



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Generación de energía por gradiente salino en la desembocadura del río Magdalena: un estudio de caso

Karem Johanna Castro Peláez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía
Medellín, Colombia
2019

Power generation by saline gradient at the mouth of the Magdalena river: a study case

Karem Johanna Castro Peláez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía
Medellín, Colombia
2019

Generación de energía por gradiente salino en la desembocadura del río Magdalena: un estudio de caso

Karem Johanna Castro Peláez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería Química

Director (a):

Ph.D., Sergio Hernando Lopera Castro

Línea de Investigación:

Generación de energía, Optimización energética

Grupo de Investigación:

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía

Medellín, Colombia

2019

A Dios y al Universo, así como a todas las personas maravillosas que han hecho parte de mi vida.

“Sólo con el corazón se puede ver bien, lo esencial es invisible a los ojos,”

Saint Exupéry – El Principito

Agradecimientos

Son muchas personas a quienes debo agradecer en cada etapa de este proyecto de vida.

A mis padres académicos y mentores Juan Manuel Vélez Restrepo y Gabriel Hernán Uribe, que sin sus palabras de aliento, regaños y conversaciones enriquecedoras no habría logrado cerrar este ciclo.

A Sergio Hernando Lopera Castro, mi director de Tesis, sin su apoyo y confianza esto no sería una realidad.

A Carlos Ignacio Sánchez quién me abrió las puertas del grupo GRIEQUI para obtener los datos necesarios para desarrollar este proyecto.

A Farid Chejne Hanna, por sus palabras de aliento y el saludo amable todos los días a las 7:00 a.m. cuando pudimos tener conversaciones esclarecedoras.

A Pedro Nel Benjumea quien siempre me respaldó y confió en mi labor desde el 2015, quien me hizo pensar en retomar y culminar mis estudios.

Al Consejo Superior Universitario que me brindó el reingreso para finalizar mis estudios de maestría con la entrega de este proyecto.

A mis amigos Mateo Roldán, Juan Carlos Maya, Robert Macías, Carlos Ceballos, quienes siempre me brindaron apoyo, consejos e información relevante en los momentos que no encontraba solución a mis inquietudes, y quienes me brindaron valiosas charlas y asesorías.

A mi amigo del alma Juan Felipe Parra, quien siempre ha estado a mi lado para apoyarme en lo académico como en lo emocional.

A Astrid Eliana Sánchez, que siempre me ha seguido y apoyado en todas mis locuras.

A todos mis amigos, familiares y personas que han sido parte de mi vida, sin ustedes no sería quién soy, y su paciencia y comprensión fue el mejor apoyo que nunca pude soñar.

A todo aquel que olvide escribir, discúlpeme por la omisión, pero con toda seguridad el agradecimiento estará de corazón.

Resumen

Se presenta un caso de estudio de la generación de energía por gradiente salino en la desembocadura del río Magdalena, en el que se realiza una propuesta de dimensionamiento para una capacidad instalada de 200 kW por contenedor, en el cual se realiza un análisis exergético del sistema para estimar la eficiencia energética de este tipo de generación de energía, y la evaluación de cambio de concentraciones en la descarga del agua, de tal forma que se hace la estimación del número de contenedores que podrían ser utilizados sin realizar cambios superiores al 1% en las condiciones de concentración salina y 1°C en la biota marina.

Palabras clave: Gradiente salino, Energía azul, Electrodiálisis Inversa (RED), Exergía

Abstract

A case study of the generation of energy by saline gradient at the mouth of the Magdalena River is presented, in which a sizing proposal is made for an installed capacity of 200 kW per container, in which an exergy analysis of the system is carried out to estimate the energy efficiency of this type of energy generation, and the evaluation of change in concentrations in the water discharge, in such a way that the estimation of the number of containers that could be used without making changes greater than 1% in the conditions of saline concentration and 1°C in marine biota.

Keywords: Saline gradient, Blue energy, Reverse Electrodialysis (RED), Exergy

Contenido

| | |
|---|------------|
| Resumen..... | XI |
| Lista de figuras..... | XIV |
| Lista de tablas..... | XV |
| Introducción..... | 1 |
| 1. ENERGÍA DE GRADIENTES SALINOS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA SU APROVECHAMIENTO EN LA DESEMBOCADURA DEL RÍO MAGDALENA..... | 3 |
| 1.1 El potencial de la Energía de Gradientes Salinos..... | 4 |
| 1.2 Electrodiálisis Inversa..... | 8 |
| 1.2.1 Modelo Físico de Base Fenomenológica..... | 10 |
| 1.3 Energía del Gradiente Salino en Colombia..... | 15 |
| 1.3.1 Caso de estudio: Desembocadura del río Magdalena..... | 15 |
| 2. MODELO PARA LA DESCARGA DE AGUA AL OCÉANO..... | 23 |
| 2.1 Balance de materia..... | 23 |
| 2.2 Balance de momentum..... | 29 |
| 2.3 Datos de entrada de la simulación..... | 33 |
| 2.4 Método de solución..... | 39 |
| 2.5 Resultados..... | 41 |
| 3. BALANCE DE EXERGÍA..... | 47 |
| 3.1 Balance de energía para la descarga en el océano..... | 48 |
| 3.2 Balance de Exergía para el volumen de control propuesto..... | 50 |
| 4. Conclusiones y recomendaciones..... | 57 |
| 4.1 Conclusiones..... | 57 |
| 4.2 Recomendaciones..... | 58 |
| Bibliografía..... | 61 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1-1: Densidad de energía (MJ/(m ³ /s)) de diferentes desembocaduras en el mundo..... | 5 |
| Figura 1-2. Diagrama de operación de Electrodiálisis Inversa (RED). | 9 |
| Figura 1-3. Unidad básica de un equipo de electrodiálisis inversa..... | 10 |
| Figura 1-4. Contenedor con 6 pilas de electrodiálisis inversa. | 16 |
| Figura 1-5. Prototipo construido en Colombia y diagrama de empaques de silicona. | 17 |
| Figura 1-6. Perfil de concentraciones en un Equipo de Electrodiálisis inversa operando con salinidades del mar Caribe y el río Magdalena. | 20 |
| Figura 2-1 Eje de coordenadas elegido para la simulación. (W= 0.51Km, L=1,1)..... | 25 |
| Figura 2-2. Esquema del balance de materia en un elemento de mar. | 26 |
| Figura 2-3. (a) Entradas y salidas de y-momentum y (b) fuerzas en x | 30 |
| Figura 2-4. Contornos de salinidad para a) $t=9$ min, b) $t=25$ min y c) $t=\infty$ (1 <i>stack</i>)..... | 41 |
| Figura 2-5. Contornos de a) velocidad media u y b) vorticidad en estado estacionario (1 <i>stack</i>). | 42 |
| Figura 2-6. Evolución de la fracción de área superficial cuya salinidad varía en más de 1% respecto a la salinidad inicial (1 <i>stack</i>). | 43 |
| Figura 2-7. Contornos de salinidad en estado estacionario para a) 20, b) 40, c) 60 y d) 100 <i>stacks</i> | 44 |
| Figura 2-8. Dependencia del área fraccional afectada con el número de <i>stacks</i> | 45 |
| Figura 3-1. Diagrama de proceso. (1) Succión en el mar; (2) succión en el río; y (3) descarga en el mar. Elaboración propia. | 48 |
| Figura 3-2. Trabajo de bombeo para diferentes configuraciones. | 54 |
| Figura 3-3. Eficiencia exergética para diferentes configuraciones. | 55 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1-1. Parámetros para el escalado y el dimensionamiento de la planta. | 16 |
| Tabla 1-2. Dimensiones para los materiales de cada contenedor. | 18 |
| Tabla 1-3. Parámetros para la solución del modelo de electrodiálisis inversa. | 19 |
| Tabla 1-4. Cambios en salinidad en el equipo de RED. | 20 |
| Tabla 2-1. Parámetros usados para calcular la velocidad del agua en la superficie | 35 |
| Tabla 2-2. Resumen de datos de entrada en la simulación | 38 |
| Tabla 3-1. Parámetros usados para calcular el trabajo de bombeo..... | 53 |
| Tabla 3-2. Resultados del balance de exergía. | 54 |

Introducción

Particularmente en Colombia la energía azul tiene un gran potencial de aplicación debido a la abundancia de agua de mar y de agua dulce proveniente de numerosos ríos, entre los que se destacan los ríos Sinú, Atrato y Magdalena. El grupo de investigación OCEANICOS de la Universidad Nacional de Colombia, ha realizado estudios detallados del potencial teórico de generación de energía por gradiente de salinidad en Colombia donde se determinó la variabilidad estacional e interanual del potencial en las desembocaduras de los ríos Magdalena, Canal del Dique, Atrato y León, los cuales suman en total el 95% de caudal de agua dulce descargado al Mar Caribe colombiano. De estos estudios se concluye que hay un potencial medio, de 15.6 GW en Colombia y solo para el río León hay un potencial medio de 14.2 MW, donde sería posible la generación de 111 GWh al año [10]. Si existieran plantas que explotaran el potencial energético del gradiente salino en Colombia, sería posible la generación de aproximadamente 113000 GWh al año.

