

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

UNIDAD DE INVESTIGACION



AGO 2018



INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

**“OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN
MÓDULO DE ELECTRODIÁLISIS METÁTESIS PARA TRATAR
CONCENTRADOS DE AGUA SALOBRE PROCEDENTES DE
OSMOSIS INVERSA”**

AUTOR: ING. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA

PERIODO DE EJECUCIÓN: DEL 01 DE SETIEMBRE DEL 2017

AL 31 AGOSTO 2018

RESOLUCIÓN N°891 -2017- R

Callao – Agosto 2018

PERU

I. ÍNDICE	1
II. RESUMEN Y ABSTRACT	5
III. INTRODUCCION	7
3.1. Problema de Investigación	7
3.2. Importancia y Justificación	8
3.3. Justificación.....	8
IV. MARCO TEORICO	9
4.1. Osmosis inversa	10
4.1.1. Porcentaje de recuperación (%R).....	10
4.1.2. Porcentaje de rechazo de sal (%rs)	10
4.2. Electrodialisis estándar (ED)	11
4.3. Electrodialisis metátesis (EDM)	12
4.4. Configuraciones de las celdas	13
4.4.1. Electrodialisis estándar con dos compartimientos	13
4.4.2. Electrodialisis bipolar (ED-B) contiene 3 compartimientos	14
4.4.3. Electrodialisis metátesis (ED-M) contiene 4 compartimientos	15
4.5. Elementos de la electrolisis metátesis.....	16
4.5.1. Membranas de intercambio iónico.....	16
4.5.2. Propiedades de membranas de intercambio iónico.....	17
4.5.3. Espaciadores.....	18
4.5.4. Electrodo.....	20
4.5.5. Solubilidad de sales en agua.....	21
4.5.6. Indicadores del proceso de electrodialisis metátesis.....	22
4.5.7. Diseño factorial.....	23
V. MATERIALES Y MÉTODOS	25
5.1. Materiales y equipos.....	25

5.1.1. Membranas.....	25
5.1.2. Electrodos.....	26
5.1.3. Espaciadores.....	27
5.1.4. Configuración de la celda de electrodiálisis de metátesis.....	28
5.1.5. Equipo experimental.....	29
5.1.6. Descripción de la celda de electrodiálisis metátesis.....	30
5.1.7 Metodología de la experimentación.....	32
5.2. Población de la investigación.....	33
5.2.1 Diseño experimental.....	34
5.2.2. Matriz de experimentación.....	35
5.3. Procedimiento de análisis de datos de la desalinización.....	35
5.3.1. Análisis y procesamiento de datos.....	36
5.4. Técnicas de análisis.....	36
VI. RESULTADOS	37
6.1. Conductividad en función del tiempo	37
6.2. Eficiencia de la desalinización	45
VII DISCUSION	46
7.1.. Efectos de los factores de operación	46
7.2. Optimización de los factores	48
7.3. Interacciones de los factores controlables	49
7.4. Análisis de regresión.....	50
7.5. Gráfica de contorno.....	51
VIII REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	52
IX. APENDICES.....	53
X. ANEXO.....	56
MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	56
EVOLUCION DE LA CONDUCTIBILIDAD.....	57

TABLA DE CONTENIDO

1.1. Tablas	
1.1.1. Tabla N° 4.1 Matriz de experimentación.....	24
1.1.2. Tabla N° 5.1 Características de las membranas.....	25
1.1.3. Tabla N° 5.2 Caracterización físico química.....	33
1.1.4. Tabla N° 5.3 Parámetros y niveles.....	34
1.1.5. Tabla N° 5.4 Matriz de experimentación.....	35
1.1.6. Tabla N° 6.1 Conductividad vs tiempo	37
1.1.7. Tabla N° 6.2 Conductividad vs tiempo.....	38
1.1.8. Tabla N° 6.3 Conductividad vs tiempo.....	39
1.1.9. Tabla N° 6.4 Conductividad vs tiempo.....	40
1.1.10. Tabla N° 6.5 Conductividad vs tiempo.....	41
1.1.11. Tabla N° 6.6 Conductividad vs tiempo.....	42
1.1.12. Tabla N° 6.7 Conductividad vs tiempo.....	43
1.1.13. Tabla N° 6.8 Conductividad vs tiempo.....	44
1.1.14. Tabla N° 6.9 Eficiencia de desalinización.....	45
1.1.15. Tabla N° 7.1 Niveles óptimos derivados para variables experimentales.....	48
1.1.16. Tabla apéndice	
Tabla N° 9.1: Conductibilidad vs Tiempo	53
Tabla N° 9.2: : Conductibilidad vs Tiempo	54
Tabla N° 9.3: : Conductibilidad vs Tiempo	55

1.2. Índice de Figuras y Gráficos

1.2.1.	Figura N° 4.1 Esquema de un sistema de osmosis inversa.....	9
1.2.2.	Figura N° 4.2 Flujos de un sistema de osmosis inversa.....	10
1.2.3.	Figura N° 4.3 Esquema de un sistema de electrodiálisis.....	12
1.2.4.	Figura N° 4.4 Esquema de una celda de electrodiálisis	13
1.2.5.	Figura N° 4.5 Esquema de una celda con 2 compartimientos	14
1.2.6.	Figura N° 4.6 Esquema de una celda con 3 compartimientos	15
1.2.7.	Figura N° 4.7 Esquema de una celda con 4 compartimientos	16
1.2.8.	Figura N° 4.8 Esquema de una membrana.....	17
1.2.9.	Figura N° 4.9 Esquema de un espaciador.....	19
1.2.10.	Figura N° 4.10 Solubilidad de sales	21
1.2.11.	Figura N° 5.1 Membrana de intercambio.....	26
1.2.12.	Figura N° 5.2 Electrodo de Titanio platinado	27
1.2.13.	Figura N° 5.3 Espaciadores de polipropileno.....	28
1.2.14.	Figura N° 5.4 Configuración de las Membranas.....	29
1.2.15.	Figura N° 5.5 Diagrama del equipo experimental.....	30
1.2.16.	Figura N° 5.6 Equipo Experimental.....	31
1.2.17.	Gráfico N° 6.1 Conductividad compartimientos-tiempo.....	37
1.2.18.	Gráfico N° 6.2 Conductividad compartimientos-tiempo.....	38
1.2.19.	Gráfico N° 6.3 Conductividad compartimientos-tiempo.....	39
1.2.20.	Gráfico N° 6.4 Conductividad compartimientos-tiempo.....	40
1.2.21.	Grafica N° 6.5 Conductividad compartimientos-tiempo.....	41
1.2.22.	Grafica N° 6.6 Conductividad compartimientos-tiempo.....	42
1.2.23.	Grafica N° 6.7 Conductividad compartimientos-tiempo.....	43
1.2.24.	Grafica N° 6.8 Conductividad compartimientos-tiempo.....	44
1.2.25.	Grafica N° 7.1 Efectos principales	47
1.2.26.	Grafica N° 7.2 Optimización para diseño factorial.....	48
1.2.27.	Figura N° 7.3 Diagrama de Pareto	49
1.2.28.	Grafica N° 7.4 Interacción de los parámetros de operación para el porcentaje de desalinización.....	50
1.2.29.	Grafica N° 7.5 % de desalinización – contorno.....	51
1.2.30.	Grafica apéndice	
	Gráfica N° 9.1: Conductibilidad vs Tiempo a 6 voltios.....	53
	Gráfica N° 9.2: Conductibilidad vs Tiempo a 8 voltios.....	54
	Gráfica N° 9.3: Conductibilidad vs Tiempo a 12 voltios.....	55

II. RESUMEN Y ABSTRACT

2.1 RESUMEN

Uno de los recursos inevitables para el ser humano es el agua dulce, sin embargo, la escasez de este producto se está convirtiendo en una amenaza grave en todo el mundo, que es el resultado del rápido crecimiento poblacional y desarrollo industrial. La tecnología de desalinización vía osmosis inversa ha ganado mucha atención en los últimos años sin embargo se produce simultáneamente flujos de concentrados conocidos como salmuera que se descargan sin ningún tratamiento.

La presente investigación tiene el objetivo de optimizar los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis metátesis para tratar concentrados de procedentes de osmosis inversa

En este trabajo experimental se ha construido un módulo de electrodiálisis metátesis a nivel de laboratorio, se ha identificado y evaluado los parámetros operacionales del equipo, utilizando soluciones modelo de cloruro de sodio semejantes a concentrados de descarga de osmosis inversa y mediante un diseño factorial se ha optimizado las variables de operación haciendo uso del software Minitab.

Los resultados muestran, que los parámetros óptimos cuando el voltaje es 16V, flujo de 150 mL/min, y concentración de 5g/L NaCl en 300 min. se alcanza un porcentaje de desalineación de 32,1 %

2.2 ABSTRACT

One of the inevitable resources for the human being is fresh water, however, the scarcity of this product is becoming a serious threat throughout the world, which is the result of rapid population growth and industrial development. Desalination technology via reverse osmosis has gained much attention in recent years, however, flows of concentrates known as brine are produced simultaneously and are discharged without any treatment.

The present research aims to optimize the operation parameters of a metathesis electro dialysis module to treat concentrates from reverse osmosis.

In this experimental work, a metathesis electro dialysis module has been constructed at the laboratory level, the operational parameters of the equipment have been identified and evaluated, using model sodium chloride solutions similar to reverse osmosis discharge concentrates and using a factorial design. Optimized the operation variables using the Minitab software.

The results show, that the optimal parameters when the voltage is 16V, flow of 150 mL / min, and concentration of 5g /L NaCl in 300 min. a percentage of misalignment of 32,1% is reached



III. INTRODUCCION

3.1. Problema de Investigación

Con el crecimiento de la población y el desarrollo industrial, más de 4 mil millones de personas enfrentan una grave escasez de agua en todo el mundo; por lo tanto, la producción de agua potable se está convirtiendo en un problema cada vez más global . Se estima que la escasez global de agua aumenta debido al cambio climático y otros factores .

Las tecnologías de desalinización han ganado mucha expansión en los últimos años respecto a sus capacidades y rendimiento. Aunque estas tecnologías están produciendo agua potable, por otro lado, están produciendo flujos de desechos concentrados, conocidos como salmuera. Otras industrias también producen estos residuos de corrientes de salmuera, textiles, alimentos y productos químicos. Las características de la salmuera producida dependerán de la alimentación que ingrese al sistema y de ~~que~~ las tecnologías empleado. Las estrategias de manejo de salmuera apuntan a la minimización de salmuera, directa eliminación de salmuera o reutilización de salmuera. La opción óptima para la eliminación de salmuera depende de una serie de parámetros tales como: cantidad de salmuera (volumen), calidad de la salmuera (composición), ubicación geográfica (punto de descarga) y capital y funcionamiento costos.

La electrodiálisis metátesis (EDM) es un proceso de desalinización que permite convertir sales poco solubles en soluciones altamente solubles. es una modificación del proceso de electrodiálisis estándar, las soluciones electrolíticas están separadas por

membranas de intercambio catiónico y aniónico dispuesta en forma alterna entre dos electrodos. la unidad repetitiva está formada por dos celdas diluidas y dos celdas de concentrado. El efectuar un estudio experimental responderá a la siguiente interrogante:

¿Cuáles serán los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis metátesis en el tratamiento de concentrados de agua salobre procedentes de osmosis inversa

El objetivo general del trabajo de investigación es Optimizar los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis metátesis para tratar concentrados de agua salobre procedentes de osmosis inversa.

3.2. Importancia y Justificación

3.2.1. Importancia

Al determinar experimentalmente los parámetros de operación (potencial eléctrico , Flujo y concentración inicial del agua de rechazo en la desalinización mediante electrodiálisis metátesis, a nivel laboratorio puede fácilmente trabajar a otra escala y nos permitirá efectuar la desalinización de concentrados procedentes de agua salobre o agua de mar a mayor volumen de descarga.

3.3. Justificación

Evaluar una nueva tecnología limpia como una alternativa en la desalinización de agua salobre o concentrada de osmosis inversa, frente a otras técnicas que usan reactivos químicos para su tratamiento.



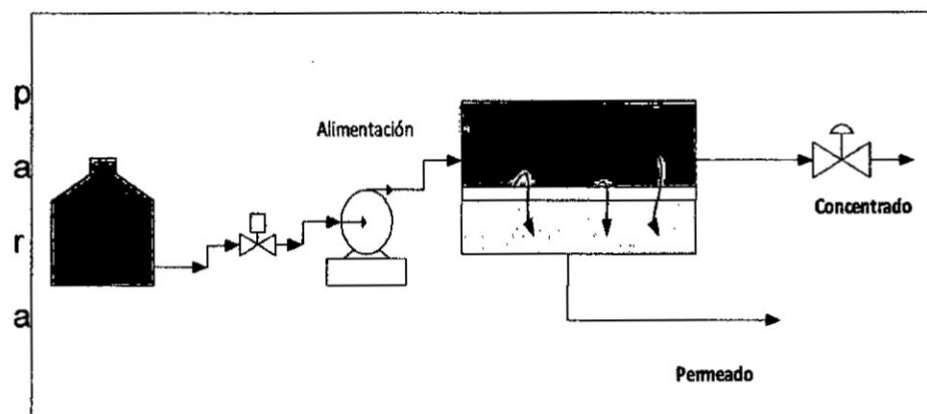
IV. MARCO TEORICO

4.1. Osmosis inversa

La ósmosis inversa (OI) es un proceso de separación en donde el agua se presuriza contra una membrana semipermeable que deja pasar el agua y retiene la sal a esta última denominándole rechazo figura N° 4.1. Las membranas en general actúan como barreras permeables selectivas que permiten que algunas sustancias (como el agua) permee a través de ellas mientras retiene otras sustancias disueltas (como iones).

Tecnología de ósmosis inversa ha mejorado considerablemente en las últimas dos décadas, y las plantas de desalinización actuales pueden desalinizar agua de mar con mucha menos energía que térmica desalinización (4, 9). En la actualidad, la ósmosis inversa es la tecnología más eficiente en energía para el agua de mar desalinización y es el punto de referencia para la comparación para cualquier nueva tecnología de desalinización.

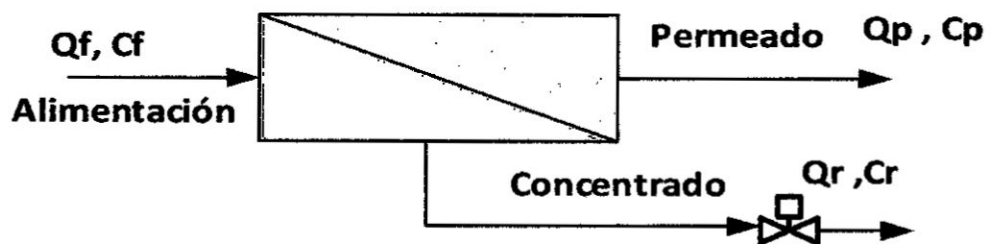
FIGURA N°4.1
ESQUEMA DE UN SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA



Fuente: Elaboración Propia

evaluar la operatividad y calidad del agua producto se evalúan los siguientes indicadores.

