. All rights reserved. REDOCUS , pág. 3.
59. *Wate salination: a source of energy*. **Norman, R.S.** 1974, Science, págs. 350-352.
60. **Porta, M.A.** *Sistema de desalación solar de agua de mar para riego eficiente en un módulo de cultivo*. México : Ingeniería Hidráulica en México., 2002. págs. 55-64. Vol. XVII.
61. *Renewable and Siustainable power generation from water salinity gradient*. **Zhijun Jia, Baohuo Wang, Shiqiang Song, Yongsheng Fan.** China : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, Vol. 31, págs. 91-100.
62. *Applicability of Pressure Retarded Osmosis Power Generation Technology in Sri Lanka*. **Karunarathne, H. y Walpalage S.** 2013, Energy Procedia, Vol. 34, págs. 211-217.



## 11 Glosario

1. **Cuerpo de agua hipersalino:** Dícese del medio en el cual la concentración de sal es superior a la del agua de mar.
2. **Electrodíálisis:** Procedimiento de separación de los iones de una disolución en presencia de un campo magnético empleando para ello unas membranas que tienen la propiedad de permitir el paso de los iones de un signo y no los de signo contrario.
3. **Energía limpia:** La energía limpia es un sistema de producción de energía con exclusión de cualquier contaminación o la gestión mediante la que nos deshacemos de todos los residuos peligrosos para nuestro planeta.
4. **Energía sustentable:** es aquella que, a diferencia de la tradicional (de alto costo, contaminante y agotable), se puede obtener de fuentes naturales prácticamente infinitas como el sol, el aire, la lluvia y el agua cuyo movimiento da fuerza a los ríos y oleaje a los mares y océanos.
5. **Gradiente:** Razón entre la variación del valor de una magnitud en dos puntos próximos y la distancia que los separa.
6. **Hipersalino:** Dícese del medio en el cual la concentración de sal es superior a la del agua de mar.
7. **Laguna Costera:** Es un cuerpo de agua con un eje longitudinal paralelo a la costa que tiene comunicación con el mar (a través de una boca o un canal) y limitada por algún tipo de barrera física o hidrodinámica.
8. **Membranas de intercambio iónico:** Las membranas de intercambio iónico consisten en películas con grupos cargados, estas pueden ser de diferentes materiales como resinas, polímeros y distintos grupos funcionales con propiedades de intercambio iónico.
9. **Presión Osmótica Retardada (PRO):** es la energía del gradiente de salinidad obtenida por diferencia en la concentración salina entre el agua de mar y agua de río.
10. **Electrodíálisis Inversa (RED):** permite convertir la energía libre del mezclado de dos soluciones con diferente concentración de sal en energía eléctrica, mediante el paso de aniones y cationes a través de membranas de intercambio iónico selectiva, aniones y catiónicas respectivamente.
11. **SENER:** Secretaria de Energía
12. **SEMARNAT:** Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.



13. **SGE** : Energía del Gradiente Salino

14. **Sostenibilidad**: Especialmente en economía y ecología, que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al ambiente.

15. **Sustentabilidad**: Que se puede sustentar o defender con razones.