

Desalinización de agua salobre mediante electrodiálisis para producción de agua potable

Enviado a

Xxx

Enero 2023

Franco Kevin, María Espinoza, Borja Fabián, Gutiérrez Leonardo, Priscila Valverde

Abstracto

El consumo de energía dentro de un proceso de desalinización de agua salobre es uno de los resultados que más peso tiene para conocer la aplicabilidad de un tratamiento. Por lo que al conocer que los procesos como osmosis inversa, evaporación multi etapa tiene un consumo de energía elevado debido el primero a altas presiones que se necesita y el segundo debido a las altas temperaturas, se ha visto necesario buscar procedimientos alternativos como la electrodiálisis, dentro de esta investigación se optimizado el caudal, voltaje, número de membranas con la finalidad de maximizar el caudal y minimizar el consumo de energía.

Se debe tomar en cuenta que este proyecto se lo realizo a nivel de laboratorio y se ha comparado los resultados de osmosis inversa de acuerdo con la simulación por software que se realizó. La calidad de agua de la muestra tiene como principales parámetros: pH de 7.12, una turbidez de 0.50 NTU, solidos totales disueltos de 1743 mg/L y conductividad eléctrica de 3.54 mS/cm. Los resultados encontrados nos dan a conocer que el consumo energético por electrodiálisis es de 0.25 kWh/m³ mientras que con osmosis inversa es de 0.64 kWh/m³, estableciendo un ahorro del 164%.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se estudia un problema relacionado con la disponibilidad del agua, debido al cambio climático principalmente porque los cambios de temperaturas han modificado el ciclo hidrológico creando un nivel de estrés hídrico. (Moreira et al., 2021). Para el 2050 se estima que el 53% de población en el mundo tenga escasez de agua debido al incremento de población en zonas urbanas y altamente concentradas, en algunos lugares debido al aumento de lluvias por el cambio del ciclo hidrológico este estrés de agua va a disminuir principalmente en lugares donde se obtenga agua para consumo de recursos superficiales o subsuperficiales como ríos o pozos. (Alcama et al., 2007; Arnell, 1999; Schlosser et al., 2014).

Hay que tomar en cuenta que la calidad de agua que se obtiene de los afluentes no es apta para el consumo por lo que la potabilización del agua es una necesidad imperiosa (Vanoppen et al., 2016a), conociendo que en el mundo tenemos solamente un 3% de agua dulce (ríos, acuíferos, lagos), de lo cual el 69% está en glaciares, el 30% en agua subterránea (principalmente salobre) y el sobrante se encuentra en agua superficial (USGS, 1984). Con esto nace la necesidad de investigar diferentes tipos de tecnologías para poder potabilizar el agua salobre existente en acuíferos subterráneos.

Según (Lechuga et al., 2007) los procesos más usados para la desalinización del agua son: Evaporación Multi-Etapas Flash (MSF), osmosis inversa (OR) y la electrodiálisis (ED). Cada uno de estos procesos tiene ventajas del uno sobre el otro, por lo que MSF es un proceso que logra la desalinización de agua con alta concentración [1] de sólidos disueltos totales (SDT), el cual funciona mediante la condensación del agua para ir eliminando los SDT, teniendo un consumo de energía específica de 3.193 kWh/m³. (Bozgeyik et al., 2022). En plantas de osmosis inversa se emplea una energía específica entre 2.5 y 7 kWh/m³, dependiendo de la salinidad del agua, en el caso de (Ghaithan et al., 2022), la planta usa 3.36 kWh/m³, con un agua de salinidad media [2]. Sabiendo que las plantas de osmosis inversa funciona mediante membranas por donde pasa el agua a altas presiones, donde al tener membranas cada vez con espacios más pequeños los minerales se van reteniendo dentro de las membranas por lo que no solo debemos tomar en cuenta el uso de energía sino el costo de mantenimiento debido a que las membranas a la obstrucción que se pudiera tener. (Adel et al., 2022; Hou et al., 2022; Li & Sun, 2022). La electrodiálisis es la opción para agua de baja salinidad (salobre) [3], la cual tiene una

¹ salinidad alta: Agua salobre SDT >12,000

² salinidad media: Agua salobre SDT >6000,000 mg/L y SDT < 12,000 mg/L

³ salinidad baja: Agua salobre SDT < 6,000 mg/L

energía específica en el caso de agua salobre se tiene un consumo entre 0.75 y 2.5 kWh/m³. Siendo un sistema de tratamiento mediante membranas, estas son de intercambio iónico, es decir son membranas que dejan pasar aniones o cationes, no filtrando el agua como es la ósmosis inversa, siendo así el funcionamiento de las membranas usadas no sufren de obstrucción tan importante en comparación a la ósmosis reversa. (Al-Karaghoulí & Kazmerski, 2013; Liu & Wang, 2017; Roman et al., 2021; Sayed et al., 2022). Al conocer la capacidad de la electrodiálisis de desalinizar agua salobre, como por ejemplo agua de pozos cercanos al mar, se torna una gran opción debido a que tiene una ventaja más ya que puede ser un sistema descentralizado, es decir no necesariamente debe usar energía de la red pública, porque tiene un bajo consumo energético que se puede cubrir con paneles solares. (Ankoliya et al., 2021; Yang et al., 2021).