FIGURA N°4.2
FLUJOS DE UN SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA



Fuente: Elaboración Propia

4.1.1. Porcentaje de recuperación (%R)

La recuperación se define como el porcentaje flujo de agua de alimentación que se convierte en permeado o agua producto. Es calculada por la siguiente ecuación.

$$\% R = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100\% = \frac{Q_p}{(Q_p + Q_c)} \times 100\%$$

Donde: % R = Porcentaje de recuperación, Q_p = velocidad de flujo del permeado (L/h, m^3/d , gpm), Q_f = velocidad de flujo de la alimentación (L/h, m^3/d , gpm)

4.1.2. Porcentaje de rechazo de sal(% rs)

Indica el porcentaje de la concentración de sales de la alimentación (CF) que es rechazada por la membrana. El % de rechazo puede ser medido en sólidos totales

disueltos(STD) o a través de la conductividad(us) es calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ sales rechazo (SR)} = \left(\frac{C_f - C_p}{C_f} \right) \times 100\%$$

%SR de sales de rechazo Cp: concentración del permeado (ppm)

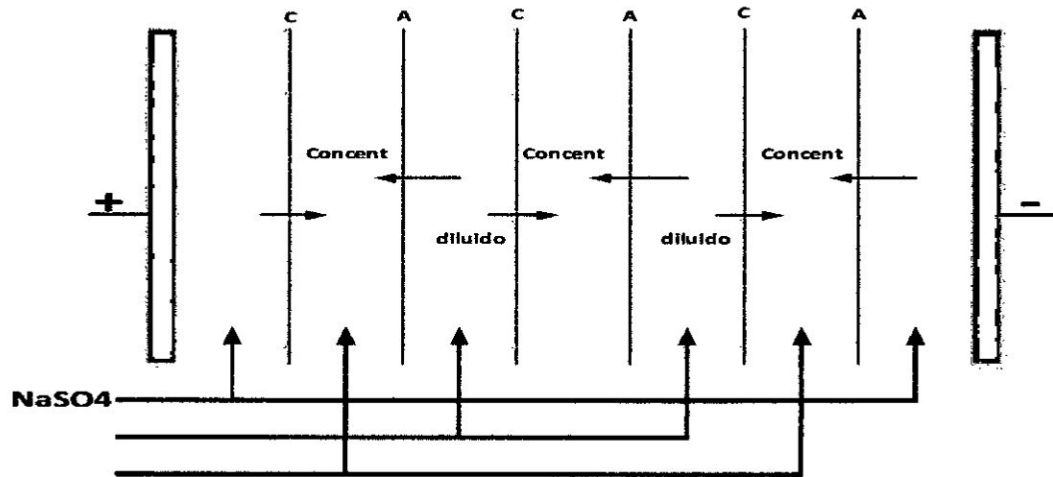
Cf: concentración de Alimentación(ppm)

4.2. Electrodiálisis estándar (ED)

Electrodiálisis (ED) es un proceso de separación electroquímica que emplea membranas selectivas de ione, colocadas entre dos electrodos (ánodo y cátodo). Cuando los electrodos están cargados eléctricamente (conectados a una fuente eléctrica), una corriente eléctrica fluye a través de la celda de electrodiálisis, como consecuencia, los iones se ven obligados a moverse de acuerdo al campo eléctrico, los aniones migran hacia el ánodo y los cationes hacia el cátodo. Las membranas anionicas son selectivas a los aniones, permiten el paso de los aniones de una celda hacia otro celda, como consecuencia lo que lleva al agotamiento de iones obteniéndose una cámara diluida.

Se proporcionan espaciadores entre las membranas para dirigir el flujo de solución (Farrell et al, 2003). Una unidad repetitiva en una pila ED se llama par de células y comprende las dos membranas y espaciadores mencionados anteriormente para soluciones de diluido y concentrado. La Figura 4.3 muestra una celda de electrodiálisis con una solución de alimentación que fluye a través de la célula.

FIGURA N°4.3
ESQUEMA DE UN SISTEMA DE ELECTODIALISIS



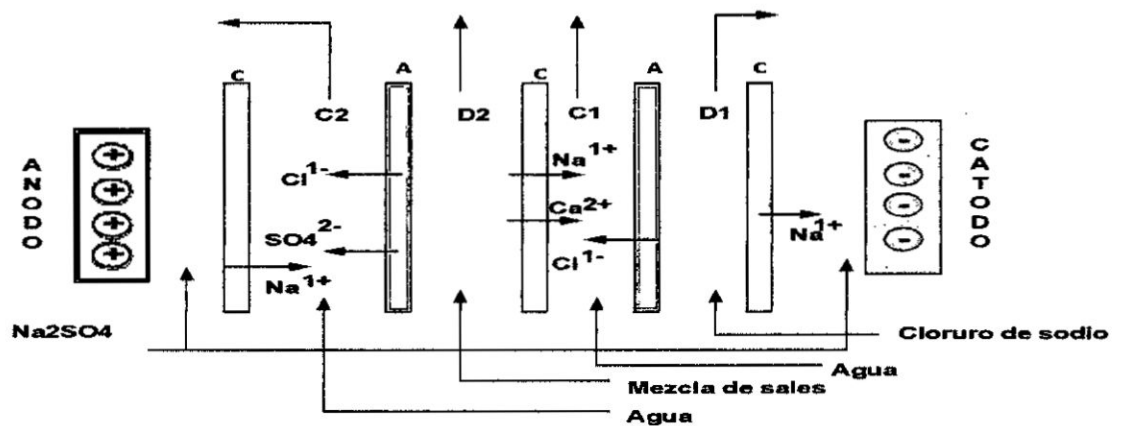
Fuente: Elaboración Propia

4.3. Electrodialisis metátesis (EDM)

Es una modificación del proceso de electrodiálisis estándar, la unidad repetitiva está formada de cuatro compartimentos dos de dilución (alimentación y cloruro de sodio) y dos de concentración (mezcla de sales de sodio y de cloruro). A diferencia de la electrodiálisis convencional, la configuración de EDM está diseñada para separar los cationes y aniones de la salmuera en dos corrientes concentradas de sales altamente solubles; una corriente que contiene iones sodio con aniones y la otra corriente que contiene iones cloruro con cationes. De esta manera, las sales poco solubles como CaSO_4 , MgSO_4 o CaCO_3 no se producen en ninguna de las dos corrientes de concentrado. Una vez que la mezcla de sales ha sido tratada mediante EDM, las dos corrientes de concentrado pueden ser mezcladas con la obtención de

compuestos valiosos y alcanzar una desalinización de descarga cero (ZLD).

FIGURA N° 4.4
ESQUEMA DE UNA CELDA DE ELECTRODIALISIS METATESIS



A: Membrana de intercambio aniónico C: Membrana de intercambio catiónico
D1, D2: Solución diluida C1, C2: Solución Concentrada

Fuente: Elaboración Propia

4.4. Configuraciones de las celdas

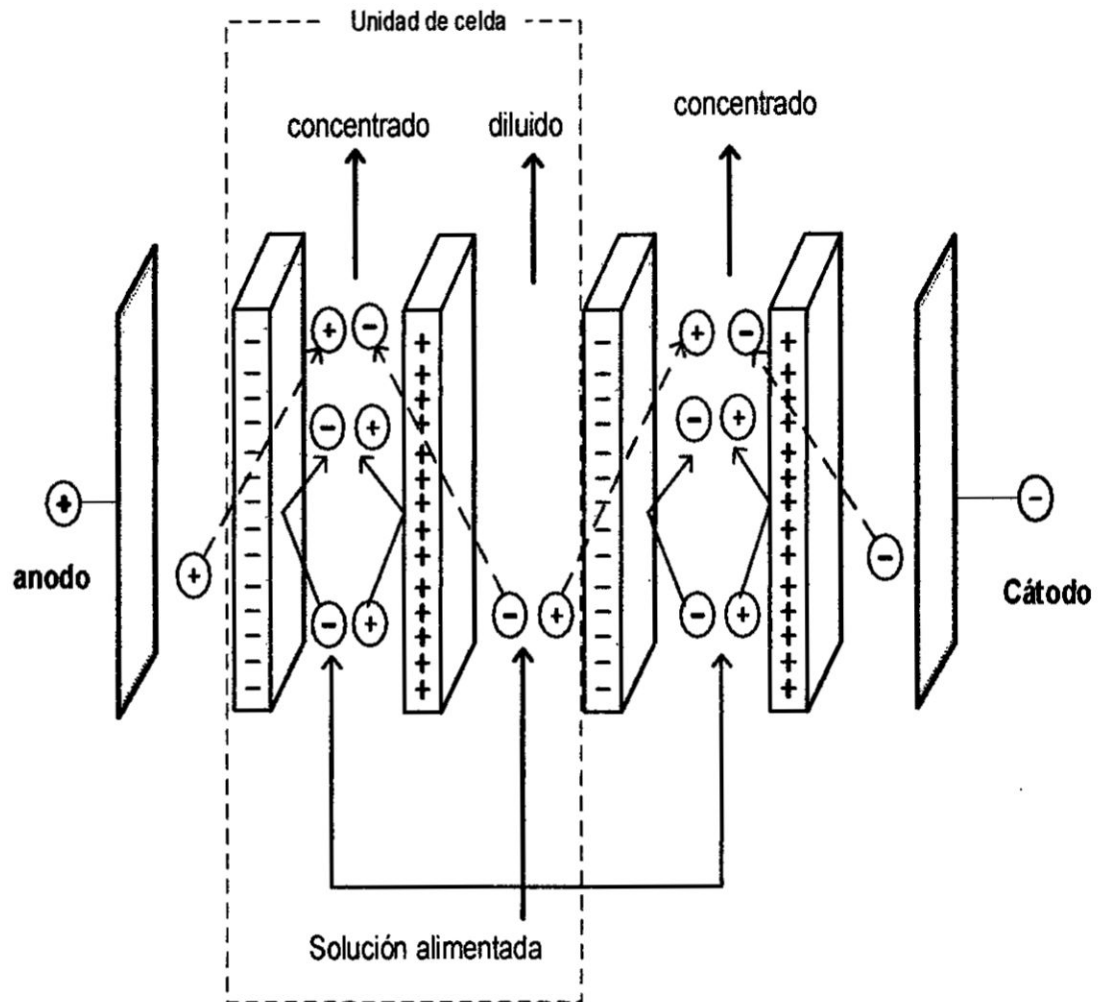
Un módulo de electro membrana está formado por un conjunto de células unitarias apiladas entre dos electrodos en una configuración similar a la de un filtro prensa. existen 3 tipos de configuraciones:

4.4.1. Electrodiálisis estándar con dos compartimientos

Está formado por dos compartimentos construida por una serie de membranas anionicas y catiónica, generalmente se utiliza en procesos de desalinización



FIGURA N°4.5
ESQUEMA DE UNA CELDA DOS COMPARTIMENTOS

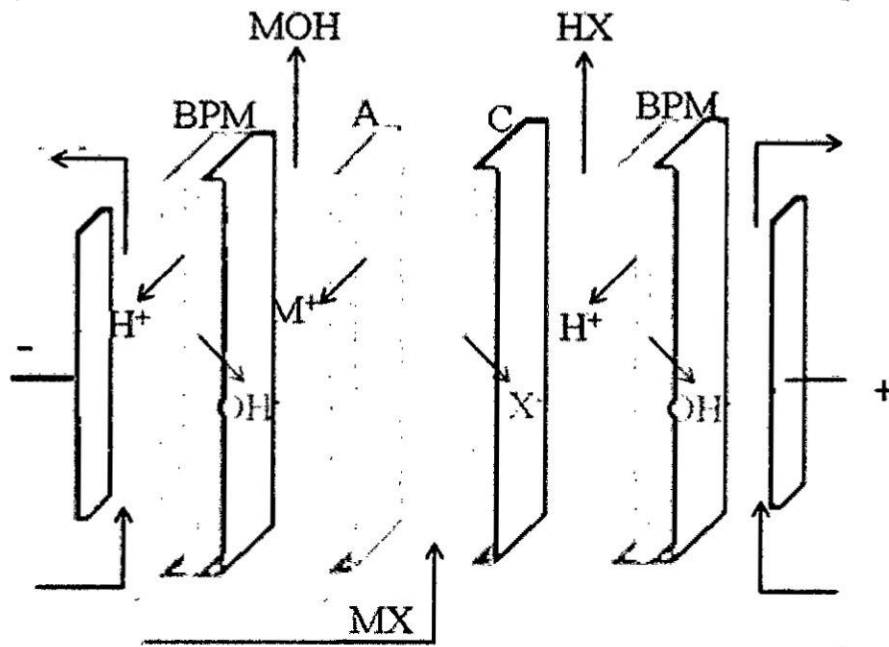


Fuente: Elaboración Propia

4.4.2. Electrodialisis bipolar (ED-B) contiene tres compartimentos

Membranas de intercambio iónico, se combina con las membranas bipolares y producen simultáneamente ácidos y las bases a partir de las sales correspondientes

FIGURA N°4.6
ESQUEMA DE UNA CELDA CON TRES COMPARTIMIENTOS



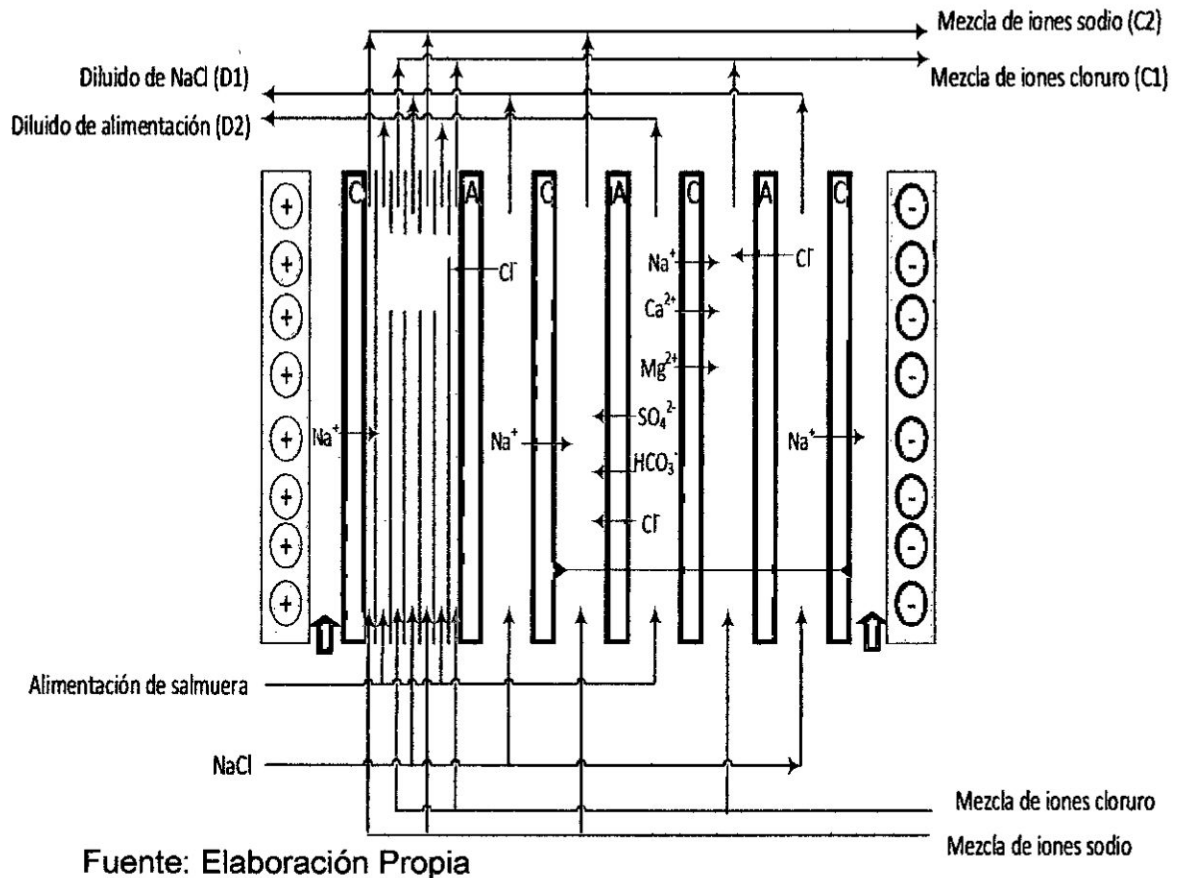
Fuente: Elaboración Propia

4.4.3. Electrodialisis metátesis(ED-M) contiene cuatro compartimientos

Equivalen a cuatro compartimientos. Cada célula está constituida por una membrana de intercambio catiónico y una membranas de intercambio aniónico.