De aquí que sea necesario revisar las condiciones reales a través de un caso de estudio donde se evalúe la eficiencia exergética para la generación de energía por gradiente salino en la desembocadura del río Magdalena (Bocas de Ceniza – Colombia).

Para esta evaluación se hace necesario establecer las variables críticas en el proceso de generación de energía por Gradiente Salino, seleccionar la opción tecnológica que permita el aprovechamiento del Gradiente Salino para el caso de la desembocadura del río Magdalena (Bocas de Ceniza - Colombia) y con dicha información poder proponer un

modelo exergético que permita determinar la configuración óptima (número de contenedores) de la opción tecnológica seleccionada.¹

Dado que aún no se cuentan con equipos de generación de energía por gradiente salino de forma comercial, se hace necesario realizar aproximaciones a través de los casos “industriales” que se encuentran documentados en la literatura. Esto aplicado para las bombas, los filtros y los arreglos de stacks.

Este estudio brindará estimaciones concluyentes para revisar la viabilidad energética de este tipo de generación, así como de la eficiencia exergética y las irreversibilidades asociadas a la generación de energía por gradiente salino.

Los sistemas de ecuaciones aquí presentados se resolvieron usando el software MATLAB y el ode 15S para ecuaciones diferenciales.

El modelo desarrollado para el caso de estudio se constituye de los siguientes modelos:

- Un modelo que permite conocer el potencial de cada stack y su perfil de concentración, es decir, un perfil de concentraciones y generación de energía por celda.
- Un modelo de afectación con respecto a la salinidad a la descarga de agua en el océano. Esto brindará un arreglo “óptimo” en términos de salinidad a la descarga en el mar.
- Un modelo de desempeño del sistema completo en cuanto a la generación de energía y eficiencia exergética para diferentes configuraciones (número de contenedores), para determinar la configuración “óptima”, teniendo en cuenta la afectación del cambio de salinidad a la descarga.

¹ El contenedor al que se hace referencia, es el contenedor metálico de transporte de carga, en el cual se hizo un arreglo de 6 stacks (arreglo de celdas) para la generación de energía por gradiente salino.

1. ENERGÍA DE GRADIENTES SALINOS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA SU APROVECHAMIENTO EN LA DESEMBOCADURA DEL RÍO MAGDALENA

La creciente demanda energética mundial, aunado al hecho que el planeta cuenta con recursos naturales finitos, hace necesaria la búsqueda de fuentes de energía que diversifiquen y complementen las que se tienen actualmente. A partir de este concepto, las fuentes renovables de energía como el sol y el viento han despertado gran interés alrededor del mundo y cada vez se posicionan más en los mercados energéticos de países desarrollados, principalmente. Su mayor atractivo es que se encuentran en sintonía con los ciclos y los procesos naturales, permitiendo un aprovechamiento del recurso sin afectar, en un principio, su disponibilidad.

Pero no por lo expresado en el anterior concepto se pueda aceptar el crecimiento de demanda energética, sino por el contrario se debería replantear el consumo de manera eficiente y hacer reducciones del mismo.

Tradicionalmente se han considerado la energía fotovoltaica y la energía eólica, no obstante, existen diversas formas de energía renovable como la geotérmica, oceánica, entre otras. Los océanos cubren más del 70% de la superficie de la tierra y, según datos recientes, alrededor del 40% de la población mundial vive a menos de 100 km de la costa [1]; por lo tanto, la energía oceánica puede jugar un papel fundamental en el desarrollo sostenible y sustentable de las sociedades en el futuro cercano, teniendo en cuenta que casi nada de lo que el hombre hace es sostenible o sustentable..

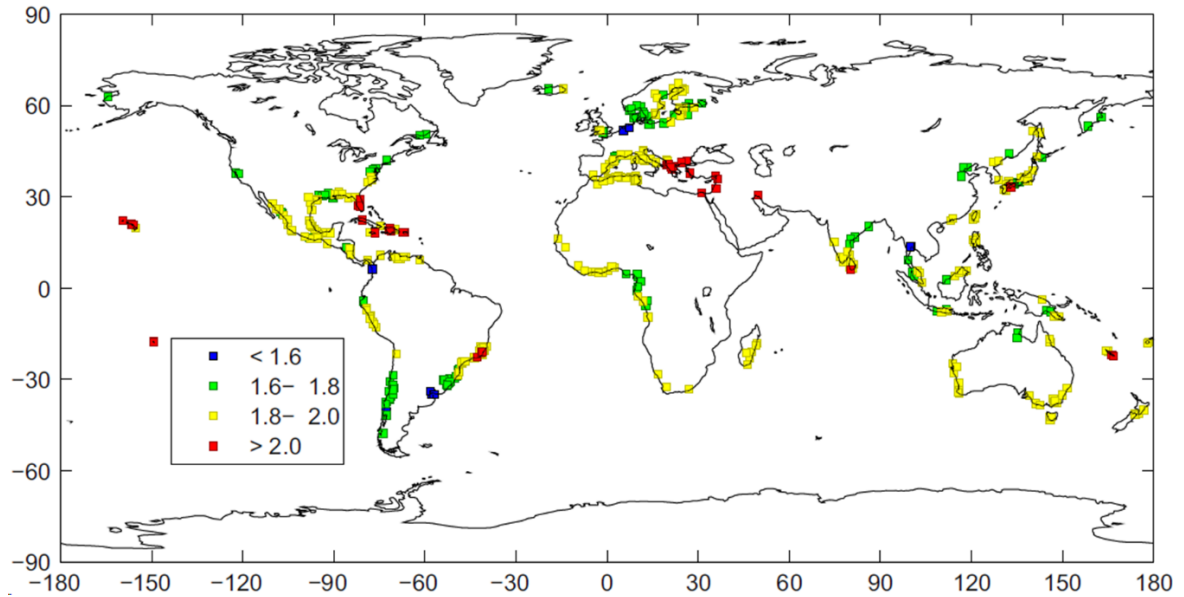
La energía oceánica se manifiesta en diversas formas, si bien las más conocidas son las mareas y las olas, las corrientes oceánicas, los gradientes térmicos y los gradientes salinos también hacen parte de la energía renovable oceánica; siendo estos últimos los menos estudiados [2].

En el caso de colombiano, aunque el país tiene costa en el océano pacífico y en el mar Caribe, la energía oceánica no hace parte de las fuentes en las que está basado el sistema energético; el cual se compone en un 70% por hidroeléctricas, 25% por termoeléctricas y 5% por otras fuentes de energía. La energía renovable (Eólica y solar) representa menos del 1% de la matriz energética del país [3]. En este sentido, la diversificación de las fuentes y la disminución de la dependencia en las termoeléctricas (responsables del 100% de las emisiones de CO₂ del Sistema de Interconexión Nacional (SIN) en el caso del sistema energético colombiano), se debe lograr paulatinamente mediante la inclusión de fuentes renovables de energía aprovechando los recursos naturales del país.

1.1 El potencial de la Energía de Gradientes Salinos

La energía azul o energía por gradiente salino (EGS) es una de las denominadas “nuevas fuentes renovables de energía” que ha ganado terreno en los últimos años. Cuando el río llega al mar, se mezclan y se libera energía debido a la diferencia de potencial químico entre las dos soluciones. En estudios recientes se encontró que el potencial de la energía por gradiente salino en el mundo es de 625 TWh/año [4], correspondiendo al 3% de la demanda energética mundial y siendo el golfo de México, el mar Caribe y el mar Mediterráneo los lugares con mayor factibilidad técnica para aprovechar dicho potencial (Ver **Figura 1-1**).

Figura 1-1: Densidad de energía (MJ/(m³/s)) de diferentes desembocaduras en el mundo.



Fuente: Tomado de [4].