En Ecuador principalmente en la Costa el agua subterránea tiene una salinidad media y baja [1,2], caracterizándola como agua salobre, según datos de (Massa Sánchez & Fries, 2019) se debe tomar en cuenta que existe un nivel de estrés hídrico bajo de forma global dentro del Ecuador debido a que se tiene una cantidad de agua superficial de 4.863,41 m³/habitante/año. Pero debido a estudios más detallados se encontró que la cuenca del río Zapotal de la provincia de Santa Elena se tiene un estrés hídrico por temporadas de lluvias y sequías. (Massa Sánchez & Fries, 2019). Dentro de los estudios aparte de determinar la escasez de agua por temporadas se ha podido conocer que esta cuenca es tomada como fuente para agua potable en algunos lugares. Estudiando la calidad de agua se concluye que no es apta para considerarla como agua potable directamente desde la fuente, debido a las concentraciones de sólidos totales disueltos, es decir un agua salobre con una salinidad media y baja por lo que requiere de desalinización para ser utilizada, este tipo de calidad de agua permite que se pueda tener una parametrización óptima para ser tratada mediante electrodiálisis (Gmar et al., 2017), la población necesitada además al estar usando agua subterránea de pozo necesita un tratamiento que pueda ser autónomo y descentralizado con un costo bajo. (Shah et al., 2018). Con lo que podemos decir que al cumplir ciertos requerimientos necesarios lo óptimo para tratar este tipo de agua en la costa ecuatoriana es la electrodiálisis.

Para este caso de estudio de desalinización de agua salobre en la costa ecuatoriana se puede aplicar la electrodiálisis que según (Alvarez M & Cifuentes G, 2019) se define como "un proceso de membrana, durante el cual los iones se transportan a través de una membrana iónico-selectiva semipermeable" el paso del agua salada por las membranas atrapa los cationes y aniones resultando el agua dulce al término del proceso. Mediante

la electrodiálisis se separa los sólidos disueltos en el agua gracias a la aplicación de electricidad (Vera Cabezas & Mayra, 2009).

El presente estudio se enfocará al uso de electrodiálisis para la desalinización de agua salobre mediante membranas de intercambio iónico. Es importante conocer que dentro de otras variables a ser estudiadas se encuentran la configuración de equipo de electrodiálisis para la maximización de caudales y remoción de sales y disminución de energía específica. (Gmar et al., 2017; Wright et al., 2018).

Sin embargo, a pesar de las mejoras significativas, la desalinización sigue siendo un proceso que requiere intensivamente de energía. Por supuesto, esto es problemático dado la relación agua-energía, ya que según los datos de EIA (Administración de Información de Energía de Estados Unidos) se espera que el consumo de energía crezca casi un 50 % entre 2007 y 2035. Todas las mejoras tecnológicas actualmente están enfocadas para alcanzar un mayor nivel de recuperación de agua y eficiencia energética que permitan subsanar este inconveniente (Vanoppen et al., 2016b).

Por lo que dentro de esta investigación experimental a escala de laboratorio se realiza la optimización de energía específica con la finalidad de comparar con una simulación en software de un sistema de osmosis inversa. Se debe tomar en cuenta que en la electrodiálisis intervienen variables como caudal, potencia y número de membranas. Se toma en cuenta que para esta experimentación se utilizará el stack (sistema donde circula el agua y se colocan las membranas), membranas aniónicas, bomba peristáltica, solución básica (Agua + sulfato de sodio), muestra obtenida del pozo ubicado en la comunidad de Adela. Con la finalidad de maximizar el caudal disminuyendo la energía aplicada, dentro de la electrodiálisis.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Características y preparación de la solución

Dentro de la investigación experimental se manejan dos tipos de soluciones (agua con características específicas), debido a que dentro del sistema de electrodiálisis recirculan estos. La primera solución es la que recircula en el ánodo y cátodo la cual tiene las características de ser básica debido a que está compuesta de sulfato de sodio, el cual tiene una conductividad eléctrica de 1500 mS/cm^3 . Esta solución es preparada con base de agua desionizada. La siguiente solución es la muestra que se ha obtenido del pozo de la comunidad de Adela, ubicada en la provincia de Santa Elena, Ecuador que tiene como

parámetros principales los siguientes: pH de 7.12, una turbidez de 0.50 NTU, sólidos totales disueltos de 1743 mg/L y 3.54 mS/cm.

2.2 Equipo experimental.

El stack para la experimentación tienen 2 entradas y 2 salidas por cada uno de los lados, ilustraciones 1, por lo que las membranas tienen 8 canales para que recircule el agua, siendo así se debe tomar en cuenta que además de las membranas deben usarse separadores los cuales son fabricados en polietileno.

Ilustraciones 1 Stack y configuración de los canales en la membrana



El ánodo es a base de Rutilio e Iridio, y el cátodo tiene de material acero inoxidable. Los equipos usados dentro de la fase experimental se detallan en la tabla 1 y como se observan dentro de la ilustración 1.

Tabla 1. Equipos usados en fase de experimentación

Equipo experimental	Tipo	Marca
Bomba peristáltica	BT100-1F	LENGERPUMP
Multiparamétrica	HQ40d	HACH
Fuente de poder	500V-300 ^a	WVR
Potenciostato	Electrochemical Workstation	CORRTEST
Turbidímetro	2100Q	HACH
Espectrofotómetro	DR-3900	HACH

Además de los equipos se aclara que se usó las membranas de intercambio iónico provistas por Fujifilm, tipo II, las características de las membranas están detalladas en la tabla 2. Estas membranas son recomendadas para agua salobre y para funcionamiento

de electrodiálisis, el área de contacto que se tiene dentro del stack a ser usado es de 64 cm², teniendo una medida cuadrada de 8 cm.