Se utilizan para realizar reacciones de doble descomposición (la combinación iónica de dos compuestos da lugar a dos nuevos):

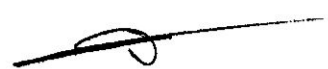
FIGURA N°4.7
ESQUEMA DE UNA CELDA CON CUATRO
COMPARTIMIENTOS



4.5. Elementos de la electrolisis metátesis

4.5.1. Membranas de intercambio iónico

Son láminas sintéticas generalmente constan de una estructura polimérica de la cual penden grupos intercambiadores de iones, cargados negativamente en las membranas de intercambio catiónico y positivamente en las

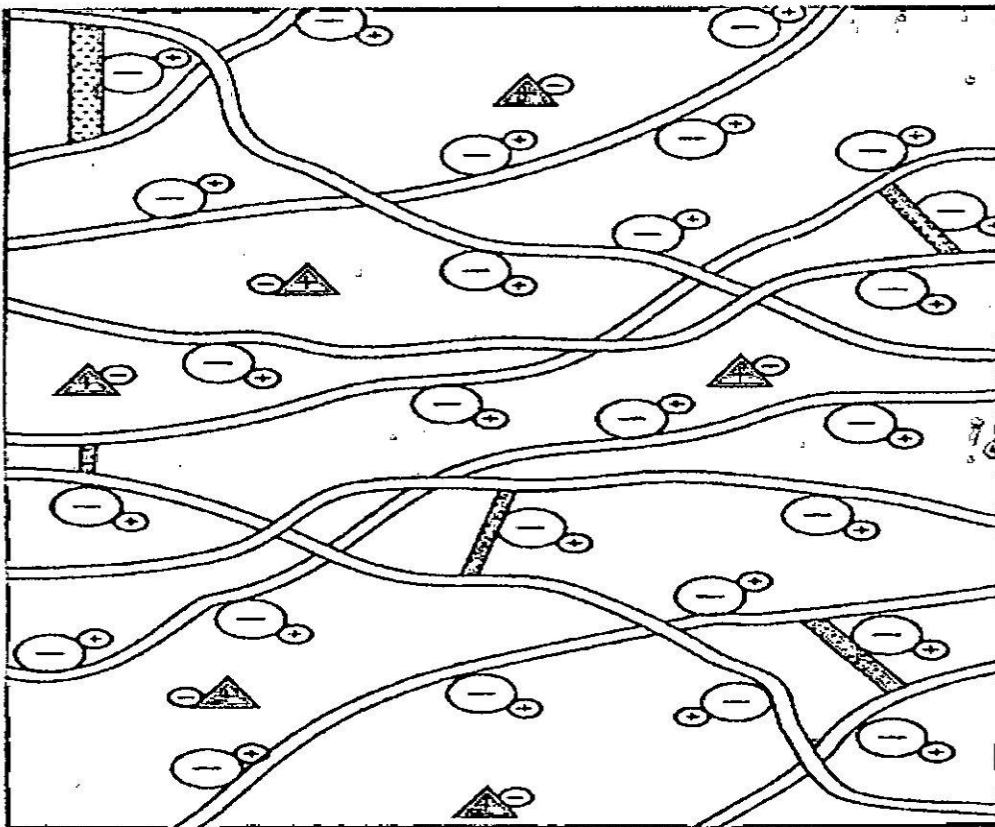


membranas de intercambio aniónico. Los grupos intercambiadores más usuales en las membranas son:

CATIÓNICAS: Sulfonato ($-SO_3^-$) y carboxilato ($-COO^-$)

ANIÓNICAS: amonio cuaternario (NR_3^+)

FIGURA N°4.8
ESQUEMA DE UNA MEMBRANA



Fuente: Elaboración Propia

4.5.2. Propiedades de Membranas de intercambio iónico

Las principales propiedades a considerar al seleccionar una membrana de intercambio iónico son:

- **Selectividad Iónica**

Es la capacidad que tienen las membranas de dejar pasar o discriminar un ion según la carga.

- **Estabilidad Química**

Estabilidad a cambios de pH, presencia de disolventes orgánicos y agentes oxidantes.

- **Resistencia Mecánica**

Alta resistencia mecánica y una escasa variación de sus dimensiones como consecuencia de las fuerzas que deben soportar.

- **Resistencia Eléctrica**

La resistencia eléctrica es uno de los factores que determinan los requerimientos de energía de los procesos de electrodiálisis (Strathmann 1992). Es de suma importancia con el objeto de minimizar el consumo de energía.

- **Resistencia Térmica**

Las membranas perforadas son estables hasta 100°C, mientras que las no perforadas comerciales, en general no pueden trabajar a temperaturas superiores a los 60°C.

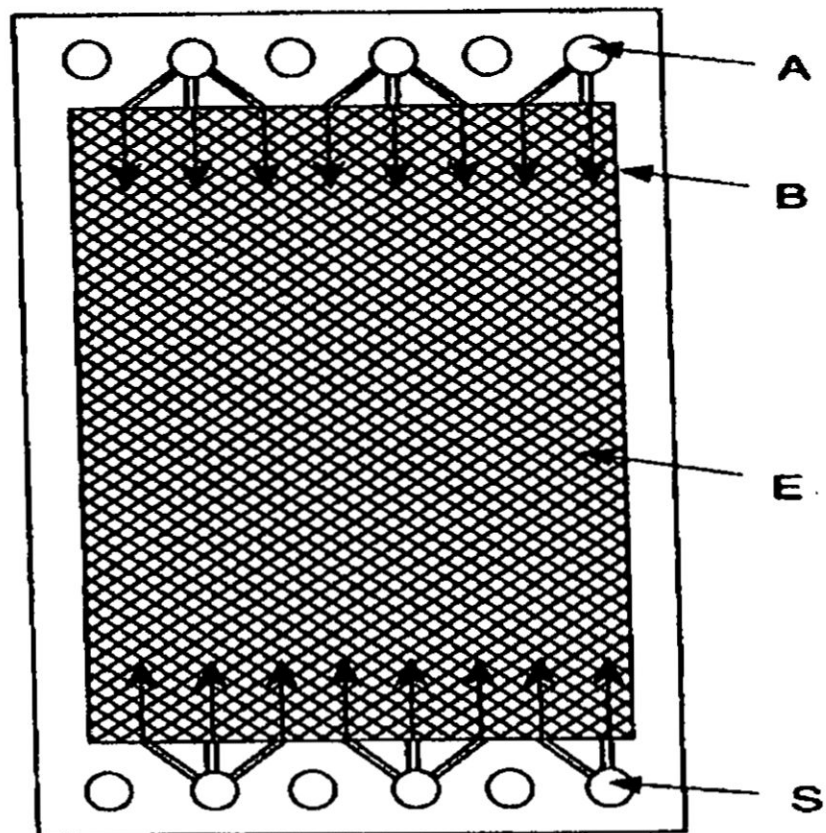
4.5.3. Espaciadores

Son materiales no conductores eléctricos generalmente plásticos (polietileno, polipropileno, teflón) en forma de malla que se colocan entre cada par de membranas.

Dentro la función es de proporcionar los canales de flujo de las soluciones para la entrada, salida de las celdas, actuar de promotores de turbulencia, controlar la distribución de flujo, sellar las celdas para evitar fuga de las soluciones y soportar las membranas de intercambio eléctrico.

En la figura N° 4.9 se indica las partes de la membrana A: entrada de las soluciones, B: líneas de flujo , E : malla espaciadora , S: salida de la solución

**FIGURA N°4.9
ESQUEMA DE UN ESPACIADOR**



Fuente: Elaboración Propia

4.5.4. Electroodos

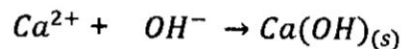
El papel de los electrodos se limita a la de proporcionar el campo eléctrico necesario para que se produzca el proceso.

Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que como consecuencia de dichas reacciones en el:

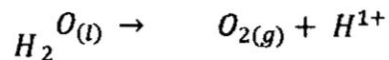
CÁTODO se genera hidrógeno y un ambiente básico. La existencia de iones metálicos en la disolución que alimenta el cátodo puede dar lugar a la precipitación de hidróxidos metálicos que se depositen sobre la membrana y el electrodo provocando su deterioro. Para evitar esto: se acidifica el compartimento catódico, la reacción se indica en la ecuación



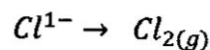
Presencia de iones metálicos como el ion calcio



En el ÁNODO se genera oxígeno a partir de descomposición del agua y/o cloro (si existen cloruros en la disolución) y un ambiente ácido.



Presencia de iones cloruro



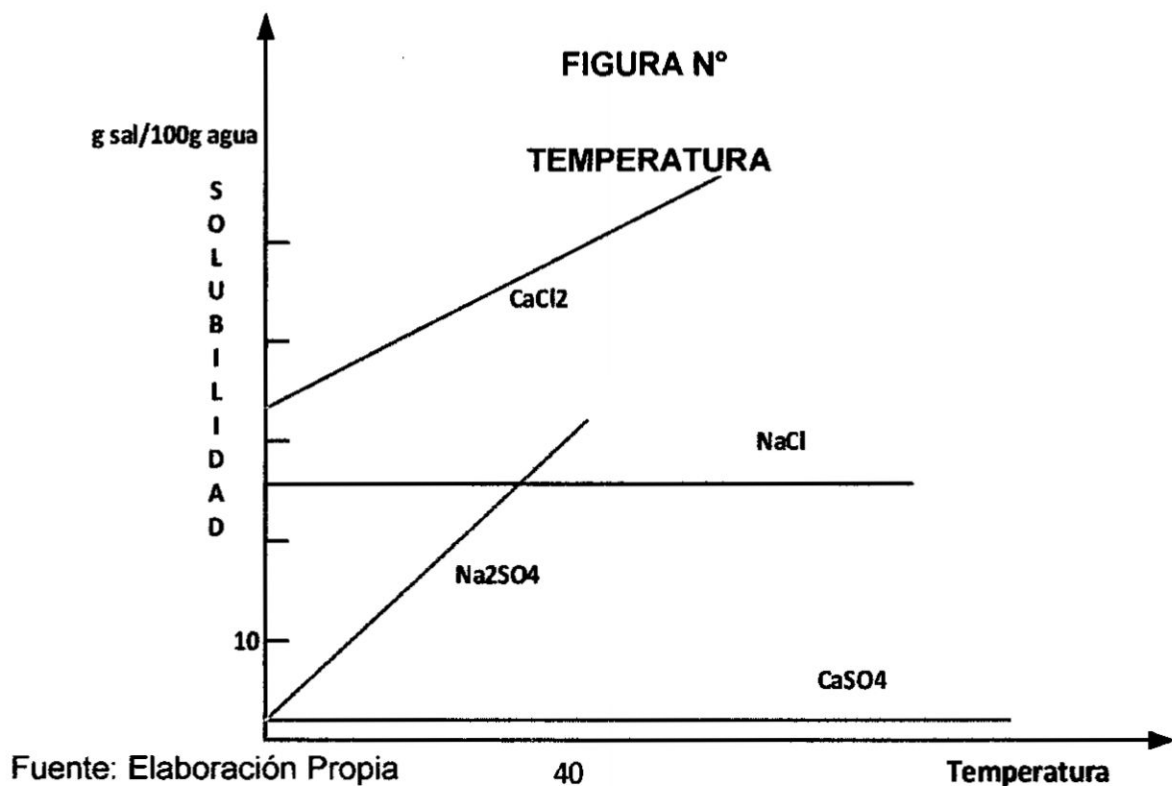
Generalmente como cátodo se utilice acero inoxidable y como ánodo titanio o titanio platinado.

Pt/Ti y Pt/Nb en la electrodiálisis reversible

4.5.5. Solubilidad de sales en agua

Corresponde a la cantidad máxima sales que se puede disolver, generalmente en 100 g de agua a una determinada temperatura. En la figura se muestra las curvas de solubilidad de algunas sales inorgánicas. El cloruro de calcio y sulfato de sodio muestran un gran aumento de la solubilidad con la temperatura. Mientras el cloruro de sodio y sulfato de calcio exhiben una solubilidad bastante independiente de la temperatura.