El proceso espontáneo de mezclado en las desembocaduras de los ríos ocurre de forma tal que se podría considerar adiabática dado que se da a presión y temperatura casi constante. Motivo por el cual en el caso de estudio se utiliza la mezcla “ideal” para resolver el modelo, teniendo en cuenta que al tratarse de concentración salina no es una mezcla “ideal”. Por tanto, se describe, desde la termodinámica, como el cambio de la energía libre de Gibbs entre los estados iniciales (Mar y Río) y el estado final (Mezcla). Desde la primera ley de la termodinámica se puede expresar matemáticamente así:

$$\Delta G_{mezclado} = G_{Mezcla} - (G_{Río} + G_{Mar}) \tag{1.1}$$

En la literatura EGS, se ha aceptado considerar soluciones ideales para el caso de mar y río, debido a que las concentraciones son relativamente bajas [5]–[7]. Por otro lado, el cambio de la temperatura en el mezclado es bajo (0.17 K según cálculos en [5]), y el proceso de mezclado se analiza como adiabático. Lo anterior, implica que no hay efecto de calor representativo en el mezclado y, por tanto, se aproxima a una mezcla ideal. Para calcular el cambio de la energía libre se tiene que:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \cong -T\Delta S \tag{1.2}$$

Por tanto, la energía libre liberada es proporcional a la temperatura (T) a la cual ocurre el proceso y al cambio de entropía (ΔS). Así, el cálculo de la energía libre de cada fase se calcula a partir de la Ecuación (1.3).

$$G_k = -T_k S_k \quad (1.3)$$

Donde el subíndice k hace referencia a las fases mezcla (M), río (R) y mar (S). La entropía de cada fase en una mezcla ideal se calcula mediante la Ecuación (1.4).

$$S = -NR \sum_i (x_i \ln x_i) \quad (1.4)$$

En la que N corresponde a las moles totales de la solución (mol/s), R es la constante universal de gases (8.314 J/mol.K) y x_i hace referencia a la fracción molar de cada componente de la solución. En la teoría de los gradientes salinos es común asociar toda la salinidad del mar y el río a la presencia de cloruro de sodio, por tanto, el subíndice i puede ser H_2O , Na^+ , Cl^- . Para el cálculo de las moles totales de la solución:

$$N = mV_{solución} \quad (1.5)$$

Siendo m la cantidad total de moles por unidad de volumen de solución (mol/ m^3), las cuales se calculan con la Ecuación (1.6).

$$m = \frac{\rho_{solución}}{M_{H_2O}} \times 1000 \quad (1.6)$$

En este caso, ρ hace referencia a la densidad de la solución ($\sim 1000 \text{ kg/ m}^3$), y M_{H_2O} la masa molar del agua (18.02 gr/mol $_{H_2O}$). Para este cálculo se toma la densidad de la solución como equivalente a la del agua, ya que el contenido de sal es relativamente bajo (35 g/l para el caso de estudio).

Dado que el cloruro de sodio es un electrolito 1:1, los cálculos se pueden simplificar haciendo sólo la distinción de la fracción molar de los iones y el agua (A). Luego, para el caso del río y mar, las moles de los iones y del agua se pueden calcular a partir de las Ecuaciones (1.7) y (1.8), respectivamente.

$$n_{iones,k} = 2C_k V_k \quad (1.7)$$

$$n_{A,k} = N - n_{iones,k} \quad (1.8)$$

Donde C_k y V_k corresponde a la concentración (mol/ m³) y el volumen (m³), respectivamente. En este caso, de la fase k : Mar (S) o Río (R).

Para la mezcla se consideran volúmenes aditivos. La concentración, las moles para los iones y el agua se calculan a partir de las Ecuaciones (1.9) – (1.11), respectivamente.

$$C_M = \frac{C_S V_S + C_R V_R}{V_S + V_R} \quad (1.9)$$

$$n_{iones,M} = 2(C_S V_S + C_R V_R) \quad (1.10)$$

$$n_{A,M} = 2N - n_{iones,S} - n_{iones,R} \quad (1.11)$$

El cálculo de las fracciones molares de los iones y el agua en cada fase se obtienen mediante las Ecuaciones (1.12) y (1.13), respectivamente.

$$x_{ion,k} = \frac{n_{ion,k}}{n_{ion,k} + n_{A,k}} \quad (1.12)$$

$$x_{A,k} = 1 - x_{ion,k} \quad (1.13)$$

Finalmente, el cálculo de la energía libre de Gibbs para cada fase se realiza con las Ecuaciones (1-14) – (1.16).

$$G_M = T_M m V_M R \left((x_{ion,M} \ln x_{ion,M}) + (x_{A,M} \ln x_{A,M}) \right) \quad (1.14)$$

$$G_R = T_R m V_R R \left((x_{ion,R} \ln x_{ion,R}) + (x_{A,R} \ln x_{A,R}) \right) \quad (1.15)$$

$$G_S = T_S m V_S R \left((x_{ion,S} \ln x_{ion,S}) + (x_{A,S} \ln x_{A,S}) \right) \quad (1.16)$$

Para el caso más general en el que se consideren volúmenes y temperaturas iguales, la energía liberada en el proceso de mezclado se obtiene reemplazando las Ecuaciones (1.14) – (1.16) en la Ecuación (1.2). Dado que para el caso de mar y río las soluciones están a bajas concentraciones, relativamente, es posible desprestigiar el aporte de la fracción de agua a la energía libre de Gibbs de mezclado; estudios han demostrado que con esta aproximación se obtienen resultados con errores de menos del 1%. Finalmente, se llega a la expresión:

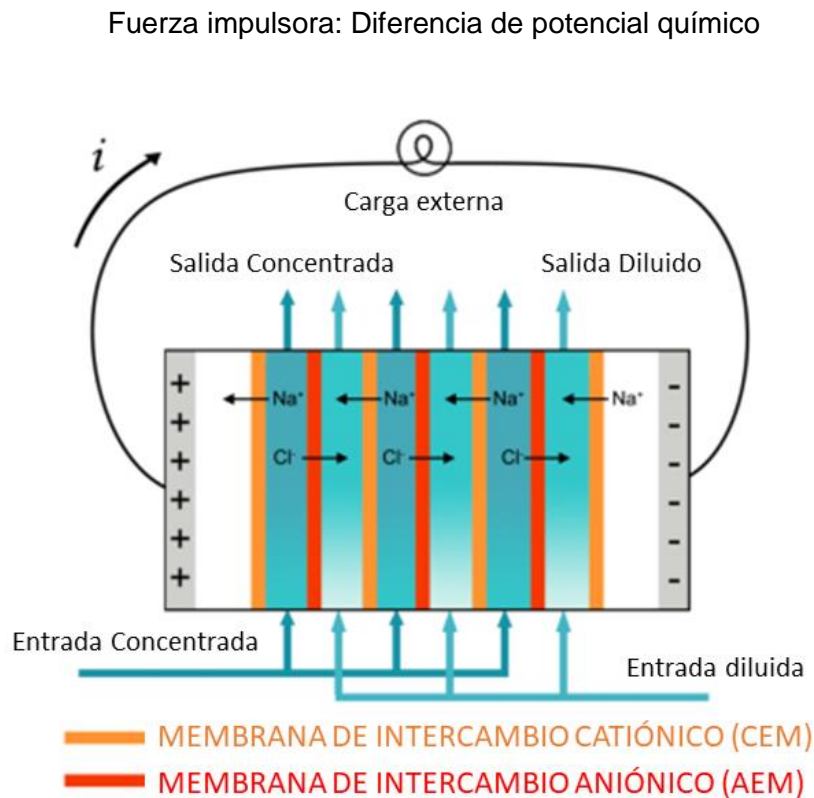
$$\Delta G_{mezclado} = mTVR[2(x_{ion,M} \ln x_{ion,M}) - (x_{ion,S} \ln x_{ion,S}) - (x_{ion,R} \ln x_{ion,R})] \quad (1.17)$$

La anterior es una expresión que permite calcular la energía libre de Gibbs liberada en el proceso de mezclado entre dos soluciones salinas de diferente concentración.

1.2 Electrodiálisis Inversa

La electrodiálisis inversa – RED, por sus siglas en inglés, es una tecnología basada en membranas de intercambio iónico (IEM, por sus siglas en inglés), tanto de intercambio aniónico, como de intercambio catiónico (AEM y CEM, respectivamente), las cuales tienen cargas fijas en su matriz, permitiendo el paso de los iones con carga opuesta (Contra-iones) y repeliendo los iones con carga del mismo signo al de las cargas en la matriz (Co-iones). En los años recientes ha aumentado su estudio ya que, junto con la Ósmosis Retardada por Presión – PRO, es una de las tecnologías en mayor grado de avance para el aprovechamiento de la energía del gradiente salino [8]–[10].

Un equipo de RED consiste en una pila de IEMs ubicadas de forma alternada, de esta forma se crean compartimientos entre ellas; si a su vez, aguas de diferente salinidad (Concentrada y diluida) fluyen de forma alternada entre tales compartimientos, la diferencia de concentración hará que los iones se muevan desde el agua de mayor concentración hacia el agua de menor concentración de sal (Ver **Figura 1-2**).

Figura 1-2. Diagrama de operación de Electrodiálisis Inversa (RED).

Fuente: Adaptado de [11].

El movimiento de iones debido a la diferencia de potencial químico, sumado a la “exclusión de Donnan” efectuada por las IEMs resulta en una corriente de iones en la que los aniones se mueven en un sentido y los cationes en el sentido contrario [12]; así, para el caso ideal de las AEM, que tiene cargas fijas positivas, los aniones podrán pasar a través de la membrana, mientras que los cationes son repelidos. Similarmente, las CEM permiten el paso de los cationes y repelen los aniones. Tal proceso induce un campo eléctrico cuya energía es convertida en electricidad mediante reacciones de oxidación-reducción en electrodos ubicados en los extremos del equipo.