Tabla 2 Características de la membrana usada en la experimentación

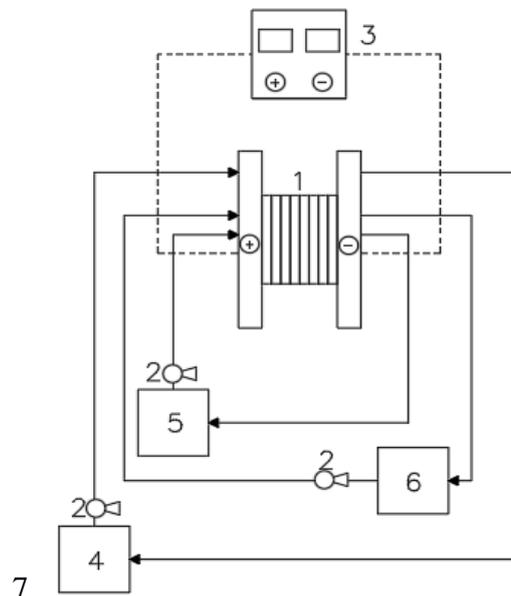
Características	AEM	CEM
Material	poliolefina	
Reforzamiento	160	160
Espesor seco (um)	5.0	8.0
Selectividad Eléctrica	95	96
IE Capacidad	0.9	1.1
Permeabilidad	3.0	3.5
Resistencia al Burst strength	5.0	4.7
Estabilidad de pH	pH 2-10	pH 4-12
Temperatura máxima	40	

Fuente: www.Fujifilm.com/ion-exchange-membranes/overview

2.3 Configuración del stack de Electrodiálisis

La electrodiálisis que estamos usando en escala de laboratorio tiene el modo de recirculación para tratar el agua, por lo que la configuración del stack debe estar como se muestra en la figura 2.

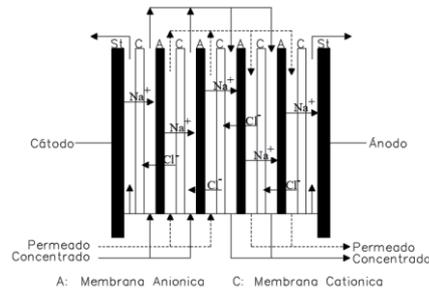
Ilustración 2 Configuración del stack



Referencias: 1 Stack, 2 bomba peristáltica, 3 fuente de poder, 4 recipiente concentrado, 5 recipiente permeado y 6 recipiente de solución para los electrodos.

Hay que tomar en cuenta que durante los procesos de experimentación se realizaron con varias cantidades de pares de membranas, típicamente usando 3 y 6 pares de membranas para conocer las relaciones entre el número de membranas, área de contacto y tiempo de desalinización como se observa dentro de la figura 3.

Ilustración 3 Configuración interna del stack



2.4 Datos por recolectar

2.4.1 Gradiente de desalinización (Gd)

En el proceso de desalinización el permeado comienza a disminuir los SDT y la conductividad eléctrica, conociendo esto las sales pasan al concentrado que suben a una tasa dada. Para hallar este gradiente de desalinización se aplica la ecuación 1.

$$Gd = \left(1 - \frac{Con\ 1}{Con\ 2}\right) * 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Gd es el gradiente de concentración en porcentaje

Con1: es la concentración inicial en mg/L

Con2: es la concentración final en mg/L

2.4.2 Energía consumida (ECo)

En los procesos de desalinización debemos tomar en cuenta la energía que se empleó para poder determinar ventajas o desventaja frente a otros tipos de tecnologías, este consumo se determinara en kWh/m³, debido a que se puede estimar el costo por metro cúbico de agua tratada. Para el cálculo de este dato se halla la aplica la ecuación 2.

$$ECo = \left(\frac{V * I * t}{Vol}\right) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

V: voltaje en (kV)

A: amperaje en (a),

T: tiempo en horas (h)

Vol: Volumen en m³

ECo: en kWh/m³

Se toma en cuenta que el voltaje y amperaje se lo obtiene de la fuente de poder que se tiene dentro del procedimiento de desalinización, el tiempo se lo toma hasta llegar a los sólidos totales disueltos requeridos para que sea agua potable y el volumen es el que ingresa tanto en el permeado y concentrado.

2.5 Descripción de la planta de osmosis reversa para desalinización de agua salobre.

Para poder estimar la cantidad de energía en kWh/m³ dentro de una planta de tratamiento de osmosis reversa, se puede simularla, para lo cual se usó el software de uso libre WAVE.

Con esta finalidad y para poder obtener las características más similares, posibles a los valores de la de TDS que se tienen las muestras tratadas dentro del stack, se ingresaron los datos como se observan dentro de la tabla 3, valores que son obtenidos de la muestra mediante análisis de laboratorio.

Tabla 3. Características del agua dentro de la simulación en WAVE

Elementos dentro del agua	meq/L
K	0.300
Na	17.38
Mg	4.365
Ca	5.509
CO ₃	0.006
HCO ₃	2.250
NO ₃	0.059
Cl	14.40
SO ₄	10.83

Con los datos ingresados dentro del software, se estima que tiene 3.00 TDS, por lo que es viable aplicar la corrida, para lo cual y estando en una escala de laboratorio se usó la membrana más pequeña dentro del software el cual es de 4'' teniendo como mejor la membrana de BW30-2540, de la marca filmtec, la cual tiene las siguientes características descritas en la tabla 4:

Tabla 4 Características de la membrana usada en la experimentación

Características	Detalles
Tipo de membrana	Compuesto de película delgada de poliamida
Máxima temperatura de operación	45° C
Máxima presión de funcionamiento	41 bar
Máximo caudal de alimentación	1.4 m3/h
Rango de pH	2-11

Dentro de la simulación se ha configurado la planta de osmosis, con una bomba y con una recirculación del 18%, tomando en cuenta que ambas experimentaciones no se ha dado ningún tratamiento previo, debido a que la turbiedad (NTU) son bajas. Se toma en cuenta que se pusieron dos etapas la primera con 8 membranas y la segunda con 4 membranas.