FIGURA N°4.10
SOLUBILIDAD DE SALES EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA



Fuente: Elaboración Propia

40

Temperatura

4.5.6. Indicadores del proceso de electrodiálisis metátesis

1) Eficiencia de corriente eléctrica

La eficiencia de corriente eléctrica se ha evaluado mediante la ecuación

$$\epsilon = \frac{(C_t V_t - C_0 V_0) Z F}{N I t} \times 100\%$$

Donde C_t y C_0 concentración en el tiempo t y concentración inicial F constante e Faraday (96 500 C), t es el tiempo de operación del equipo, I es la corriente eléctrica en (A)

2) Consumo de energía

El consumo de energía fue calculado mediante la ecuación

$$E = \frac{\int_0^t U_t I dt}{M C_t V_t}$$

Donde E (KW-h/kg), U_t potencial eléctrico (V), I intensidad eléctrica (A) t tiempo(s), M peso formula del NaCl , C_t concentración de NaCl en el tiempo t , V_t volumen en el tiempo t

3) Porcentaje de desalinización

El porcentaje de desalinización (%) es evaluado mediante la ecuación

$$\%S = \frac{\delta_0 - \delta_t}{\delta_0} \times 100$$

%S es el porcentaje de desalinización y δ_0 , δ_t es la conductividad (ms/cm) en el tiempo cero y tiempo t en min

4) El porcentaje de volumen

Es el volumen recuperado de agua es determinado mediante la ecuación

$$\eta = \frac{V_0}{V_t} \times 100\%$$

V_0 y V_t es el volumen en (mL) en el tiempo cero y tiempo t en min

4.5.7. Diseño Factorial

En tiempos pasados, los factores fueron estudiados uno a la vez, con experimentos separados dedicado a cada factor. En el diseño factorial, el investigador efectúa todas las combinaciones posibles de los factores y niveles de los factores seleccionados, y el experimentador está interesado en conocer los efectos principales y los efectos de interacción entre los diferentes factores. La metodología de diseño experimental factorial implica cambiar todas las variables de un experimento al siguiente. La razón de esto es que las variables pueden influir mutuamente, y el valor ideal para una de ellas puede depender de los valores de las otras. Esta interacción entre variables es un fenómeno frecuente. El diseño factorial 2^3 significa que se está estudiando tres factores a dos niveles para cada factor, como resultado se tiene 8 experimentos que se muestra en la tabla N4.1

TABLA N° 4.1
MATRIZ DE EXPERIMENTACIÓN

N° de experimentos	Factor			Respuesta Y
	X ₁	X ₂	X ₃	
1	-	-	-	Y ₁
2	+	-	-	Y ₂
3	-	+	-	Y ₃
4	+	+	-	Y ₄
5	-	-	+	Y ₅
6	+	-	+	Y ₆
7	-	+	+	Y ₇
8	+	+	+	Y ₈

Fuente: Elaboración Propia



V. MATERIALES Y METODOS

5.1. Materiales y equipos

5.1.1. Membranas

En el experimento se usó membranas de intercambio catiónico y intercambio aniónico que fueron adquiridos de la compañía Fumatech, Alemania

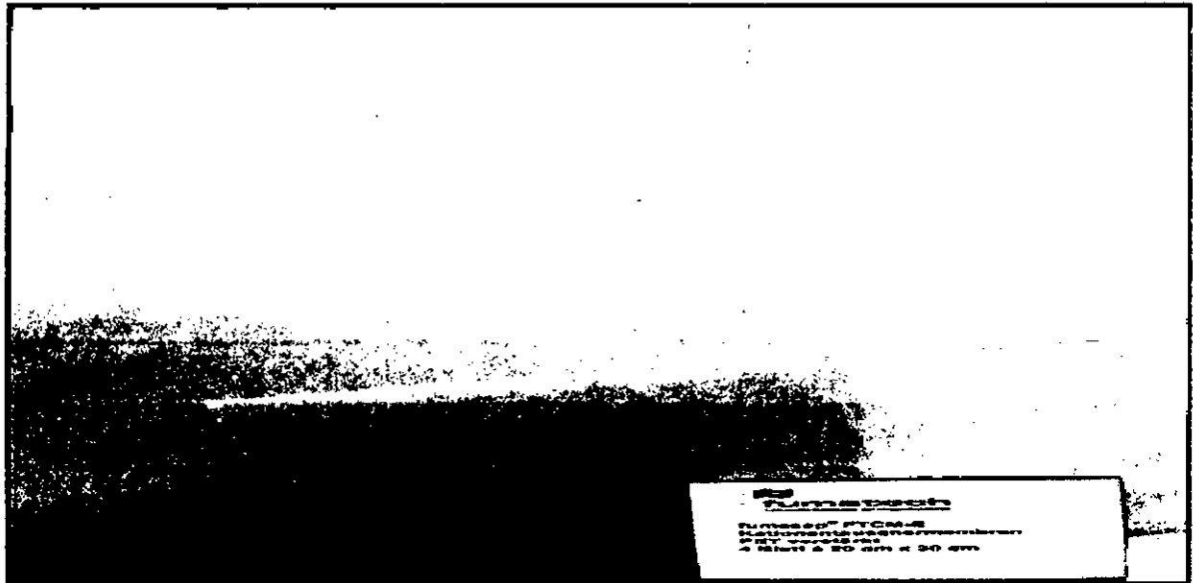
- a) Membranas de intercambio catiónico FTCM
- b) membranas de intercambio aniónica FTAM-E

TABLA N° 5.1
CARACTERISTICAS DE LAS MEMBRANAS

Características	Unidad	Membrana catiónica	Membrana aniónica
Resistencia eléctrica	Ω /cm^2	2,5 -3,5	2,5 -3,5
capacidad de intercambio	$\frac{m - eq}{g \text{ de mem}}$	1,5 – 1,8	1,4 – 1,7
Espesor	<i>mm</i>	0,17 – 0,19	0,16 – 0,198

Fuente: Elaboración Propia

FIGURA N° 5.1
MEMBRANA DEINTERCAMBIO CATIÓNICA Y ANIONICA



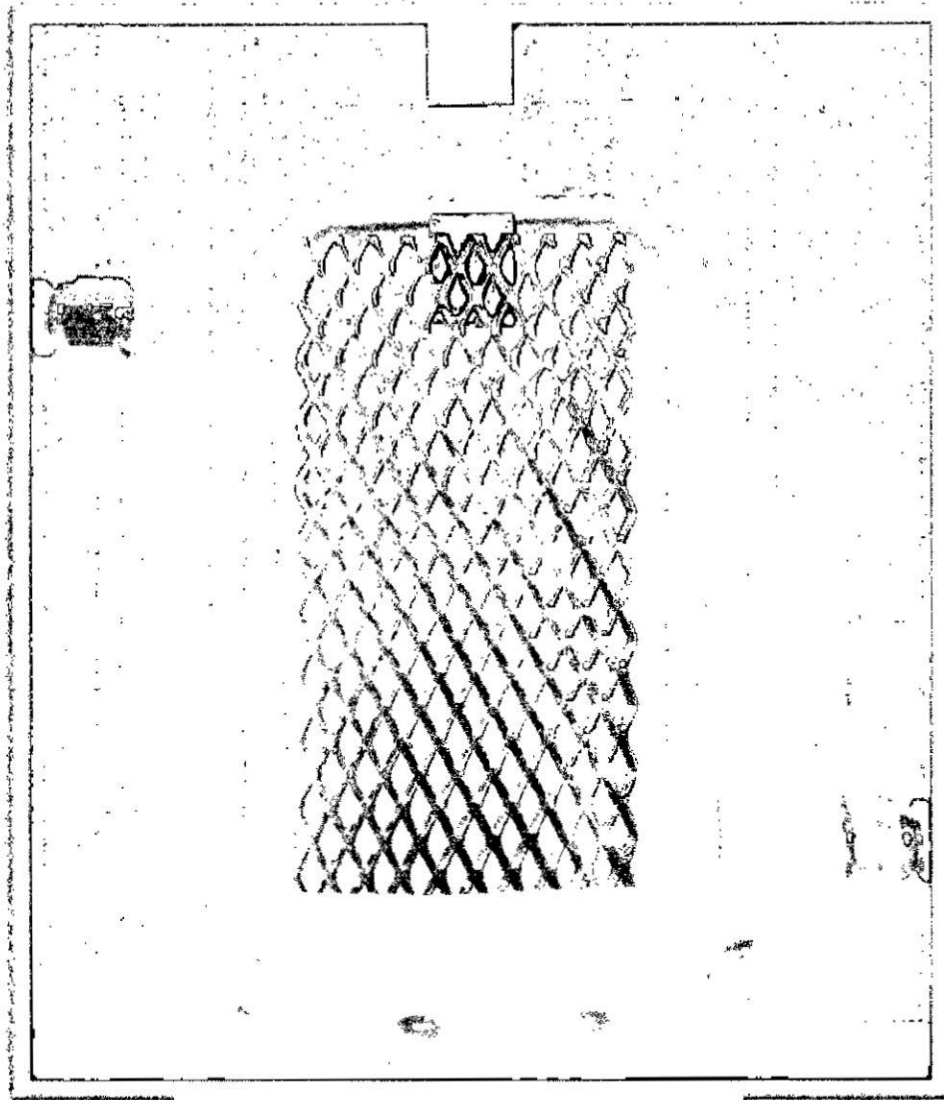
Fuente: Elaboración Propia

5.1.2. Electrodo

Los electrodos (ánodo y cátodo) están formados por dos placas rectangulares de área 50cm^2 de material de titanio platinado los cuales contiene una barra cilíndrica conectar los bornes de la fuente de alimentación como se indica en la figura N° 5.1



FIGURA N° 5.2
ELECTRODO TITANIO PLATINADO

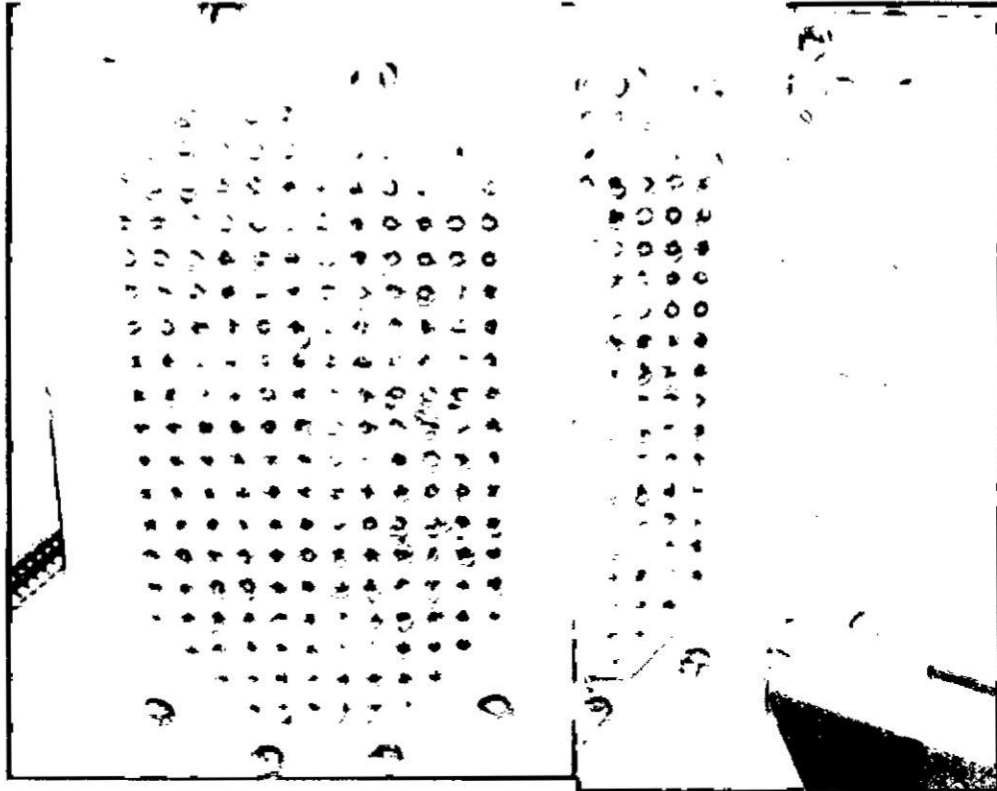


Fuente: Elaboración Propia

5.1.3. Espaciadores

Los espaciadores utilizados en la construcción del equipo experimental, fueron construidos de material polipropileno, tiene las dimensiones de 10x15 cm con cuatro perforaciones en el fondo y tope para el ingreso de las corrientes de las soluciones como se muestran en la FIGURA N° 5.2

FIGURA N° 5.3
ESPACIADORES DE POLIPROPILENO

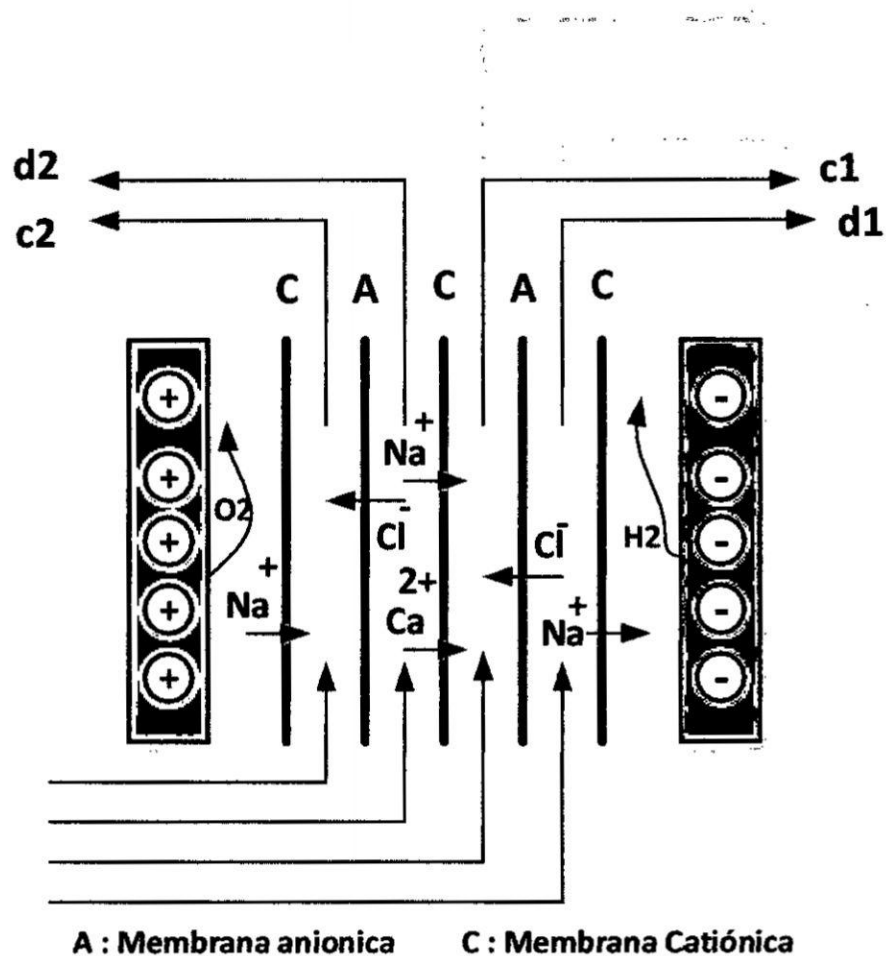


Fuente: Elaboración Propia

5.5.4. Configuración de la Celda de Electrodialisis metátesis

En la Fig. N°3.1 se muestra la disposición de las membranas de intercambio iónico, cuya representación corresponde a (C + A+ C +A+ C), configuración que nos permite que se formen cuatro compartimentos (dos celdas diluidas d 1, d2) y dos celdas concentradas (c1, c2) y dos cámaras de lavado de electrodos.