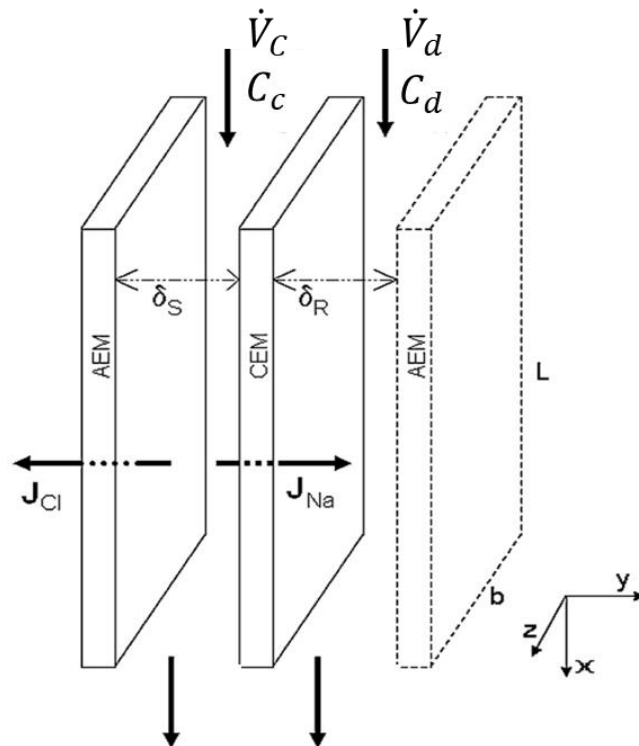
Los avances recientes de la tecnología RED han llevado a la evaluación a escala de plantas piloto. La primera en su tipo se encuentra en Sicilia-Italia, la cual aprovecha gradientes salinos entre salmuera y agua salobre (200 g/L y 2 g/L, aproximadamente) para la obtención de electricidad, dicha planta tiene una capacidad instalada de 1 kW y produce 330 W cuando se opera en aguas reales [13], [14]. Similarmente, en 2014 inició la operación de la planta piloto basada en RED de la compañía REDStack® en Holanda,

cuya capacidad instalada es de 50 kW, en este caso, funciona con agua de río y agua de mar (30 g/L y 1 g/L, aproximadamente) [13], [15]. La última planta piloto con estudios publicados se encuentra en Corea del Sur, en la cual se aprovechan de aguas residuales para generar energía. Se ha reportado una producción de 95.8 W para este piloto [16].

1.2.1 Modelo Físico de Base Fenomenológica

Un equipo de RED se puede analizar a partir de una unidad básica denominada celda, la cual está compuesta por una AEM, una CEM y dos canales (uno para cada tipo de agua), como se muestra en la **Figura 1-3**.

Figura 1-3. Unidad básica de un equipo de electrodiálisis inversa.



Fuente: Adaptado de [17].

La representación anterior muestra que los canales por donde fluyen las aguas, son formados por un par de IEMs, en la **Figura 1-3** se añade una AEM en líneas puenteadas, para mostrar que el canal del río (en este caso), está delimitado por una membrana adyacente que, a su vez, es una de las membranas de la siguiente celda. La repetición de

la unidad básica constituye una pila de RED que, a escala de laboratorio, puede contener entre 5-50 celdas [10], [18], [19].

Para obtener los perfiles de salinidad se simplificó el modelo propuesto por Veerman et.al [17], el cual se realiza sobre una celda. Las suposiciones, en este caso, son las siguientes:

- Estado estacionario.
- Operación Co-corriente.
- Membranas a las que solo la atraviesan los iones, es decir, el flux neto de agua es cero.
- La concentración en la dirección “y” y “z” es homogénea.
- La conductividad molar de las soluciones se supone constante y se establece para las concentraciones a la entrada del equipo.
- Se desprecia el aporte de los compartimientos de los electrodos a la resistencia total., ya que la resistencia es significativamente mayor en el arreglo de membranas e incluso incrementa conforme se aumenta el número de celdas.
- Los canales entre membranas no contienen espaciadores ni promotores de turbulencia.
- La salinidad de las aguas se debe exclusivamente a la presencia de cloruro de sodio.

La conversión de salinidad a concentración molar se hace con base en la Ecuación (1.18):

$$C_{NaCl} = \frac{U}{M_{NaCl}} \times 1000 \quad (1.18)$$

Donde U (g/L) es la salinidad del agua y M_{NaCl} (g_{NaCl}/mol_{NaCl}) corresponde a la masa molar del cloruro de sodio. El factor 1000 se agrega para expresar la concentración en unidades del SI, es decir, en mol_{NaCl}/m^3 .

El desarrollo del modelo se divide en 2 secciones principales, una que corresponde a la termodinámica de soluciones y la otra que corresponde a los fenómenos propios de la electrodiálisis inversa.

Termodinámica de soluciones electrolíticas y cálculo de propiedades

Al no ser soluciones ideales, se debe considerar la actividad de cada uno de los componentes de la solución. Para el cálculo de los coeficientes de actividad se usó el modelo extendido de Debye-Huckel, Ecuación (1.19), el cual funciona hasta para salinidades cercanas a la del mar [20].

$$\gamma(x) = \exp \left[\frac{-0.51z^2\sqrt{I(x)}}{1+(A/305)\sqrt{I(x)}} \right] \quad (1.19)$$

En este caso I es la fuerza iónica, A el radio hidratado y z es la valencia de cada ion. El cálculo de la fuerza iónica se hace a partir de la Ecuación (1.20).

$$I(x) = \frac{C(x)}{1000} \quad (1.20)$$

La conductividad molar Λ_m (S.m²/mol) de las soluciones se consideran constantes, y con un valor correspondiente a la del mar en la entrada del equipo. Se calcula a partir de la Ecuación (1.21).

$$\Lambda_m = \frac{k}{C} \quad (1.21)$$

Donde k (S/m) y C (mol/m³) son la conductividad eléctrica y la concentración molar de cada tipo de agua, respectivamente.

Fenómenos de transporte en la electrodiálisis inversa

Consecuencia del movimiento de iones y su paso a través de las membranas, las soluciones en ambos lados de cada membrana se polarizan, por tanto, existe una diferencia de potencial en la AEM y la CEM [20]. La suma del voltaje en ambas membranas será el voltaje generado por la celda, cuyo cálculo se hace a partir de la Ecuación (1.22), la cual se deduce a partir de la ecuación de Nernst, en la que se igualan potenciales electroquímicos.

$$E_{celda}(x) = \alpha_{CEM} \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{\gamma_{Na}^S(x) C_S(x)}{\gamma_{Na}^R(x) C_R(x)} \right) + \alpha_{AEM} \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{\gamma_{Cl}^S(x) C_S(x)}{\gamma_{Cl}^R(x) C_R(x)} \right) \quad (1.22)$$

Donde α es la permselectividad de la membrana, R (J/mol.K) es la constante universal gases, T (K) es la temperatura de operación, γ es el coeficiente de actividad del ion y F (C/mol) es la constante de Faraday. Cada término en la ecuación corresponde a la contribución de cada tipo de IEM al voltaje de la celda. En el caso de una pila de RED, el voltaje total será la suma de los voltajes de cada celda.

Dado que el transporte de iones es un fenómeno eléctrico, se deben considerar las resistencias en el sistema, las cuales vienen dadas por efectos óhmicos y no óhmicos [19]. En este modelo solo se consideran las resistencias óhmicas asociadas a cada una de las membranas y a los compartimientos de las aguas. Esta es una suposición adecuada en la práctica, ya que se ha encontrado que los efectos de la polarización por concentración se reducen a las velocidades de flujo típicas de operación (0.8-1 cm/s) en la electrodiálisis inversa [14], [21], [22]. Las resistencias óhmicas se encuentran en serie (Según las leyes de Kirchoff). El cálculo de la resistencia de la celda se presenta en la Ecuación (1.23).

$$R_{celda}(x) = R_S(x) + R_R(x) + R_{AEM} + R_{CEM} \quad (1.23)$$

Donde los términos R_S y R_R [$\Omega \cdot m^2$] corresponden a la resistencia del compartimiento del agua de mar y de río, respectivamente, y los términos R_{AEM} y R_{CEM} a las resistencias de área de las membrana aniónica y catiónica, cuyo valor es provisto por el fabricante. La resistencia en los compartimientos se calcula a partir de las Ecuaciones (1.24) y (1.25).

$$R_S(x) = \frac{\delta_S}{A_m C_S(x)} \quad (1.24)$$

$$R_R(x) = \frac{\delta_R}{A_m C_R(x)} \quad (1.25)$$

Donde δ [m] es el espesor del compartimiento.