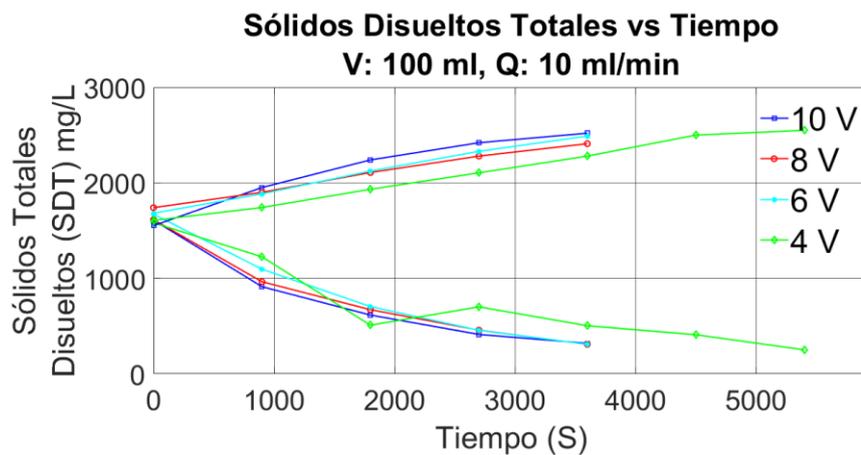
3. RESULTADOS Y DISCUCIONES

3.1 Determinación del voltaje, caudal y volumen.

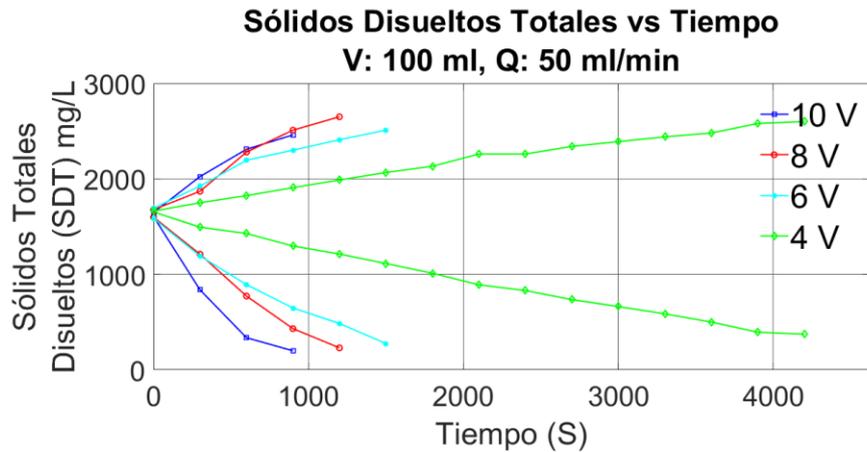
El proceso de laboratorio se realizó con varios caudales de 10, 50 y 100 ml/min y volúmenes de recirculación de 100ml y 500ml. Con estos experimentos el primer dato sobresaliente es la densidad de corriente que necesita este tipo de muestra con la configuración que tenemos especificada en la figura 4 (a) , 4 (b) y 4 (c). Donde se resumen los resultados de concentración de solidos totales disueltos de acuerdo con cada una de las experimentaciones.

Para ver el comportamiento de desalinización del agua tenemos las figuras 4 (a), 4 (b) y 4 (c), en donde se resumen los resultados de los diferentes comportamientos para cada uno de los experimentos. Como es de esperar la desalinización con caudales mayores tienen un tiempo de desalinización mayor esto debido a la cantidad de veces que todo el volumen recircula por el stack. Se debe tomar en cuenta que al ser un sistema de tratamiento de agua, existen dos resultados uno donde se concentran las sales y otro que es el permeado o agua tratada donde se debe llegar a menos de 500 mg/L, como recomienda la OMS. Se debe tomar en cuenta que la recuperación dentro del procedimiento es del 50 por ciento, es decir tanto el concentrado y permeado tienen el mismo volumen.

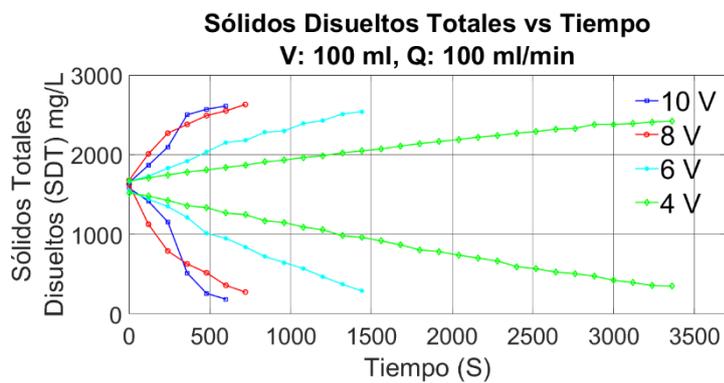
Figura 4: Efecto de desalinización del agua mediante el proceso de recirculación con voltaje de 10,8,6,4 V y caudales de 10,50 y100 ml/min. Volumen de recirculación 200 ml con recuperación del 50%.