FIGURA N° 5.4
CONFIGURACION DE LAS MEMBRANAS



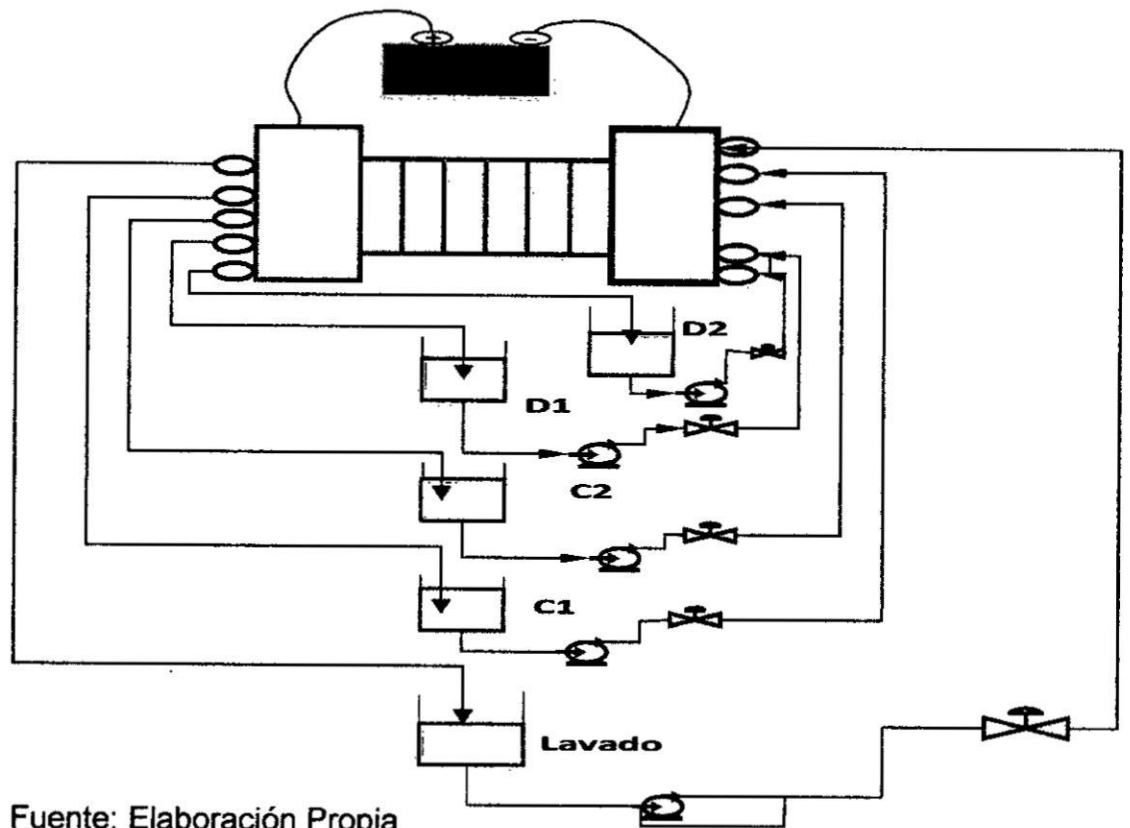
Fuente: Elaboración Propia

5.1.5. Equipo experimental

El equipo de electrodialisis metátesis contiene 3 membranas catiónicas y 2 membranas aniónicas, distribuidas en forma alterna, que producen dos corrientes diluidas (d1 y d2) y 2 dos corrientes concentradas (c1 y c2) y una corriente de lavado de electrodos. El módulo cuenta con 5 recipientes de material acrílico de 1,2 L de

capacidad, 5 bombas que alimentan las soluciones hasta la celda de electrodiálisis como se indica en la figura N° 4.1

Figura N° 5.5
DIAGRAMA DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

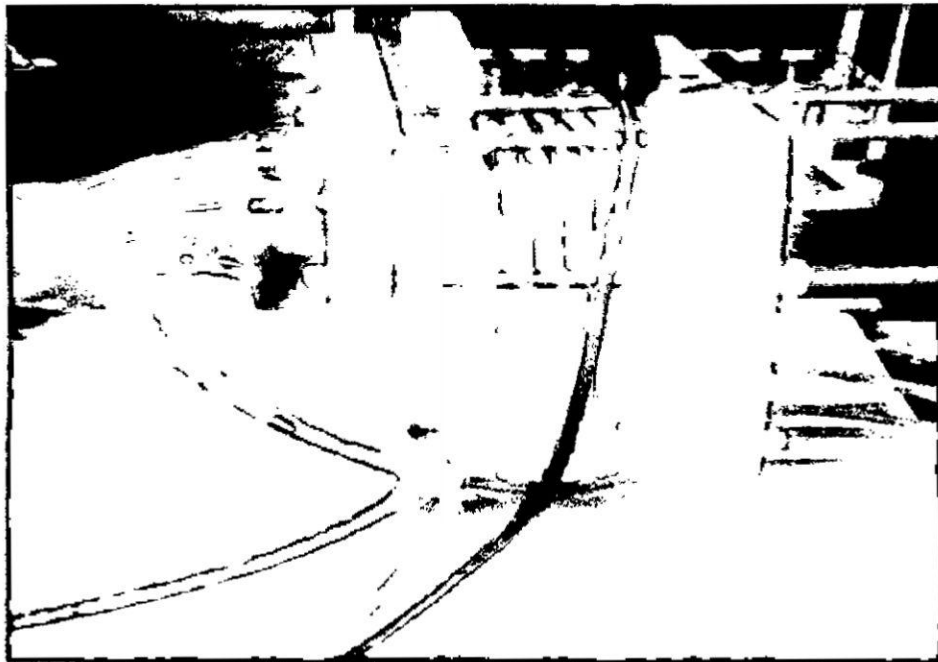


5.1.6. Descripción de la Celda de electrodiálisis metátesis

La celda de electrodiálisis metátesis (ED-M) es de forma filtro prensa con cuatro compartimientos, fue construido con material de polipropileno sobre el que se ensamblan las membranas catiónicas y aniónicas, cada membrana

contiene un promotor de turbulencia en forma de malla de material de polipropileno, juntas de jebe fueron colocadas entre cada promotor de turbulencia y membrana. La celda presenta dos placas de polipropileno en los extremos cada una con cuatro entradas y cuatro salidas para el flujo de las soluciones. Estas placas permite sellar y mantener la distribución uniforme de flujo dentro de las celdas y esta afianzado con 8 barras transversales con tuercas para prevenir fuga, mezclado o derrame del líquido como se muestra en la Fig. N° 3.2. Las placas exteriores, contiene dos marcos de polipropileno de 1,5 cm de espesor, en la que se insertan los electrodos, cada uno con una entrada y salida por donde ingresa la solución de lavado de los electrodos

FIGURA N° 5.6
EQUIPO EXPERIMENTAL



Fuente: Elaboración Propia

5.1.7. Metodología de la experimentación

Mezcla de sales (NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 y Na_2SO_4) ingresa la celda de electrodiálisis metátesis por la corriente (D2) impulsada por una bomba de un recipiente de acrílico que contiene 0,8 L de solución. Se utilizó una tubería de silicona para recircular la solución de salmuera de manera uniforme incorporado una válvula para regular el flujo en cada experiencia. Mientras que solución diluida de cloruro de sodio se alimentó por la corriente (D1) mediante una bomba desde 0,8 L de solución.

Las corrientes de C1 y C2 que contiene solución de cloruro e sodio inicialmente diluida es impulsada por 2 bombas a partir de 0,8 L de solución.

Por la corriente de lavado ingresa una solución de NaSO_4 en los compartimientos de anódico y catódico y recircula al mismo recipiente

Para analizar la conductividad se recoge muestras de cada tanque en forma simultáneamente y se regresa después de los análisis para evitar ciertas variaciones de volumen del recipiente.

Después de cada prueba, la configuración se lavó minuciosamente con agua destilada, el tiempo de ejecución de las pruebas fue de 300 minutos, se empleó una fuente de alimentación de corriente directa donde se visualiza en forma directa la corriente eléctrica. La concentración de iones cloruro se determinaron mediante

valoración con nitrato de plata. Se realizó la medida de conductividad y intensidad de corriente para cierto intervalo de tiempo durante 5 horas de experimentación.


5.2. Población de la Investigación

Para el desarrollo de las pruebas experimentales se ha preparado soluciones sintéticas semejantes a los concentrados de equipos desalinizadores, considerando de agua de mar y agua salobre en la tabla N° 5.2 se indica la caracterización físico química de los concentrados.

TABLA N° 5.2
CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA

N°	Parámetro	Tipo 1	Tipo II
1	Concentración (g/L)	5	25
2	pH	6,9	7,2
3	Conductividad (ms/cm	10,2ms/cm	35,2 ms/cm
4	Solidos totales disueltos STD. (mg/L)	4 800	19 200

Fuente: Elaboración Propia



5.2.1. Diseño Experimental

Para el desarrollo de las pruebas experimentales las variables independientes y niveles se muestran en la Tabla N° 5.3 se ha estudiado mediante la combinación de los parámetros de operación a dos niveles mediante el diseño factorial.

**TABLA N°5.3
PARÁMETROS Y NIVELES**

N°	Parámetros	Unidad	Notación	Niveles	
				Menor	Mayor
1	Potencial eléctrico	V	X_1	5	16
2	Flujo	mL/min	X_2	100	300
3	Concentración de sales	g/L	X_3	5	25

Fuente: Elaboración Propia

Variables dependientes

- Porcentaje de desalinización
- Eficiencia de corriente eléctrica

Variables no intervinientes

- Concentración inicial del tanque de lavado(0,2 M de sulfato de sodio)
- Concentración inicial de los compartimientos de concentrado (C1 y C2 igual 0,2 g/ NaCl)
- Concentración inicial de D1 es de 0,1 N

5.2.2. Matriz de experimentación

TABLA N° 5.4
MATRIZ DE EXPERIMENTACIÓN

N°	Potencial Eléctrico	flujo	Concentración de salmuera	Conductividad (d2)	Eficiencia de corriente
1	Nivel bajo	Nivel bajo	Nivel bajo	Y ₁	E ₁
2	Nivel alto	Nivel bajo	Nivel bajo	Y ₂	E ₂
3	Nivel bajo	Nivel alto	Nivel bajo	Y ₃	E ₃
4	Nivel alto	Nivel alto	Nivel bajo	Y ₄	E ₄
5	Nivel bajo	Nivel bajo	Nivel alto	Y ₅	E ₅
6	Nivel alto	Nivel bajo	Nivel alto	Y ₆	E ₆
7	Nivel bajo	Nivel alto	Nivel alto	Y ₇	E ₇
8	Nivel alto	Nivel alto	Nivel alto	Y ₈	E ₈

Fuente: Elaboración Propia

5.3. Procedimiento de análisis de datos de la desalinización

Con el fin de monitorizar la desalinización en la experimentación, se ha utilizado un conductímetro es necesario determinar la cantidad de ácido acético sin reaccionar a intervalos de tiempo apropiados. La mezcla de reacción se puede monitorizar utilizando un método de titulación



5.3.1. Análisis y procesamiento de datos

El análisis estadístico de los resultados de las pruebas experimentales se efectuaron mediante el software Minitab, mediante su aplicación se obtuvieron gráficas, diagramas y la obtención de la regresión de los factores en estudio respecto al porcentaje de desalinización

5.3.2 Técnicas de Análisis

Para la presentación de resultados, se ha usado software Excel y minitab como resultado se ha obtenido gráficas y tablas.



VI. RESULTADOS

6.1. Conductividad en función del tiempo

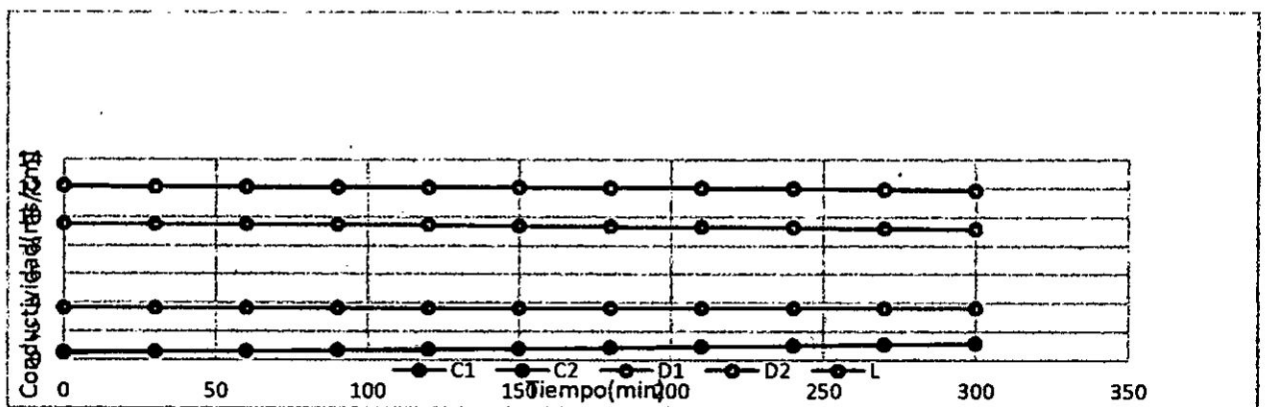
En este capítulo se presenta los resultados en tablas y graficas de la evolución de conductividad en función del tiempo de los compartimientos de las celdas de concentrados (C1 y C2), diluidas (D1 y D2).

TABLA N° 6.1
CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO A LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN. $X_1 = 5$ VOLTIOS $X_2 = 150$ ML/ MIN. Y $X_3 = 5$ G/L

N°	Tiempo(min)	C1	C2	D1	D2	L	I
1	0	0.48	0.54	9.56	12.2	3.66	0.01
2	30	0.58	0.57	9.52	12.15	3.66	0.01
3	60	0.63	0.62	9.51	12.13	3.66	0.02
4	90	0.69	0.68	9.48	12.1	3.66	0.02
5	120	0.75	0.74	9.47	12.09	3.66	0.02
6	150	0.82	0.81	9.42	12.08	3.66	0.02
7	180	0.89	0.88	9.38	12.06	3.66	0.02
8	210	0.96	0.95	9.33	12.04	3.66	0.02
9	240	1.04	1.03	9.3	12	3.66	0.03
10	270	1.1	1.1	9.22	11.93	3.66	0.03
11	300	1.19	1.19	9.19	11.88	3.66	0.03

Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N°6.1
CONDUCTIVIDAD COMPARTIMIENTOS - TIEMPO



Fuente: Elaboración Propia

TABLA N° 6.2

CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO A LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN. $X_1 = 16$ VOLTIOS $X_2 = 150$ ML/ MIN. Y $X_3 = 5$ g/L

N°	Tiempo (min)	C1	C2	D1	D2	L	i
1	0	0.5	0.53	21.3	9.98	2.51	0.05
2	30	0.537	0.536	21.1	9.63	2.51	0.11
3	60	0.813	0.781	20.9	9.37	2.51	0.14
4	90	1.088	1.041	20.3	9.31	2.51	0.17
5	120	1.428	1.384	20.7	8.81	2.51	0.2
6	150	1.826	1.77	20.5	8.65	2.51	0.22
7	180	2.27	2.15	20.4	8.45	2.51	0.24
8	210	2.68	2.56	20.3	8.09	2.51	0.25
9	240	3.09	3.16	19.86	7.54	2.51	0.26
10	270	3.5	3.57	19.45	7.25	2.51	0.28
11	300	3.89	3.94	19.03	6.77	2.51	0.29