El movimiento de iones es una corriente, la cual se expresa por unidad de área de transferencia de membranas. Esta densidad de corriente de iones j (A/m^2) se calcula a partir de las ecuaciones para circuitos eléctricos, mediante la siguiente expresión.

$$j(x) = \frac{E_{Celda}(x)}{2R_{Celda}(x)} \quad (1.26)$$

Por otro lado, el Flux de sal ocurre debido a transporte por migración y difusión de iones, por lo tanto, su cálculo se realiza sumando la contribución de cada tipo de transporte [23].

$$J_{Na^+}(x) = \frac{j(x)}{F} + \frac{D_{NaCl}}{\delta_m} [C_S^{Na^+}(x) - C_R^{Na^+}(x)] \quad (1.27.a)$$

$$J_{Cl^-}(x) = \frac{j(x)}{F} + \frac{D_{NaCl}}{\delta_m} [C_S^{Cl^-}(x) - C_R^{Cl^-}(x)] \quad (1.28.b)$$

Siendo D_{NaCl} (m^2/s) el coeficiente de difusión del cloruro de sodio en el agua, que se toma como constante y con un valor de $1.3e^{-11}$ m^2/s . El primer término de la Ecuación (1.27) corresponde al transporte por migración, mientras el segundo describe el transporte por difusión [24].

Finalmente, los balances de masa de sal para el compartimiento del agua de mar y compartimiento el del agua de río se presentan en las Ecuaciones (1.28) y (1.29), respectivamente.

$$\frac{d}{dx} C_S(x) = -\frac{b}{\dot{V}_S} J_{NaCl}(x) \quad (1.29)$$

$$\frac{d}{dx} C_R(x) = \frac{b}{\dot{V}_R} J_{NaCl}(x) \quad (1.30)$$

Las Ecuaciones (1.19) – (1.27) constituyen el modelo de un equipo de RED para calcular los cambios de concentración en la dirección de los flujos mediante las Ecuaciones (1.28) y (1.29). El modelo presentado aquí cubre los fenómenos básicos ocurridos en un equipo RED, sin embargo, omite fenómenos de transporte de agua (Tanto ósmosis como electroósmosis) que disminuirían el cambio de salinidad del agua de mar, también se deja a un lado las pérdidas de potencia por circuitos cortos en el compartimiento de agua de

mar, principalmente, las cuales se pueden disminuir con diseños adecuados de los equipos RED, tema que se sale del alcance de esta tesis.

1.3 Energía del Gradiente Salino en Colombia

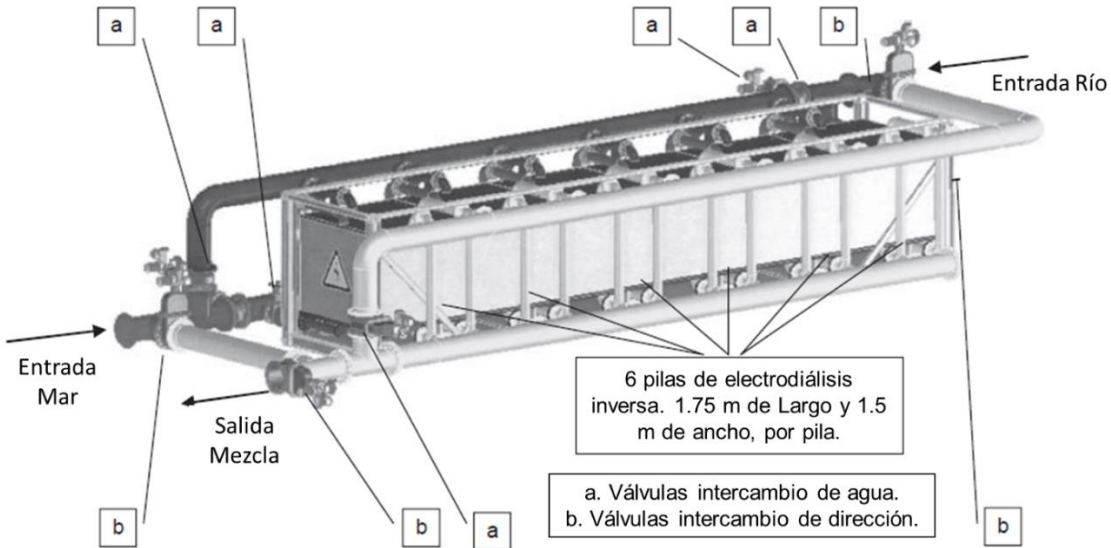
En el caso puntual de Colombia, las desembocaduras de los ríos Magdalena, Atrato y León, son los sitios estudiados con mayor potencial, no obstante, se estima que el 90% del potencial de aprovechamiento del gradiente salino en desembocaduras de ríos del país se encuentra Bocas de Ceniza, lugar el donde Río Magdalena llega al Mar Caribe y se encuentran salinidades de 0.0634 ± 0.0002 g/l y 36.3 ± 0.1 g/l, respectivamente; estableciéndose un gradiente de 36.2 ± 0.1 g/l [25].

1.3.1 Caso de estudio: Desembocadura del río Magdalena

Como se mencionó en secciones pasadas, el aprovechamiento de la EGS a partir de RED está en fase piloto con capacidades instaladas del orden de kilovatios y, por tanto, estudios sobre el escalado a una planta de mayor capacidad no son muy comunes en la literatura.

Dimensionamiento

En esta sección se presentan cálculos básicos para una planta de 200 kW (1 contenedor), los cuales están basados en lo publicado por Post et. al [15]. Se consideran unidades modulares de 6 pilas (también llamadas “Stacks”), las cuales podrían ser replicables para aumentar la capacidad de una potencial planta de generación de electricidad, así, en caso de una planta de 400 kW se tendrían 2 contenedores y un total de 12 pilas. Las ventajas de esta configuración es que el mantenimiento por ensuciamiento de membrana o por cualquier tipo de falla se puede hacer por separado, sin comprometer la totalidad de la capacidad instalada de la planta generadora. La **Figura 1-4** muestra el sistema descrito anteriormente, y que será tomado como referencia para dimensionar una unidad de generación RED en la desembocadura del río Magdalena.

Figura 1-4. Contenedor con 6 pilas de electrodiálisis inversa.**Tabla 1-1.** Parámetros para el escalado y el dimensionamiento de la planta.

| Parámetro | Símbolo | Cantidad | Unidad |
|--------------------------------|-----------------------------------|----------|-------------------|
| Capacidad Instalada | C_I | 200 | kW |
| Número de pilas (Stacks) | N_{stack} | 6 | -- |
| Número de contenedores | N_{Cont} | 1 | -- |
| Flujo de Mar (Igual al de Río) | $\dot{V} = \dot{V}_S = \dot{V}_R$ | 720 | m ³ /h |
| Longitud de la pila | L | 1.75 | m |
| Ancho de la pila | b | 1.5 | m |
| Número de celdas por stack | N_{Celdas} | 3175 | -- |

A partir de los valores presentados en la tabla anterior, es posible cuantificar las cantidades de material para utilizar en un contenedor. Las Ecuaciones (1.30) – (1.33) muestran la forma de calcular el área de membranas y empaques de silicona para apilar las membranas.

$$A_{IEM,cont} = \frac{C_I}{P_d} + LbN_{stack} \quad (1.31)$$

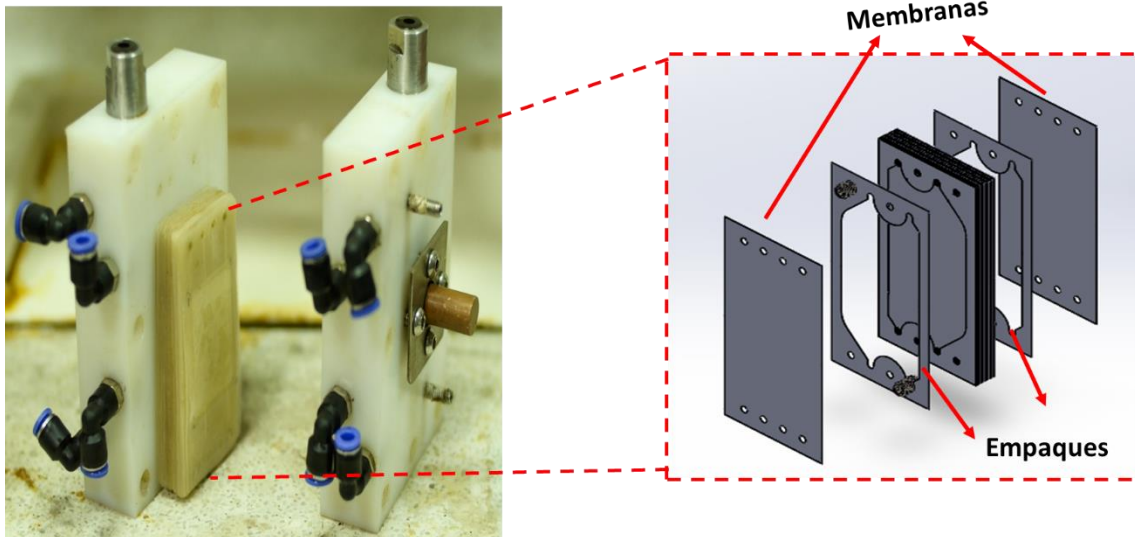
$$A_{CEM,cont} = \frac{A_{IEM,cont} - LbN_{stack}}{2} \quad (1.32)$$

$$A_{AEM,cont} = A_{CEM,cont} + LbN_{stack} \quad (1.33)$$

$$A_{Emp,cont} = 0.2 (A_{IEM,cont} + 2LbN_{stack}) \quad (1.34)$$

Donde A hace referencia al área requerida (m²). En este análisis se supone una pila con la membrana auxiliar (ver sección **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**1.2.1) del tipo de intercambio aniónico, por eso los términos aditivos en las Ecuaciones (1.30) – (1.33); en el caso de los empaques, el factor 2 se agrega para considerar los empaques entre las placas distribuidoras de cada Stack y la primera y última membrana apilada, además, sólo se requiere un 20% del área de las membranas para sellar, debido a que es un espacio abierto por el que fluyen las aguas, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 1-5. Prototipo construido en Colombia y diagrama de empaques de silicona.