a.) Experimentación de V: 100 ml, Q: 10 ml/min, Recuperación 50 %



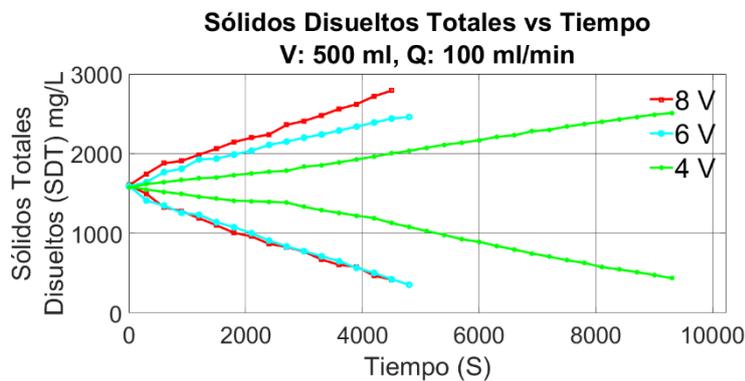
b.) Experimentación de V: 100 ml y Q: 50 ml/min, Recuperación 50 %



c.) Experimentación de V: 100 ml y Q: 100 ml/min, Recuperación 50 %

Como se observa en la figura 4 a mayor caudal menor tiempo de desalinización, pero el voltaje óptimo debido la densidad de corriente máxima es de 6 voltios para esta muestra. Para validar este voltaje se aumente el volumen de recirculación a 500 ml, con la misma configuración y voltajes de 8,6,4 como se detalla en la figura 5.

Figura 5: Efecto de desalinización del agua mediante el proceso de recirculación con voltaje de 8,6,4 V y caudal de 100 ml/min. Volumen de recirculación 1000 ml con recuperación del 50%.



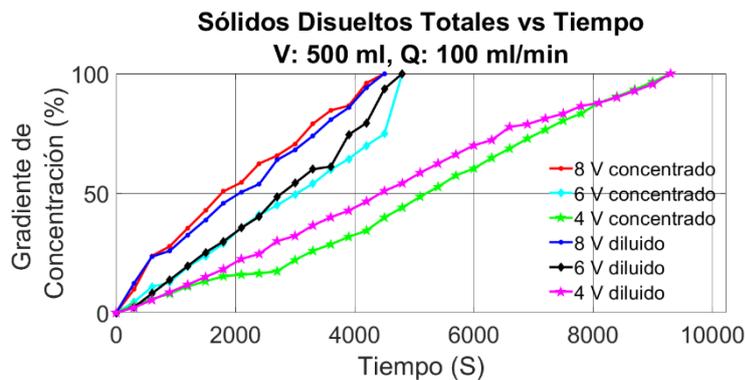
a.) Experimentación de V: 500 ml y Q: 100 ml/min, Recuperación 50 %

El proceso con mayor volumen ratifica que el voltaje optimo es de 6 V, esto debido a que se demora un tiempo similar al de 8 V pero en cantidad de energía será menor porque el voltaje es menor, además al crecer el volumen también sube el tiempo de recirculación. Por lo que al final de la experimentación los elementos óptimos son volumen de 500 ml, 100 ml/min y 6V

3.2 Gradiente de concentración

El gradiente de concentración al ser un proceso de recirculación este se debe ir acumulando, aplicando la fórmula 2. En este procedimiento se ocupó los parámetros óptimos, para un mayor detalle se encuentra la figura 6.

Figura 6: Gradiente de concentración de desalinización mediante el proceso de recirculación con voltaje de 6 V y caudal de 100 ml/min. Volumen de recirculación 1000 ml con recuperación del 50%.



a.) Experimentación de V: 500 ml y Q: 100 ml/min, Recuperación 50 %

El gradiente de concentración del concentrado de la curva de 8,6 y 4 V tiene una tasa de concentración de 14.82, 10.70 y 6.23 mg/L por minuto respectivamente, mientras que la tasa de concentración del permeado tiene una tasa de -15.096, -14.58 y -7.73 mg/L por minuto respectivamente.

3.3 Cálculo de energía específica

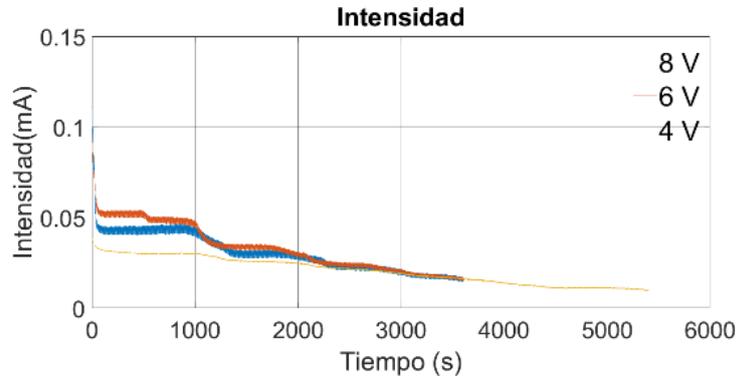
La energía que se aplica dentro del consumo del stack viene dada por la fórmula 1, la energía para los diferentes voltajes, volúmenes con caudal de 100 ml/min se resumen dentro la tabla 5 y la varianza de intensidad de los experimentos se ilustra en la figura 6. Se debe tomar en cuenta que recuperación de estos experimentos es del 50%.