Fuente: Elaboración Propia **GRAFICA N°6.2**

CONDUCTIVIDAD COMPARTIMIENTOS – TIEMPO

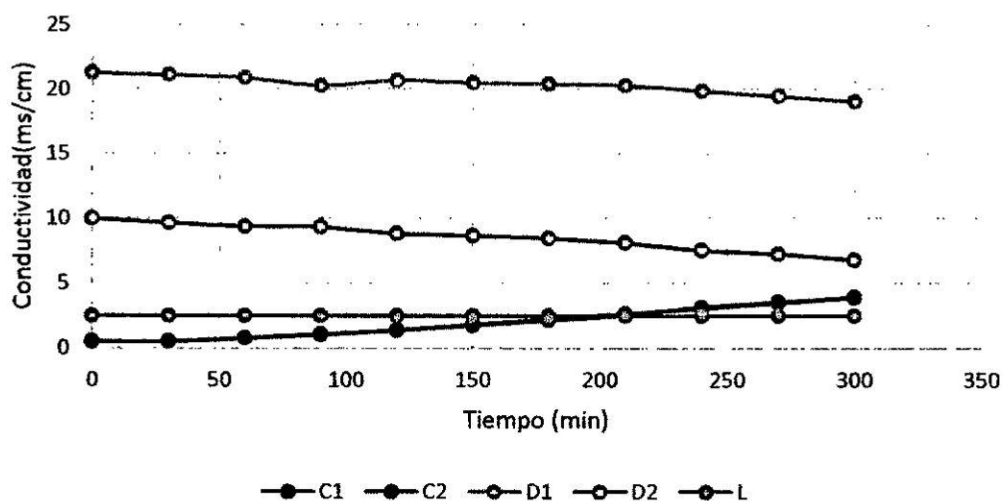


TABLA N° 6.3

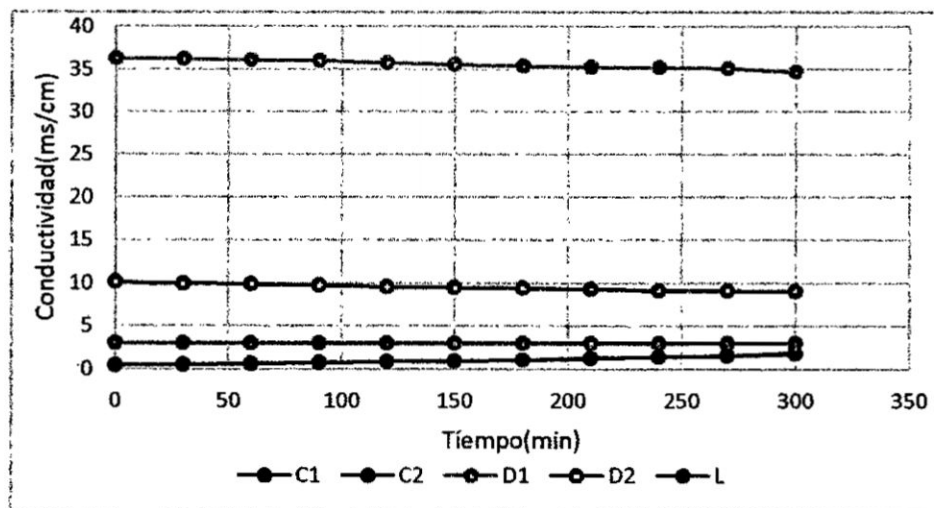
CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO A LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN. $X_1 = 5$ VOLTIOS $X_2 = 300$ ML/ MIN. Y $X_3 = 5$ g/L

N°	Tiempo (min)	C1	C2	D1	D2	L	I
1	0	0.423	0.429	36.3	10.13	3.04	0.05
2	30	0.547	0.517	36.2	9.98	3.04	0.06
3	60	0.654	0.62	36.1	9.89	3.04	0.07
4	90	0.75	0.742	36	9.77	3.04	0.08
5	120	0.909	0.869	35.8	9.61	3.04	0.09
6	150	0.945	0.966	35.6	9.51	3.04	0.1
7	180	1.112	1.108	35.4	9.44	3.04	0.1
8	210	1.312	1.272	35.3	9.32	3.04	0.11
9	240	1.483	1.464	35.2	9.17	3.04	0.11
10	270	1.635	1.614	35.1	9.12	3.04	0.12
11	300	1.871	1.832	34.7	9.05	3.04	0.13

Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N°6.3

CONDUCTIVIDAD COMPARTIMIENTOS – TIEMPO



Fuente: Elaboración Propia

TABLA N° 6.4

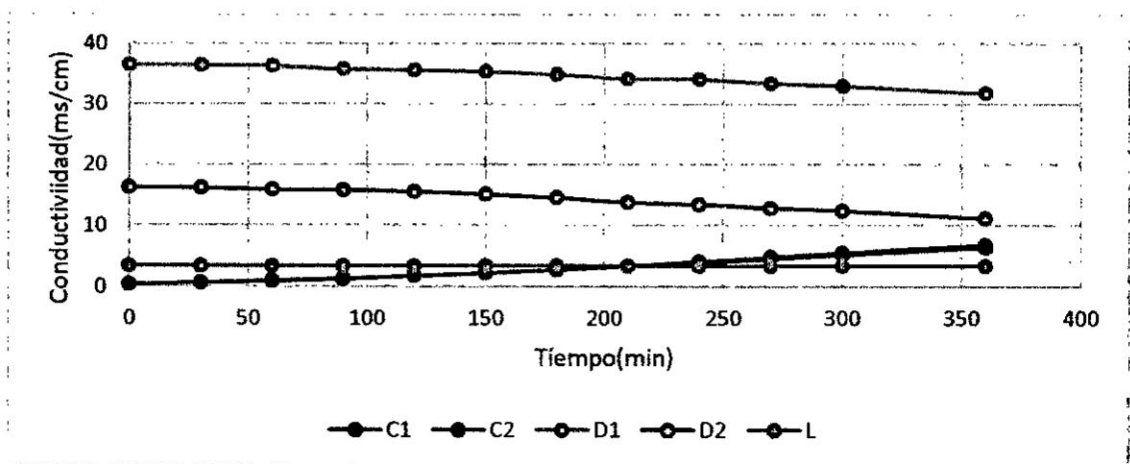
CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO A LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN. $X_1 = 16$ VOLTIOS $X_2 = 300$ ML/ MIN. Y $X_3 = 5$ G/L

N°	Tiempo (min)	C1	C2	D1	D2	L	I
1	0	0.357	0.362	36.5	16.27	3.4	0.08
2	30	0.668	0.61	36.4	16.15	3.4	0.12
3	60	0.941	0.893	36.3	15.96	3.4	0.16
4	90	1.305	1.27	35.8	15.79	3.4	0.2
5	120	1.774	1.752	35.6	15.58	3.4	0.24
6	150	2.24	2.22	35.4	15.1	3.4	0.27
7	180	2.76	2.78	34.9	14.57	3.4	0.3
8	210	3.33	3.39	34.2	13.81	3.4	0.33
9	240	3.94	4.07	34.1	13.46	3.4	0.35
10	270	4.56	4.82	33.4	12.86	3.4	0.37
11	300	6.41	6.77	31.8	11.14	3.4	6.41

Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N°6.4

CONDUCTIVIDAD COMPARTIMIENTOS – TIEMPO



Fuente: Elaboración Propia

TABLA N° 6.5

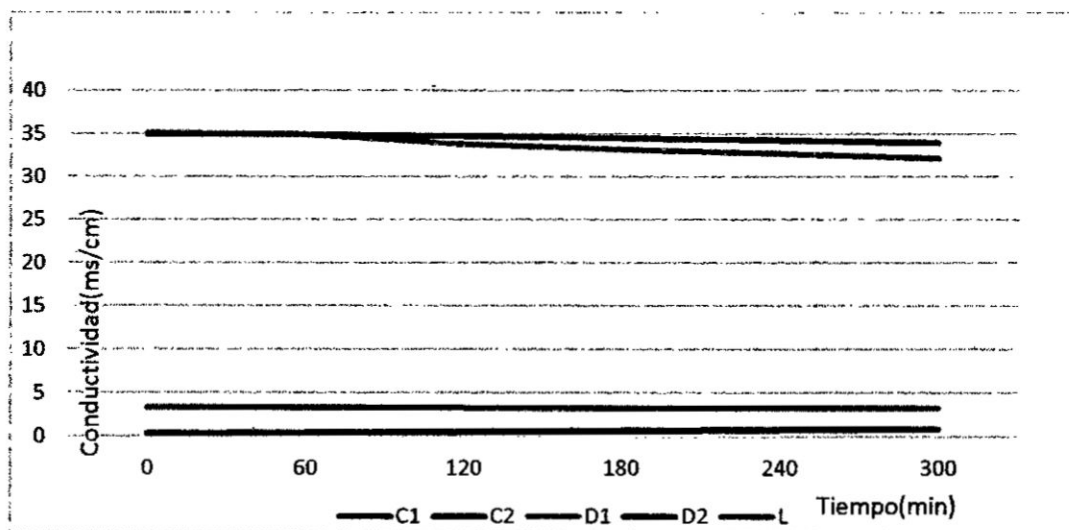
CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO A LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN. $X_1 = 5$ VOLTIOS $X_2 = 150$ ML/ MIN. Y $X_3 = 25$ G/L

N°	Tiempo (min)	C1	C2	D1	D2	L	I
1	0	0.32	0.32	35.1	35	3.26	0.01
2	60	0.42	0.41	34.9	34.9	3.26	0.02
3	120	0.513	0.47	33.8	34.7	3.26	0.03
4	180	0.634	0.648	33.2	34.5	3.25	0.03
5	240	0.756	0.777	32.7	34.2	3.25	0.03
6	300	0.87	0.865	32.1	33.9	3.26	0.03

Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N°6.5:

CONDUCTIVIDAD COMPARTIMIENTOS - TIEMPO



Fuente: Elaboración Propia

TABLA N° 6.6

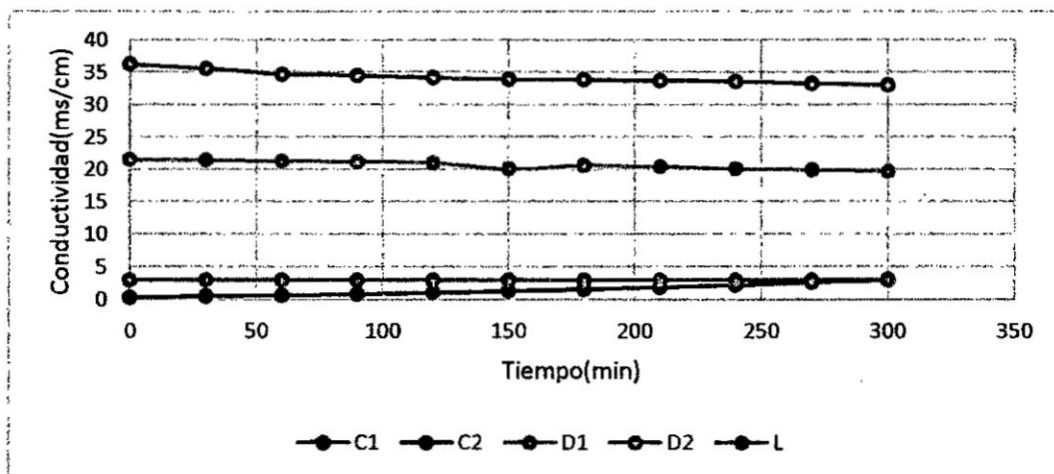
CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO A LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN. $X_1 = 16$ VOLTIOS $X_2 = 150$ ML/ MIN. Y $X_3 = 25$ G/L

N°	Tiempo (min)	C1	C2	D1	D2	L	I
1	0	0.37	0.34	21.5	36.2	3	0.05
2	30	0.547	0.5	21.4	35.6	2.98	0.06
3	60	0.695	0.643	21.3	34.7	3	0.08
4	90	0.866	0.823	21.2	34.5	3	0.1
5	120	1.1	1.062	21	34.2	3	0.12
6	150	1.3	1.332	20.08	33.9	3	0.13
7	180	1.608	1.63	20.6	33.8	3	0.15
8	210	1.92	1.91	20.4	33.7	3	0.17
9	240	2.23	2.26	20.1	33.6	3	0.19
10	270	2.64	2.64	19.98	33.3	3	0.2
11	300	3.05	2.96	19.67	33	3	0.22

Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N°6.6

CONDUCTIVIDAD COMPARTIMIENTOS – TIEMPO



Fuente: Elaboración Propia

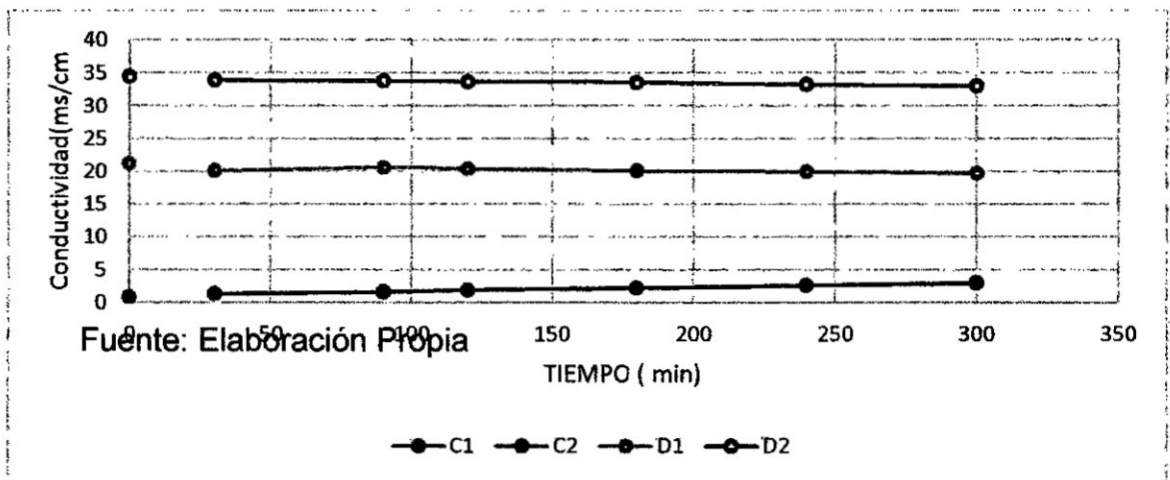
TABLA N° 6.7

CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO A LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN. $X_1 = 5$ VOLTIOS $X_2 = 300$ ML/ MIN. Y $X_3 = 25$ G/L

N°	Tiempo (min)	C1	C2	D1	D2	L	I
1	0	0.866	0.823	21.2	34.5	3	0.1
2	30	1.1	1.062	21	34.2	3	0.12
3	60	1.3	1.332	20.08	33.9	3	0.13
4	90	1.608	1.63	20.6	33.8	3	0.15
5	120	1.92	1.91	20.4	33.7	3	0.17
6	180	2.23	2.26	20.1	33.6	3	0.19
7	240	2.64	2.64	19.98	33.3	3	0.2
8	300	3.05	2.96	19.67	33	3	0.22

GRAFICA N°6.7

CONDUCTIVIDAD COMPARTIMIENTOS – TIEMPO



Fuente: Elaboración Propia

TABLA N° 6.8

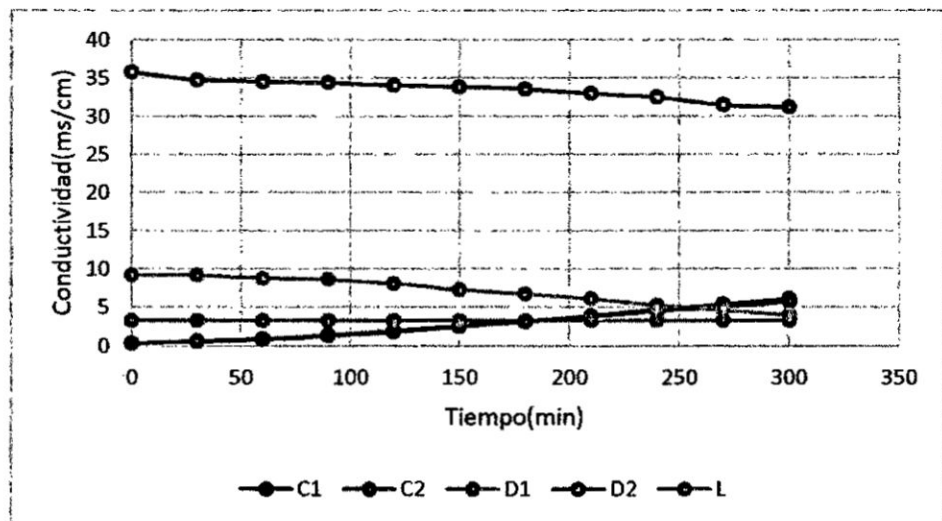
CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO A LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN. $X_1 = 16$ VOLTIOS $X_2 = 300$ ML/ MIN. Y $X_3 = 25$ G/L

N°	Tiempo (min)	C1	C2	D1	D2	L	I
1	0	0.387	0.379	9.19	35.8	3.3	0.07
2	30	0.651	0.592	9.17	34.8	3.3	0,13
3	60	0.94	0.87	8.79	34.6	3.3	0,19
4	90	1.39	1.307	8.6	34.4	3.3	0,23
5	120	1.975	1.858	8.09	34.1	3.3	0,29
6	150	2.61	2.55	7.28	33.9	3.3	0,33
7	180	3.19	3.23	6.74	33.6	3.3	0,36
8	210	3.88	3.95	6.08	33	3.3	0,37
9	240	4.56	4.75	5.29	32.5	3.3	0,38
10	270	5.12	5.4	4.7	31.5	3.3	0,38
11	300	5.74	6.09	4.02	31.2	3.3	0,38

Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N°6.8

CONDUCTIVIDAD COMPARTIMIENTOS – TIEMPO



Fuente: Elaboración Propia

6.2. Eficiencia de la desalinización

En la siguiente tabla se muestra los resultados del porcentaje de desalinización de la combinación de los tres factores en estudio a dos niveles de experimentación.