Fuente: Adaptado de [8].

Similarmente, se puede cuantificar el área de material para cada stack, como se muestra en las Ecuaciones (1.34) y (1.36).

$$A_{IEM,stack} = \frac{A_{IEM,planta}}{N_{stack}} \quad (1.35)$$

$$A_{CEM,stack} = \frac{A_{CEM,planta}}{N_{stack}} \quad (1.36)$$

$$A_{AEM,stack} = \frac{A_{AEM,planta}}{N_{stack}} \quad (1.37)$$

Con base en los valores de la **Tabla 1-1** y las Ecuaciones (1.30) - (1.36), se calculan las cantidades y dimensiones de membranas y empaques para el contenedor y cada uno de los stacks. Los resultados se presentan en la **Tabla 1-2**.

Tabla 1-2. Dimensiones para los materiales de cada contenedor.

| Parámetro | Símbolo | Resultado | Unidad |
|---------------------------------|----------------|-----------|---------------------------|
| Área membrana en el contenedor | $A_{IEM,cont}$ | 100016 | m ² /contendor |
| Área de empaques por contenedor | $A_{CEM,cont}$ | 20010 | m ² /contendor |
| Capacidad instalada por Stack | $C_{I,stack}$ | 33.334 | kW/stack |

Cambio de concentración a partir del modelo

Cuando se transforma la EGS en electricidad, la salinidad del agua de mar disminuye, mientras la del agua de río aumenta. La disminución o el aumento mencionado, solo es posible hasta que las aguas logran la misma concentración intermedia, la cual, en el caso del mar Caribe y el río Magdalena, corresponde a ~18.2 g/l; no obstante, en la práctica no se logra la disminución total del gradiente. Algunos modelos de RED predicen las salinidades de salida de las aguas [17], [26], sin embargo, dicho valor depende si se considera, o no, el transporte de agua a través de las membranas; para el caso en el que solo se tiene en cuenta el transporte de sal y no del agua, los cambios de salinidad oscilan entre 20-30 % de la entrada respecto a la salida del agua de mayor concentración cuando hay tiempos altos de residencia (alrededor de 1 minuto).

Con base en lo anterior, en el caso del Río Magdalena y el Mar Caribe se consideran concentraciones de 1.08 y 621.15 mol_{NaCl}/m³, respectivamente. En ese sentido, se toman los valores de 3.02 para la conductividad eléctrica del agua del mar Caribe.

Las Ecuaciones (1.19) - (1.29) se resuelven usando el método de diferencias finitas y con los parámetros que se resumen en la **Tabla 1-3**.

Tabla 1-3. Parámetros para la solución del modelo de electrodiálisis inversa.

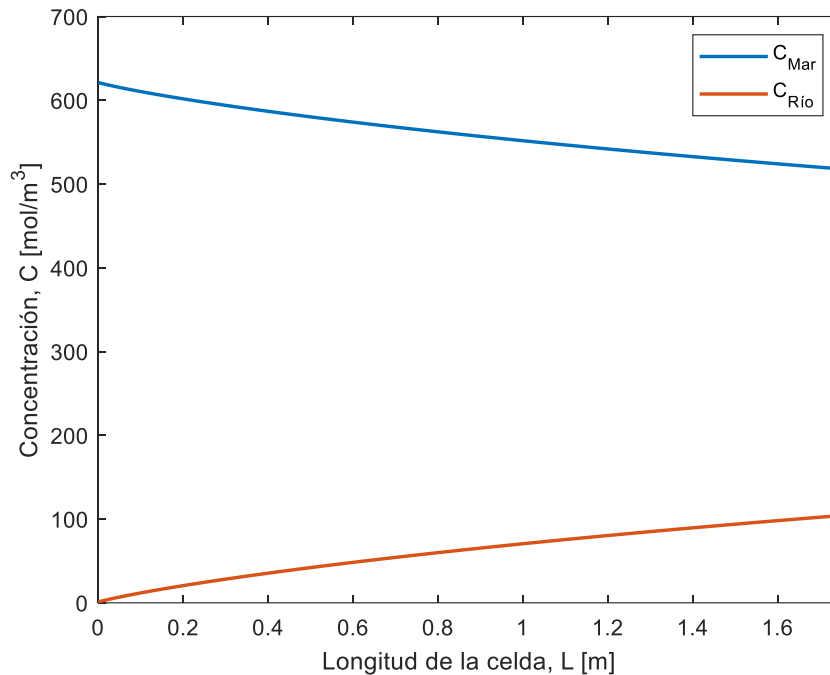
| Nombre del Parámetro | Símbolo | Valor | Unidades |
|--------------------------------|----------------|-----------------------|-------------------|
| Temperatura | T | 298 | K |
| Constante de Gases | R | 8.314 | J/mol.K |
| Constante de Faraday | F | 96492 | C/mol |
| Largo de la celda | L | 1.75 | m |
| Ancho de la celda | b | 1.5 | m |
| Espesor del canal | δ | 2e-4 | m |
| Tiempo de residencia | τ | 60 | s |
| Selectividad AEM | α_{AEM} | 0.88 | -- |
| Selectividad CEM | α_{CEM} | 0.88 | -- |
| Conductividad molar | Λ_m | 50.2 | mS/cm |
| Coefficiente de difusión - sal | D_{NaCl} | 1.3×10^{-11} | m ² /s |
| Espesor de la membrana | δ_m | 2e-4 | m |

Fuente: Elaboración propia con base en [17], [20].

Como se mencionó anteriormente, se fijó una densidad de potencia de 2 W/m². Los parámetros de la tabla se fijaron respecto a la literatura y se aseguró que se cumpliera la densidad de potencia.

A partir del modelo, es posible obtener un perfil de cambio de concentraciones en el interior del equipo, como el que se muestra en la **Figura 1-6**, el cual se obtuvo para una sola celda (Unidad básica), ya que el stack de RED está compuesto por celdas apiladas en paralelo, por tanto, se espera que, en el caso ideal, el cambio de concentración en cada comportamiento sea el mismo en todos los que componen el stack.

Figura 1-6. Perfil de concentraciones en un Equipo de Electrodiálisis inversa operando con salinidades del mar Caribe y el río Magdalena.



De la figura se observa que el cambio de salinidad es simétrico para cada agua. Lo anterior, es resultado de las suposiciones del modelo en el que las membranas son sólo permeables a los iones. En la práctica, se ha encontrado que el paso de agua a través de las membranas por efectos osmóticos y electro-osmóticos influye en el perfil de concentración, principalmente en el del agua de mar [6], [20].

Es importante notar los cambios de salinidad entre la entrada y la salida del equipo (celda), los cuales permiten establecer los posibles efectos y modificaciones al ambiente. Para cada tipo de agua se muestran, en la **Tabla 1-4**, los cambios en salinidad.

Tabla 1-4. Cambios en salinidad en el equipo de RED.

| Tipo de agua | Concentración entrada (mol/m ³) | Concentración salida (mol/m ³) | Cambio (%) |
|---------------|---|--|------------|
| Mar Caribe | 621.15 | 518.00 | 16.7 |
| Río Magdalena | 1.09 | 104.23 | |

Partiendo del escenario modelado en el que sobreestima el cambio de salinidad, el agua del Mar Caribe saldría a ~30.27 g/l, mientras el agua del Río Magdalena recibiría la cantidad de sal proveniente de los compartimientos adyacentes, por tanto, saldría a ~6.09 g/l.

2. MODELO PARA LA DESCARGA DE AGUA AL OCÉANO

El principal objetivo de esta sección es establecer el nivel de afectación que tendrá el sistema generación en los alrededores marítimos. Para esto, es necesario desarrollar un modelo de transporte de masa y momentum que permita predecir los niveles de salinidad en todo el volumen de control y que de esta forma sirva de estudio base para revisar los efectos de un proyecto de estos en la parte biótica y revisar también la cadena trófica en esas condiciones, y así posteriormente determinar si este proyecto es viable ambientalmente.