Tabla 5: Energía consumida por cada uno de los experimentos

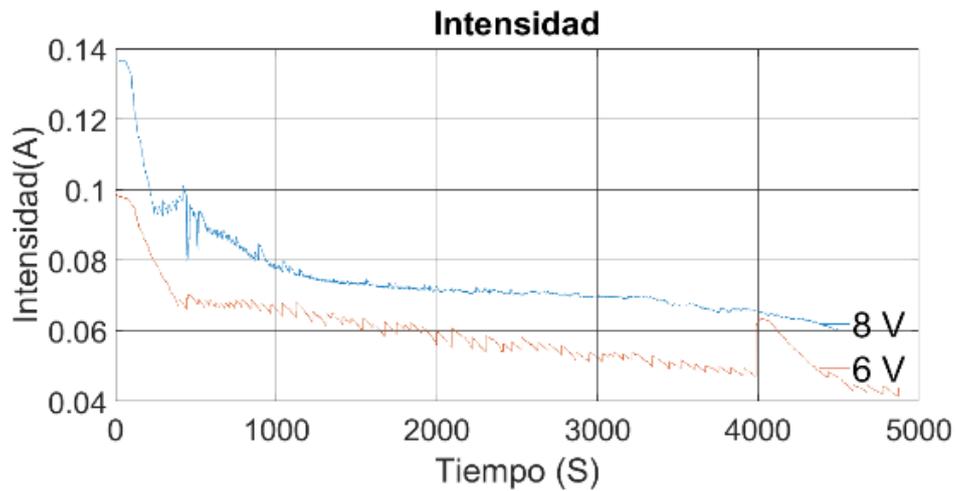
Experimento N°	Volumen (mL)	Caudal (mL/min)	Voltaje (V)	Energía específica (kWh/m ³)
1	100	10	8	1.1845
2	100	10	6	0.7248

3	100	10	4	0.2981
4	500	100	8	0.4352
5	500	100	6	0.2544

Figura 6: Intensidad consumida por cada uno de los experimentos



a.) Intensidad: caudal: 10 ml/min y volumen: 100 ml



b.) Intensidad: caudal: 100 ml/min y volumen: 500 ml

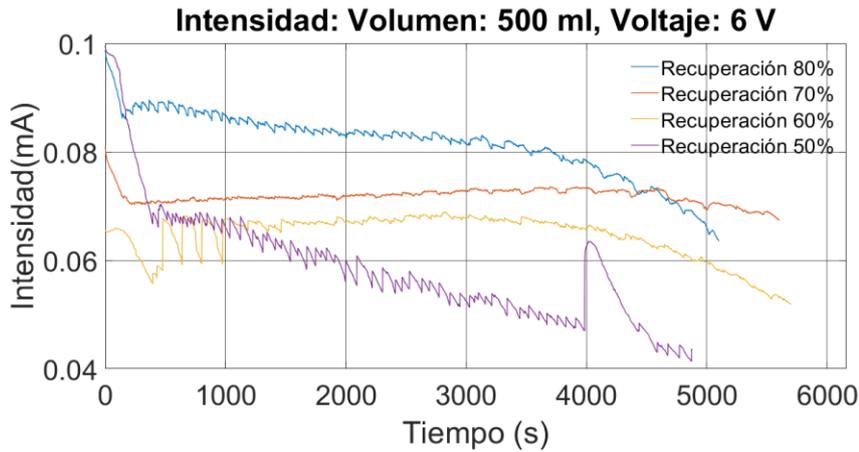
Tanto en la figura 6 (a), 6 (b) y como se resumen en la tabla 3 se ve que la intensidad es muy similar en ambos casos debidos a la densidad eléctrica, pero la energía disminuye al aumentar el caudal debido al número de veces que el agua recircula, por lo tanto, el área de contacto es mayor.

3.4 Cálculo de energía específica aumentando la recuperación

Ya con los datos anteriormente encontrados la recuperación dentro del stack lo realizamos con un volumen de 500 mL, caudal de 100 mL/min y un voltaje de 6 V. Por lo cual se realizaron recuperaciones del 60, 70 y 80 por ciento.

Como se debe comportar a mayor recuperación la cantidad de intensidad aumenta es por lo que se debe tomar en cuenta la cantidad de volumen que se recupera dentro del proceso de desalinización para determinar la cantidad de energía por metro cúbico tal como se observa en la figura 7.

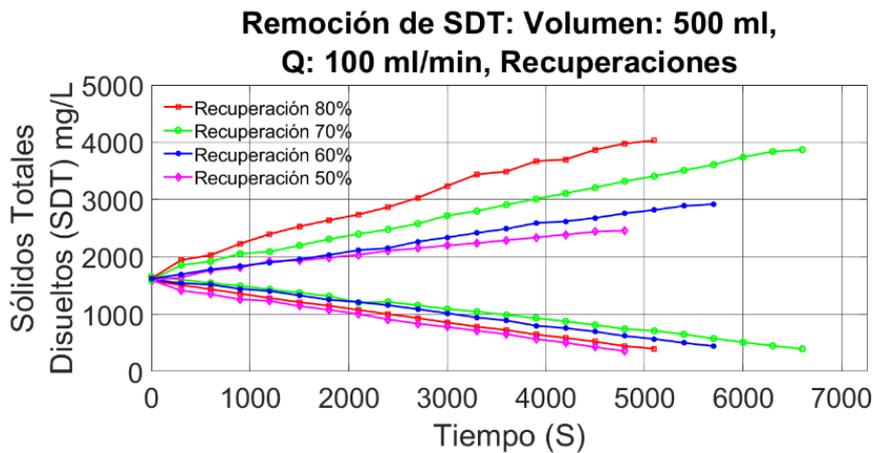
Figura 7: Intensidad consumida por cada uno de los experimentos



a.) Intensidad: caudal: 10 ml/min y volumen: 100 ml

Para poder comprender de mejor manera también se ilustra en la figura 8 como se comportan los sólidos totales cuando se cambian las recuperaciones de agua, es decir se varían los volúmenes de concentrado y permeado dentro del sistema de potabilización. Al ser menores los volúmenes de concentrado porque se aumenta la recuperación los TDS también aumentarán.