TABLA N°6.9
EFICIENCIA DE DESALINIZACIÓN

N°	X1	X2	X3	X1	X2	X3	Eficiencia de remoción (%)
1	-	-	-	5	150	5	2.66
2	+	-	-	16	150	5	32.10
3	-	+	-	5	300	5	10.66
4	+	+	-	16	300	5	31.53
5	-	-	+	5	150	25	3.14
6	+	-	+	16	150	25	8.88
7	-	+	+	5	300	25	4.34
8	+	+	+	16	300	25	12.84

Fuente: Elaboración Propia

VII. DISCUSION

7.1. Efectos de los factores de operación

1. Efecto de la concentración de alimentación

La Figura N°6.2 muestra cuando la concentración es de 5 g/L se produjo una reducción más rápida en conductividad que cuando es de 25 g/L a las mismas condiciones de potencial eléctrico y velocidad de flujo de la célula D2 . En la figura N°6.6 se observa que la conductividad de C2 también aumenta a bajas concentraciones de alimentación que en la Figura N° 6.2 que es de 25 g/L

2. Efecto de tensión aplicada

El efecto de la tensión aplicada al equipo de electrodiálisis metátesis sobre la desalinización se muestra en la figura N° 6.2 se observa que a 16 voltios alcanza una mayor variación de la conductividad con respecto al aplicar a 5 voltios a las mismas condiciones de concentración inicial de sal y flujo en la célula D2. En la figura N°6.2 se observa que ambas graficas tiene la misma tendencia de aumentar la conductividad sin embargo cuando la célula trabaja a 16 voltios presenta mayor pendiente significa que la evolución de la conductividad depende del potencial aplicado.

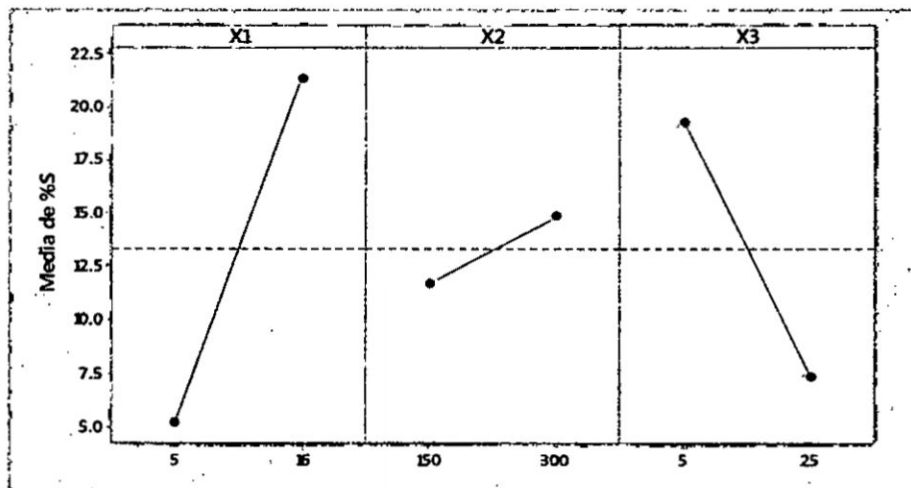
3. Efecto del flujo

De la gráfica 6.6 se observa que no hay una diferencia significativa en la evolución de la conductividad cuando la célula de (D2) tiene un flujo de 150 – 300 mL /min, existe una ligera variación cuando el flujo es de 300 ml/ min. De igual forma en la figura N°6.7 se muestra

una ligera incrementación de la conductividad a mayor flujo en la corriente de C2.

En la figura N° 7.1 se presenta los efectos principales de los factores de control sobre el porcentaje de desalinización. La magnitud de la pendiente representa la intensidad de los efectos que ejerce cada factor. Cuando la pendiente es positiva, se produce un aumento en la eficiencia de la desalinización para un alto nivel de ese factor y viceversa. El porcentaje de desalinización es significativamente afectado por el cambio en el valor del potencial eléctrico de 5 a 16 voltios. La concentración inicial de salmuera también influye en el % de desalinización se observa el grafico que a menor concentración, alcanza un mayor porcentaje de desalinización. Con respecto al flujo no existe mayor variación significativa al porcentaje de desalinización.

GRAFICA N° 7.1
EFFECTOS PRINCIPALES PARA EL PORCENTAJE DE DESALINIZACIÓN



Fuente: Elaboración Propia

7.2. Optimización de los factores

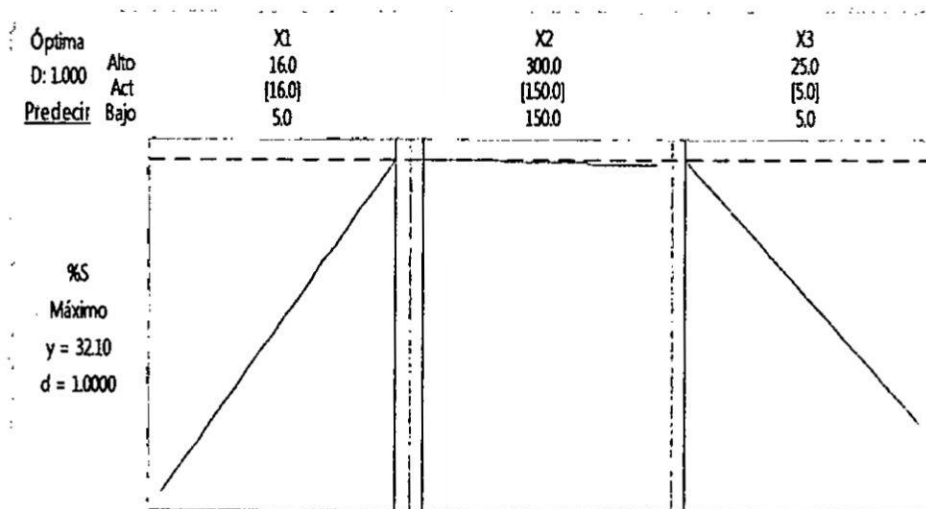
Para obtener los niveles óptimos de los factores, los valores fueron establecidos por el optimizador de respuesta múltiple MINITAB los niveles óptimos de x_1 , x_2 y x_3 , que fueron 16 (+1), 150 (-1) y 5 (-1) , respectivamente; como se muestra en la TABLA 7.1

TABLA 7.1
NIVELES ÓPTIMOS DERIVADOS PARA VARIABLES
EXPERIMENTALES

Nº	X1	X2	X3	% de desalinización
2	16	150	5	32.1

Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N° 7.2
OPTIMIZACIÓN PARA DISEÑO FACTORIAL

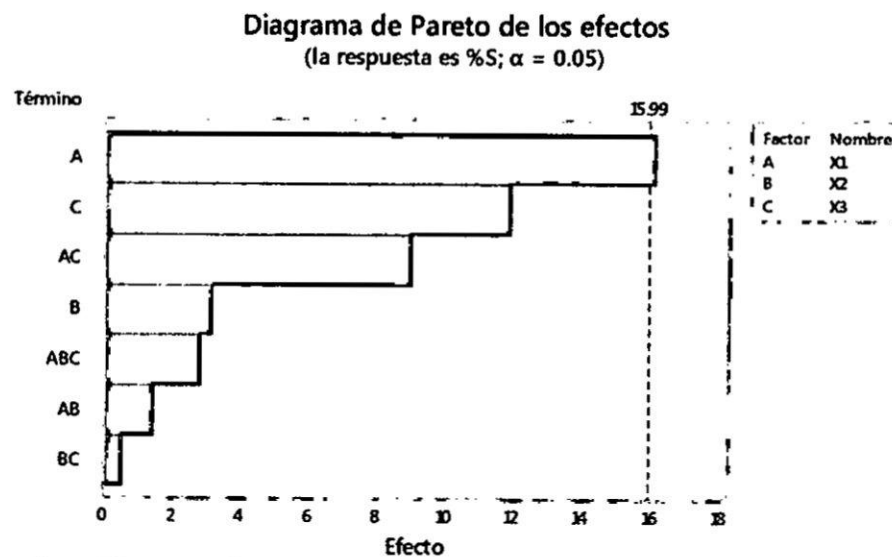


Fuente: Elaboración Propia

7.3. Interacciones de los factores controlables

El gráfico de Pareto muestra una línea de referencia, cualquier efecto que se extienda más allá de esta línea de referencia es potencialmente importante. Según el gráfico de Pareto, los factores x1 tienen un efecto significativo en la respuesta. Otro factor próximo a la línea de referencia es X3, Como los otros términos son insignificantes.

FIGURA N° 7.3
DIAGRAMA DE PARETO DE EFECTOS ESTANDARIZADOS.

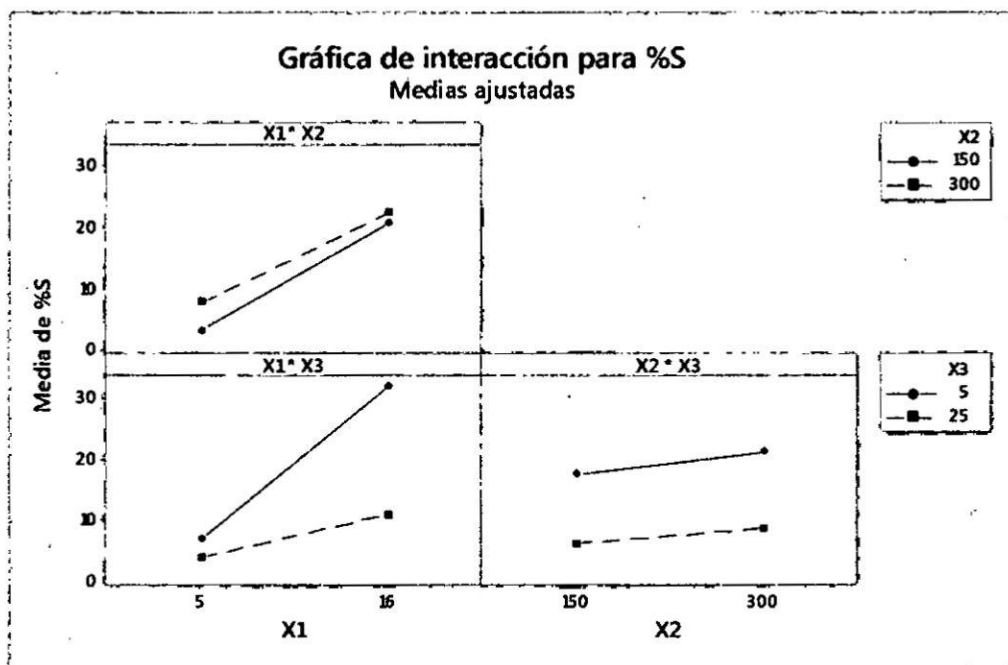


Fuente: Elaboración Propia

El efecto de interacción, que se muestra en la figura 7.3, indica el efecto interactivo combinado de dos factores cuando la respuesta de un factor (bajo a alto) depende del nivel de un segundo factor. Gráficamente, dos líneas paralelas de factores indican que no hay interacción entre ellos, mientras que las líneas no paralelas sugieren que los dos factores interactúan entre sí.

De la gráfica se observa claramente que las variables X1 y X2 no existe interacción alguna, sin embargo que la interacción X1 con X2 y X3 hay ligera interacción.

GRAFICA N° 7.4
INTERACCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA EL PORCENTAJE DE DESALINIZACIÓN



Fuente: Elaboración Propia

7.4. Análisis de regresión

El modelo lineal obtenido de la desalinización se presenta en la ecuación .

$$\begin{aligned} \%S = & - 28,42 + 4,252 X1 + 0,09922 X2 + 1,160 X3 - \\ & 0,006911 X1 \cdot X2 - 0,1592 X1 \cdot X3 - 0,003983 X2 \cdot X3 \\ & + 0,000343 X1 \cdot X2 \cdot X3 \end{aligned}$$

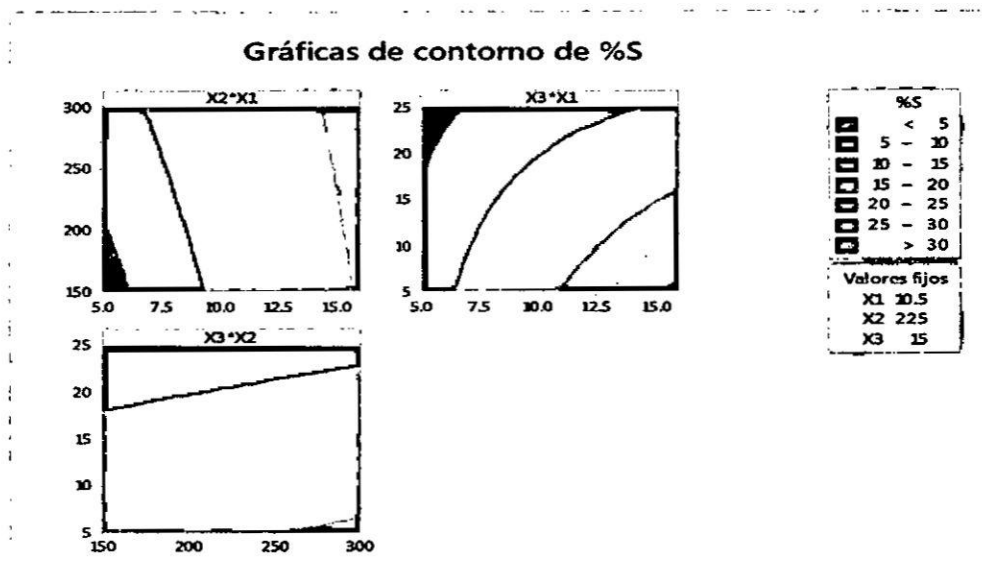
Donde: X1, X2 y X3 son los valores codificados de las variables independientes, Potencial eléctrico (X1), flujo (X2) y concentración

de salmuera (X_3), respectivamente. El coeficiente de x_1 en la ecuación ; por lo tanto, el potencial eléctrico tiene un mayor impacto en la desalinización que los otros coeficientes.