2.1 Balance de materia

Antes de realizar el análisis energético y exergético del sistema de generación por gradiente salino, es necesario desarrollar un modelo que permita determinar la variación de la salinidad marina en función del caudal de la descarga en el mar. El desarrollo de este modelo es prioritario debido a que no se deberían variar las condiciones bióticas del medio, y en este caso se tomará para efectos de este estudio una máxima variación de la salinidad del mar del 1%² respecto a la salinidad inicial (sin descarga), la cual fue determinada a partir de datos de batimetría reportados en [27].

Para el desarrollo de este modelo, se tuvieron en cuenta las siguientes suposiciones:

² Condición que deberá ser revisada en estudios posteriores de afectaciones bióticas a estas variaciones de salinidad.

- El transporte de sal marina ocurre de forma bidimensional y el sistema de coordenadas se muestra en la **Figura 2-1**.
- El transporte de masa tiene lugar debido a los fenómenos de difusión y convección.
- Para las condiciones iniciales, la convección ocurre debido a las corrientes marinas, las cuales se producen principalmente por las corrientes de viento [28], [29]. Es decir, la velocidad inicial del mar sólo dependerá de la velocidad del viento.
- Las propiedades de transporte y las densidades se considerarán constantes. Esto se debe a que estas propiedades dependen fundamentalmente de la temperatura, la cual no varía significativamente durante el proceso (menos de 2 °C).

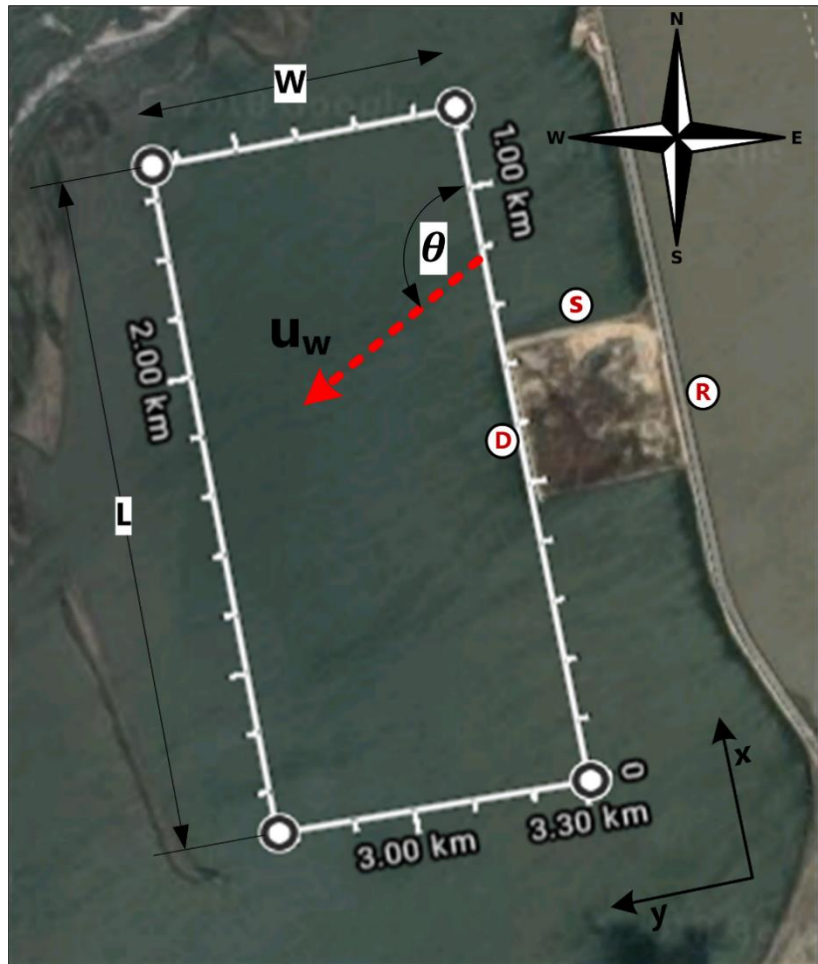


Figura 2-1 Eje de coordenadas elegido para la simulación. ($W= 0.51\text{Km}$, $L=1,1$)

Ahora consideremos un elemento de mar de ancho Δx , profundidad Δy y altura H (ver **Figura 2-2**), donde H representa la distancia promedio desde el fondo del mar hasta la superficie y está dada por los datos de batimetría.

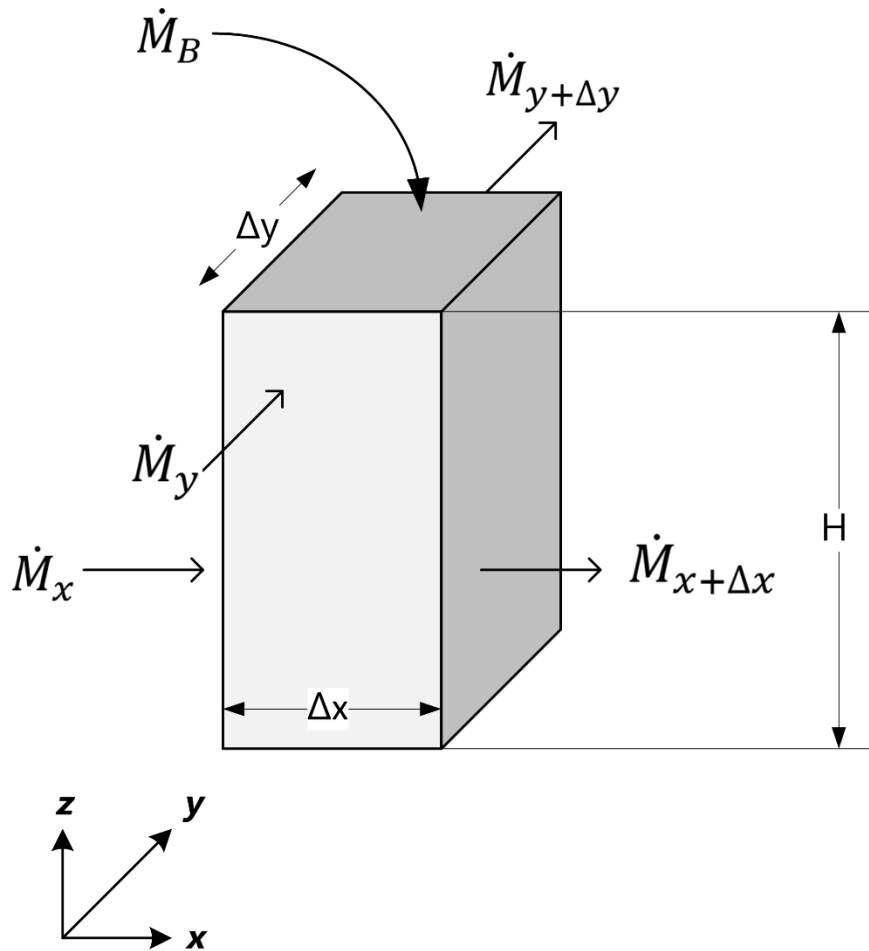


Figura 2-2. Esquema del balance de materia en un elemento de mar.

El balance de materia para la sal marina está dado por la siguiente expresión

$$\left(\text{Flujos de sal} \right)_{\text{entrantes}} - \left(\text{Flujos de sal} \right)_{\text{salientes}} + \left(\text{Generación} \right)_{\text{de sal}^3} = \left(\text{Acumulación} \right)_{\text{de sal}} \quad (1)$$

³ Debido a que la descarga de la bomba tiene una salinidad conocida, esto se refleja en un aumento en la salinidad local del mar justo en el punto de la descarga.

Los flujos de sal marina entran por las superficies ubicadas en x y y ; además, existe un flujo másico de sal entrante debido a la descarga. Por lo tanto, los flujos entrantes al elemento se expresan como

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{l} \text{Flujos de sal} \\ \text{entrantes} \end{array} \right) &= & (2) \\ &= \dot{M}_x + \dot{M}_y = (\rho\bar{u})_x \Delta y H + (\rho\bar{v})_y \Delta x H + j''_x \Delta y H + j''_y \Delta x H + \dot{M}_D \end{aligned}$$

donde $\rho(x, y, t)$ es la concentración másica de sal marina (salinidad), \bar{u} es la velocidad promedio del mar en la dirección x , \bar{v} es la velocidad promedio del mar en la dirección y , j''_x es el flux difusivo que entra por la superficie ubicada en x , j''_y es el flux difusivo que entra por la superficie ubicada en y , y \dot{M}_D es el flujo másico de sal que entra al elemento debido a la descarga. Similarmente, del elemento salen flujos de sal marina por las superficies ubicadas en $x + \Delta x$ y $y + \Delta y$, luego

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{l} \text{Flujos de sal} \\ \text{salientes} \end{array} \right) &= & (3) \\ &= \dot{M}_{x+\Delta x} + \dot{M}_{y+\Delta y} = (\rho\bar{u})_{x+\Delta x} \Delta y H + (\rho\bar{v})_{y+\Delta y} \Delta x H + j''_{x+\Delta x} \Delta y H \\ &\quad + j''_{y+\Delta y} \Delta x H \end{aligned}$$