Figura 8: Sólidos totales en relación con la recuperación del proceso



3.5 Caracterización de la muestra obtenida de permeado y concentrado

En la tabla 6 tenemos los datos de los iones principales en el concentrado que queda posterior a la desalinización según la recuperación que tenemos.

Recuperación	K	Dureza Total	Ca	S04	N03
80%-20%	80.00	184.70	336.00	1700.00	5.50
70%-30%	460.00	153.10	280.00	1500.00	4.40
60%-40%	140.00	121.50	212.00	1160.00	3.60
50%-50%	31.00	99.60	200.00	820.00	4.10

Principalmente se tiene sulfatos y dureza en el concentrado de la muestra, por lo que se tiene en estos datos se deberá buscar una finalidad de aprovechamiento para este tipo de desecho. Datos obtenidos de pruebas de laboratorio al concentrado de agua del resultado del tratamiento.

3.6 Resultados obtenidos de la simulación de la osmosis inversa

Como se establece dentro de los parámetros ingresados en el software de acuerdo con la tabla 3, se escogió que el sistema de osmosis inversa se lo realice en dos etapas debido a la recuperación del 80% que se debía obtener. Los resultados obtenidos dentro con la simulación se resumen en la tabla 7 de la siguiente manera:

Tabla 5: Tabla resumen de resultados obtenidos de la simulación

Característica	Detalle
Tipo de agua	Agua de pozo
Número de elementos	12
Área total activa (m ²)	31.2
Caudal de alimentación (m ³ /h)	1.17
Presión de alimentación (mg/L)	2.038
Caudal del permeado (m ³ /h)	0.9
Permeado TDS (mg/L)	27.4
Recuperación parcial (%)	76.9
Energía específica kWh/m ³	0.64
Temperatura	25
pH	7
Recuperación total del sistema (%)	80%

4. CONCLUSIONES

En la fase experimental se ha podido concluir que el tipo de agua de la muestra del pozo de Adela, el cual tiene una conductividad de 3.00 mS, se puede determinar lo siguiente: Los parámetros óptimos son: 6 V, caudal de 100 ml/L y la recuperación con menor costo es de 80%-20%. Con un área de contacto de 0.1875 m² de membrana, teniendo la mitad en membrana aniónica y catiónica. Estos datos del experimento se tiene un valor de 0.25 kWh/m³, por lo cual es menor a lo que se aplica en un proceso de osmosis reversa que tiene una energía específica de 0.64 kWh/m³.

Posterior a estos resultados se recomienda hacer un estudio del aprovechamiento del agua que contiene el concentrado y además ver la opción de replicar el estudio mediante una planta piloto para el punto de estudio.

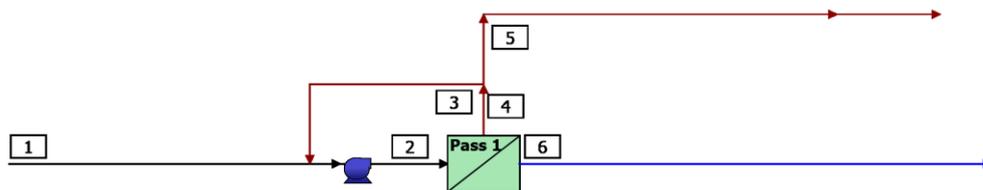
5. INFORMACIÓN ADICIONAL

La información adicional para esta investigación es los resultados ampliados de la simulación del software para la desalinización mediante osmosis inversa.

5.1 Detalle del sistema

#	Description	Flow (m ³ /h)	TDS (mg/L)	Pressure (bar)
1	Raw Feed to RO System	1.13	1,748	0.0
2	Net Feed to Pass 1	1.17	2,038	14.1
3	Concentrate Recycle from Pass 1 to Pass 1	0.05	8,613	10.0
4	Total Concentrate from Pass 1	0.27	8,613	10.0
5	Net Concentrate from RO System	0.23	8,613	10.0
6	Net Product from RO System	0.90	27.40	0.0

5.2 Diagrama del sistema de Osmosis Inversa



5.3 Respuesta de sistema

Característica	Detalle
Tipo de agua	Agua de pozo
Número de elementos	12

Cl ⁻	510.8	510.8	595.3	1,418	2,510	6.55	22.39	10.33
Br ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO ₄ ²⁻	520.6	520.6	607.8	1,454	2,584	2.52	8.60	3.97
PO ₄ ³⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₄ ⁴⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₃ ²⁻	15.00	15.00	14.98	15.64	17.59	14.93	16.01	15.22
d ⁺	1,748	1,748	2,038	4,861	8,613	17.53	58.98	27.40
Cond. μ S/cm	3,001	3,001	3,461	7,671	12,801	35	114	54
pH	7.0	7.0	7.1	7.3	7.5	5.4	5.8	5.5

5.6 Electricidad consumida en el sistema

Peak Power	(kW)	0.6		
Energy	(kWh/d)	13.8		
Electricity Unit Cost	(\$/kWh)	0.0900		
Electricity Cost	(\$/d)	1.2		
Specific Energy	(kWh/m ³)	0.64		
Pump	Flow Rate (m³/h)	Power (kW)	Energy (kWh/d)	Cost (\$/d)
Pass 1				
Feed	1.17	0.58	13.80	1.24
Pass 1 Total		0.58	13.80	1.24
System Total		0.58	13.80	1.24