7.5. Grafica de contorno

En la gráfica N°7.5 se representa la gráfica del contorno de respuesta para la optimización de la desalinización en función de los parámetros de operación. Se observa que el potencial eléctrico es el más significativo para producir mayor porcentaje de La Fig. (b) muestra la interacción entre potencial y concentración inicial. El aumento de la concentración de sal ocasiona por consiguiente disminución en el porcentaje de desalinización.


GRAFICA N° 7.5
% DE DESALINIZACIÓN - CONTORNO



Fuente: Elaboración Propia

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bunania, S.; Yoshizukac, Nishihamac, S.; Ardab, M.; Kabaya, N. (2017) Application of bipolar membrane electrodialysis (BMED) for simultaneous separation and recovery of boron and lithium from aqueous solutions *Desalination* 424 (2017)37–44
2. Camacho, L.;Fox, J.; Ajedegbaa, J. (2017). Optimization of electrodialysis metathesis (EDM) desalination using factorial design methodology. *Desalination*, 403, 136-143.
3. Farrell, S.; Hesketh, R.; Slater, S. (2008) exploring the potential of electrodialysis rowan university *Membranes in ChE Education* pag. 53-59
4. Haiyang Yan, Chunyan Xu, and Tongwen XuWei Li, Yaoming Wang,(2016). Electrodialysis To Concentrate Waste Ionic Liquids: Optimization of Operating Parameters . *Ind. Eng. Chem. , 55*, 2144–2152.
5. Hanna J, Aneta L, Piotr D. (2014). Synthesis of potassium nitrate by metathesis electrodialysis. *Membranes and Membrane Processes in Environmental Protection , 119*, 351-361 .
6. Hanna J, Aneta L, Piotr D. (28 January 2016,). Transport of impurities and water during potassium nitrate synthesis by electrodialysis metathesis. *Separation and Purification Technology*, 158, 87–93.
7. Rick B, Bill B, Tom D, and Benjamin K. (July 2011). Zero Liquid Discharge Desalination of Brackish Water withan Innovative Form of Electrodialysis: Electrodialysis Metathesis *Florida water resources journal* 2. , 1, 9.



IX. APENDICES

En las siguientes tablas y figuras se muestran las pruebas preliminares Efectuadas

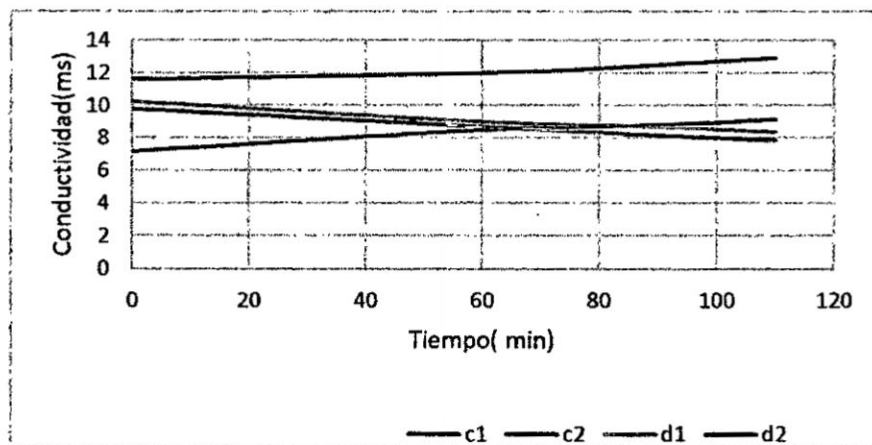
I) Prueba experimental N°1

TABLA N° 9.1: CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO EN EL EQUIPO DE ELECTRODIÁLISIS METÁTESIS A TENSIÓN DE 6 V

Tiempo (min)	Conductividad (c1) ms/cm	Conductividad(C ₂) ms/cm	Conductividad (D1) ms/cm	Conductividad(D2) ms/cm
0	7.18	11.6	10.26	9.8
60	8.5	12	9	8.7
90	8.8	12.5	8.7	8.15
110	9.15	12.93	8.35	7.85

Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N° 9.1: CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO A 6 VOLTIOS



Fuente: Elaboración Propia

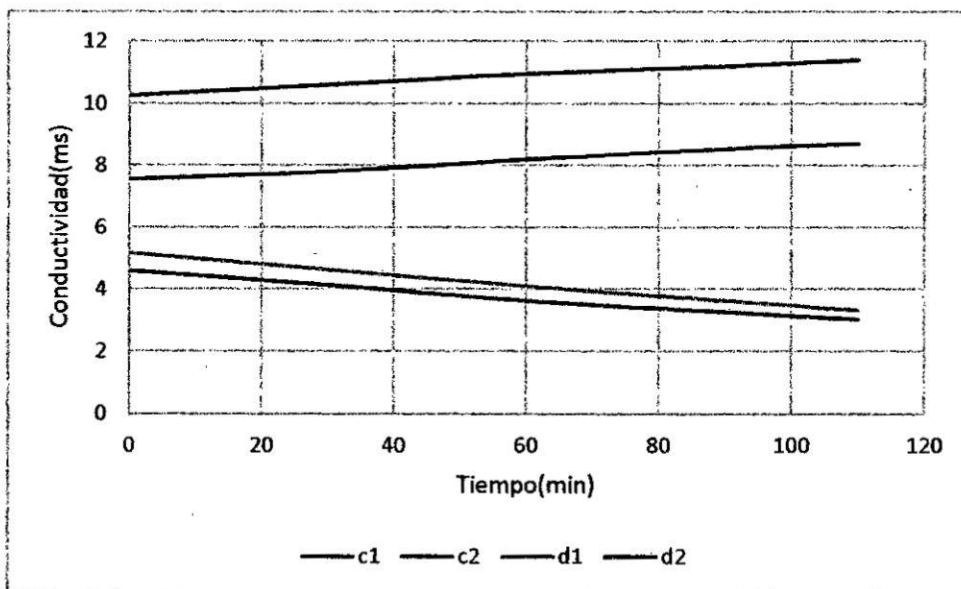
II) Prueba experimental N°2

TABLA N° 9.2: CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO EN EL EQUIPO DE ELECTRODIÁLISIS METÁTESIS A TENSIÓN APLICADA DE 8 VOLTIOS

Tiempo (min)	Conductividad (c1) ms/cm	Conductividad (C ₂) ms/cm	Conductividad (D1) ms/cm	Conductividad(D2) ms/cm
0	7.56	10.26	5.17	4.6
30	7.81	10.6	4.63	4.13
60	8.2	10.96	4.1	3.63
90	8.55	11.2	3.63	3.26
110	8.72	11.4	3.32	3.02

Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N° 9.2: CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO A 8 VOLTIOS



Fuente: Elaboración Propia

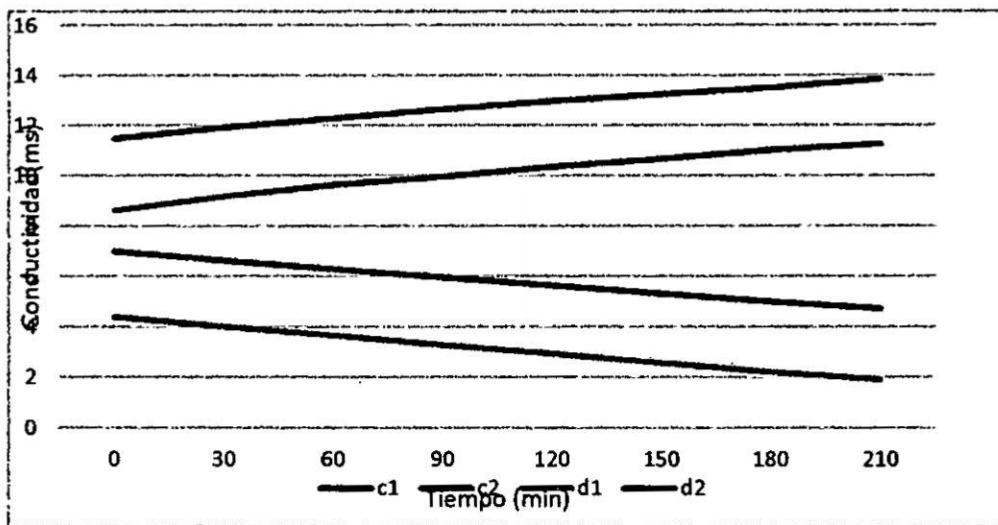
III) Prueba experimental N°3

TABLA N° 9.3: CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO EN EL EQUIPO DE ELECTRODIÁLISIS METÁTESIS A TENSIÓN APLICADA DE 8 VOLTIOS

Tiempo (min)	Conductividad (c1) ms/cm	Conductividad(C ₂) ms/cm	Conductividad (D1) ms/cm	Conductividad(D2) ms/cm
0	8.62	11.45	4.38	6.98
30	9.18	11.91	4	6.62
60	9.63	12.28	3.65	6.28
90	9.96	12.63	3.28	5.96
120	10.33	12.95	2.92	5.63
150	10.67	13.24	2.57	5.31
180	11	13.49	2.2	4.98
210	11.24	13.83	1.9	4.7

Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N° 9.3 : CONDUCTIVIDAD VS TIEMPO A 8 VOLTIOS



Fuente: Elaboración Propia

ANEXOS: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE UN MÓDULO DE ELECTRODIÁLISIS METÁTESIS PARA TRATAR CONCENTRADOS DE AGUA SALOBRE PROCEDENTES DE OSMOSIS INVERSA

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVOS	HIPÓTESIS.	VARIABLES E INDICADORES	DIMENSIÓN	INDICADORES	INSTRUMENTO
<p>Principal ¿Cuáles serán los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis metátesis en el tratamiento de concentrados de agua salobre procedentes de osmosis inversa?</p> <p>Problemas Secundarios 1. ¿Cuál será las características físicas y químicas de los concentrados de agua salobre procedentes de osmosis inversa? 2. ¿Cuáles serán los parámetros y niveles de operación del módulo de electrodiálisis metátesis? 3. ¿Cuál será los parámetros físicos y químicos de las corrientes de concentrados y diluidas procedentes del módulo de electrodiálisis metátesis?</p>	<p>Objetivo General Optimizar los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis metátesis para tratar concentrados de agua salobre procedentes de osmosis inversa</p> <p>Objetivos Específicos 1. Caracterizar los parámetros físico químicos del concentrado de agua salobre procedentes de osmosis inversa 2. Identificar los parámetros de operación del módulo de electrodiálisis metátesis 3. Evaluar los parámetros físico químicos de las corrientes de concentrado y diluidas procedentes del módulo de electrodiálisis metátesis</p>	<p>Hipótesis General Con la optimización de los parámetros de operación del módulo de electrodiálisis metátesis en el tratamiento de concentrados de agua salobre procedente de osmosis inversa, obtendremos un alto grado de desalinización</p> <p>Hipótesis Especificas 1. Al Caracterizar los parámetros físico químicos del concentrado de agua salobre procedentes de osmosis inversa se espera conocer la composición química (iones calcio, magnesio, sulfatos, carbonatos) 2. Al optimizar los parámetros de operación (Potencial eléctrico, concentración de concentrado de osmosis inversa, Flujo volumétrico, del módulo de electrodiálisis metátesis se logrará alcanzar altos valores de porcentaje de separación de sales, en las corrientes de concentrado 3. Al caracterizar los parámetros físico químicos de las corrientes de concentrado y diluido se logrará conocer la calidad de agua obtenida.</p>	<p>$X = \text{Variable Independiente}$ parámetros de operación (x) indicadores:(X) Variables Independientes Factores Controlables (X) 1. Potencial(X_1) 2. Concentración (X_2) 3. Flujo (X_3)</p> <p>$Y = \text{Variable dependiente}$ Porcentaje de separación de sales (y1) indicadores: Porcentaje (%)</p>	<p>Potencial eléctrico Concentración de alimentación Velocidad de flujo</p>	<p>Voltios Conductividad y ppm L/min. gpm</p>	<p>Multitester conductímetros Cronómetros</p>

ANEXO N°2: Evolución de la conductividad en función del tiempo

L.M. Camacho et al. / Desalination xxx (2016) xxx-xxx

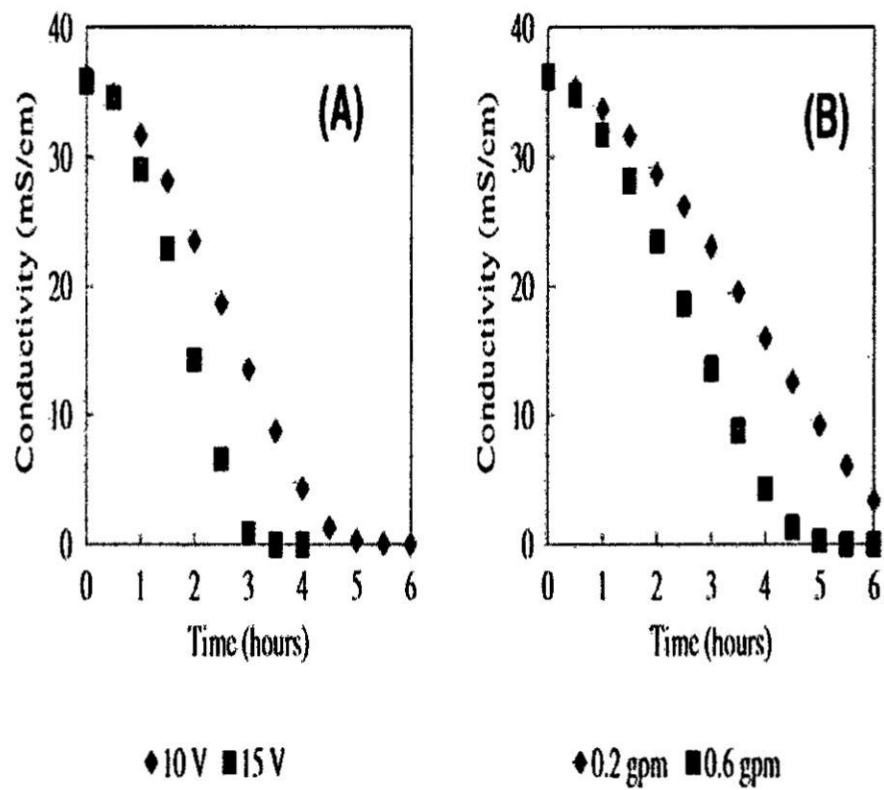


Fig. 2. Conductivity variations of feed salt solution in D1 tank with Neosepta membranes and groundwater: (A) Effect of voltage at 0.6 gpm; (B) Effect of flow rate at 10 V.