BIBLIOGRAFÍA

- Adel, M., Nada, T., Amin, S., Anwar, T., & Mohamed, A. A. (2022). Characterization of fouling for a full-scale seawater reverse osmosis plant on the Mediterranean sea: membrane autopsy and chemical cleaning efficiency. *Groundwater for Sustainable Development*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100704>
- Alcamo, J., Flörke, M., & Märker, M. (2007). Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2), 247–275. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.2.247>
- Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 24, pp. 343–356). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.064>
- Alvarez M, & Cifuentes G. (2019). Uso de electrodiálisis para la extracción de litio. *Geo Ingeniería*, 28–31.
- Ankoliya, D., Mudgal, A., Sinha, M. K., Davies, P., Licon, E., Alegre, R. R., Patel, V., & Patel, J. (2021). Design and optimization of electrodiálisis process parameters for brackish water treatment. *Journal of Cleaner Production*, 319. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128686>
- Arnell, N. W. (1999). Climate change and global water resources. *Global Environmental Change*, 9(SUPPL.), S31–S49. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(99\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(99)00017-5)
- Bozgeyik, A., Altay, L., & Hepbasli, A. (2022). A parametric study of a renewable energy based multigeneration system using PEM for hydrogen production with and without once-through MSF desalination. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(74), 31742–31754. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.186>

- Ghaithan, A. M., Mohammed, A., & Hadidi, L. (2022). Assessment of integrating solar energy with reverse osmosis desalination. In *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (Vol. 53). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102740>
- Gmar, S., Helali, N., Boubakri, A., Sayadi, I. B. S., Tlili, M., & Amor, M. ben. (2017). Electrodialytic desalination of brackish water: determination of optimal experimental parameters using full factorial design. *Applied Water Science*, 7(8), 4563–4572. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0609-2>
- Hou, C., Cheng, X., Zhang, X., Zhu, X., Xu, J., Luo, X., Wu, D., & Liang, H. (2022). Effect of ferrous-activated calcium peroxide oxidation on forward osmosis treatment of algae-laden water: Membrane fouling mitigation and mechanism. *Science of The Total Environment*, 160100. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160100>
- Lechuga, J., Rodríguez, M., & Lloveras, J. (2007). *Artículo de Investigación Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica.*
- Li, Y., & Sun, S. (2022). Antifouling enhancement of thin-film composite polyamide reverse osmosis membrane by surface immersion deposition and in-situ crosslinking method with NaAlg-GA hydrogel. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 654. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130140>
- Liu, Y., & Wang, J. (2017). Energy-saving “NF/EDR” integrated membrane process for seawater desalination. Part II. The optimization of ED process. *Desalination*, 422, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.010>
- Massa Sánchez, P., & Fries, A. (n.d.). *Presión demográfica sobre el agua: un análisis regional para Ecuador.* <https://www.researchgate.net/publication/344900976>
- Moreira, F. de S., Lopes, M. P. C., de Freitas, M. A. V., & Antunes, A. M. de S. (2021). Future scenarios for the development of the desalination industry in contexts of water scarcity: A Brazilian case study. *Technological Forecasting and Social Change*, 167, 120727. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2021.120727>
- Roman, M., Roman, P., Verbeke, R., Gutierrez, L., Vanoppen, M., Dickmann, M., Egger, W., Vankelecom, I., Post, J., Cornelissen, E., Keesman, K., & Verliefde, A. (2021). Non-steady diffusion and adsorption of organic micropollutants in ion-exchange membranes: effect of the membrane thickness. *IScience*, 24(2). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102095>
- Sayed, E. T., Olabi, A. G., Elsaid, K., al Radi, M., Alqadi, R., & Ali Abdelkareem, M. (2022). Recent progress in renewable energy based-desalination in the Middle East

- and North Africa MENA region. In *Journal of Advanced Research*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.08.016>
- Schlosser, C. A., Strzepek, K., Gao, X., Fant, C., Blanc, É., Paltsev, S., Jacoby, H., Reilly, J., & Gueneau, A. (2014). The future of global water stress: An integrated assessment. *Earth's Future*, 2(8), 341–361. <https://doi.org/10.1002/2014ef000238>
- Shah, S. R., Wright, N. C., Nepsky, P. A., & Winter, A. G. (2018). Cost-optimal design of a batch electrodialysis system for domestic desalination of brackish groundwater. *Desalination*, 443, 198–211. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.05.010>
- USGS. (1984). *Publications of the U.S. Geological Survey*.
- Vanoppen, M., Blandin, G., Derese, S., le Clech, P., Post, J., & Verliefde, A. R. D. (2016a). Salinity gradient power and desalination. *Sustainable Energy from Salinity Gradients*, 281–313. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100312-1.00009-2>
- Vanoppen, M., Blandin, G., Derese, S., le Clech, P., Post, J., & Verliefde, A. R. D. (2016b). Salinity gradient power and desalination. *Sustainable Energy from Salinity Gradients*, 281–313. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100312-1.00009-2>
- Vera Cabezas, C., & Mayra, L. (2009). Universidad de Oriente. *Tecnología Química*, XXIX(2), 28–33. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543759004>
- Wright, N. C., Shah, S. R., Amrose, S. E., & Winter, A. G. (2018). A robust model of brackish water electrodialysis desalination with experimental comparison at different size scales. *Desalination*, 443, 27–43. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.04.018>
- Yang, Q., Hu, C., Li, J., Yi, X., Zhang, J., & Sun, Z. (2021). Research Status of Brackish Water Desalination Technology. *E3S Web of Conferences*, 329, 01039. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132901039>