La acumulación está dada por el cambio de la masa de sal marina en el elemento respecto al tiempo; es decir

$$\left(\begin{array}{l} \text{Acumulación} \\ \text{de sal} \end{array} \right) = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (4)$$

donde m es la masa de sal marina en el elemento elemento. Considerando que no existen reacciones químicas que puedan generar o destruir sal marina en el elemento, es posible despreciar el término $\left(\begin{array}{l} \text{Generación} \\ \text{de sal} \end{array} \right)$. Finalmente, sustituyendo las ecuaciones (2), (3), y (4) en la ecuación (1), llegamos a la siguiente expresión

$$\begin{aligned}
& [(\rho\bar{u})_x - (\rho\bar{u})_{x+\Delta x} + j''_x - j''_{x+\Delta x}] \Delta y H \\
& + [(\rho\bar{v})_y - (\rho\bar{v})_{y+\Delta y} + j''_y - j''_{y+\Delta y}] \Delta x H + \dot{M}_D = \frac{\Delta m_{elemento}}{\Delta t}
\end{aligned} \tag{5}$$

Dividiendo la ecuación (5) por el volumen del elemento y reorganizando, se obtiene

$$\begin{aligned}
& \frac{(\rho\bar{u})_x - (\rho\bar{u})_{x+\Delta x}}{\Delta x} + \frac{(\rho\bar{v})_y - (\rho\bar{v})_{y+\Delta y}}{\Delta y} + \frac{j''_x - j''_{x+\Delta x}}{\Delta x} + \frac{j''_y - j''_{y+\Delta y}}{\Delta y} + \frac{\dot{M}_D}{\Delta x \Delta y H} \\
& = \frac{\Delta \rho}{\Delta t}
\end{aligned} \tag{6}$$

Ahora, tomando el límite cuando Δx , Δy y Δt tienden a cero:

$$-\frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial y} - \frac{\partial(j''')}{\partial x} - \frac{\partial(j'')}{\partial y} + \lim_{\Delta x, \Delta y, \Delta t \rightarrow 0} \frac{\dot{M}_D}{\Delta x \Delta y H} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{7}$$

Esta ecuación con el término local es válida sólo para el nodo de la descarga. Para los nodos restantes el término local (relacionado con el límite) es igual a cero.

El flux difusivo está dado por la ampliamente conocida ley de Fick:

$$j'' = -D \nabla \rho \tag{8}$$

donde D es el coeficiente de difusión de la sal marina en el agua, el cual se considerará constante debido a que no se esperan grandes cambios en la temperatura y la presión del sistema. Así, sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (7), se llega a

$$-\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial y} + D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} + \lim_{\Delta x, \Delta y, \Delta t \rightarrow 0} \frac{\dot{M}_D}{\Delta x \Delta y H} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (9)$$

La ecuación (9) está sujeta a las siguientes condiciones de frontera

$$\rho(x, 0, t) = \rho(L, y, t) = \rho_0$$

y a las siguientes condiciones iniciales

$$\rho(x, y, 0) = \rho_0$$

donde ρ_0 es la concentración másica de sal marina (salinidad) en el sistema inicial (sin la descarga), la cual viene dada por los datos de batimetría reportados en [27]. Para finalizar, hay que resaltar que el cuarto término del lado izquierdo de la ecuación (9) sólo aparece en el punto del volumen de control en el cual se encuentra la descarga (punto (D) de la **Figura 2-1**).

2.2 Balance de momentum

Para conocer el perfil de velocidad en todo el volumen de control es necesario realizar un balance de momentum. Debido a que la descarga es paralela al eje y , se espera que el componente de la velocidad en el eje x no varíe. Es decir, sólo se realizará un balance de momentum en el eje y . (ver **Figura 2-3**)

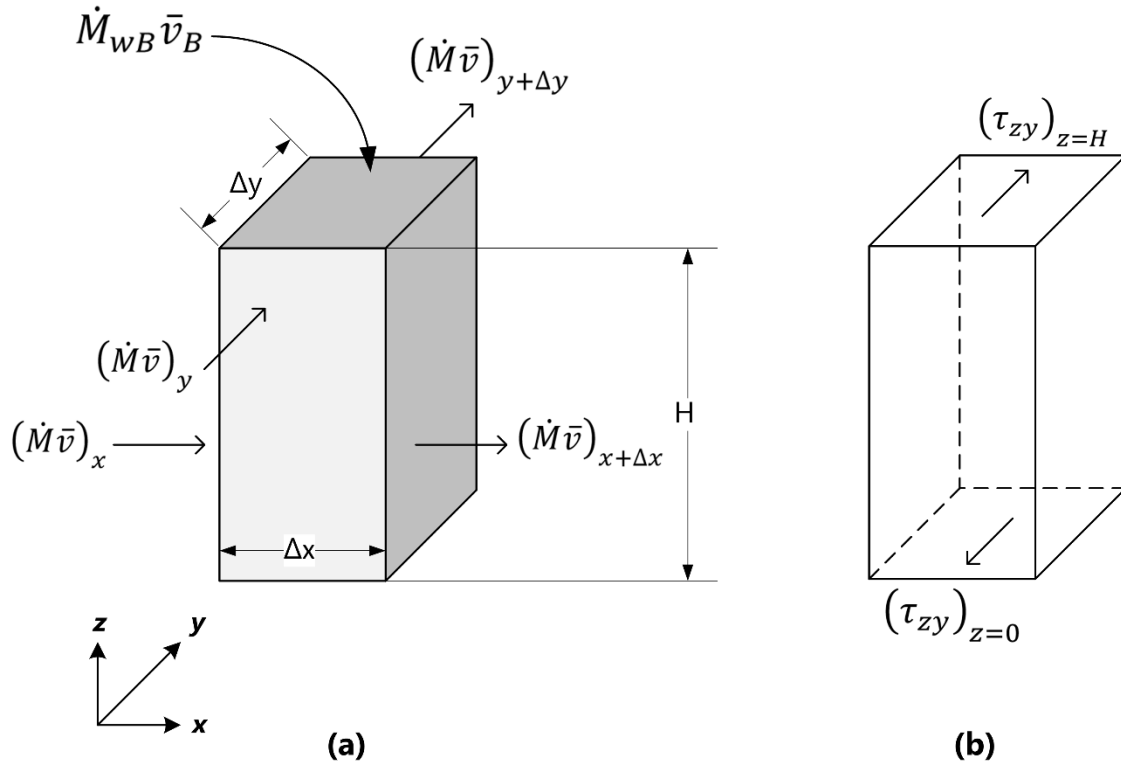


Figura 2-3. (a) Entradas y salidas de y-momentum y (b) fuerzas en x .

El balance de momentum en el eje y está dado por

$$\left(\text{Momentum en } y \right)_{\text{entrante}} - \left(\text{Momentum en } y \right)_{\text{saliente}} + \left(\sum F_y \right) = \left(\text{Acumulación de momentum en } y \right) \quad (10)$$

El momentum en y entra por las superficies ubicadas en x y y (ver **Figura 2-3 a**). Además, también hay una entrada de momentum debido a la descarga:

$$\left(\text{Momentum en } y \right)_{\text{entrante}} = (\dot{M}\bar{v})_x + (\dot{M}\bar{v})_y = (\rho_w \bar{u}\bar{v})_x \Delta y H + (\rho_w \bar{v}\bar{v})_y \Delta x H + \dot{M}_{wD} \bar{v}_D \quad (11)$$

donde ρ_w es la densidad del agua de mar, \dot{M}_{wD} es el flujo másico de agua proveniente de la descarga y \bar{v}_D es la velocidad de la descarga. El momentum en y sale por las superficies ubicadas en $x + \Delta x$ y $y + \Delta y$, entonces

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{c} \text{Momentum en } y \\ \text{saliente} \end{array} \right) &= (\dot{M}\bar{v})_{x+\Delta x} + (\dot{M}\bar{v})_{y+\Delta y} \\ &= (\rho_w \bar{u}\bar{v})_{x+\Delta x}\Delta y H + (\rho_w \bar{v}\bar{v})_{y+\Delta y}\Delta x H \end{aligned} \quad (12)$$

La acumulación de momentum en y en el elemento está dada por

$$\left(\begin{array}{c} \text{Acumulación} \\ \text{de momentum en } y \end{array} \right) = \frac{\Delta(m_w \bar{v})}{\Delta t} \quad (13)$$

Donde m_w es la masa del elemento. Las fuerzas en el eje y está dadas por los esfuerzos τ_{zy} , τ_{xy} y τ_{yy} . Sin embargo, los esfuerzos τ_{xy} y τ_{yy} se pueden despreciar debido a que son proporcionales a los gradientes de velocidad en x y y , los cuales son muy pequeños en comparación con los gradientes de velocidad en el eje z [30]. Por lo tanto,

$$\sum F_y = (\tau_{zy})_{z=H} \Delta x \Delta y - (\tau_{zy})_{z=0} \Delta x \Delta y \quad (14)$$

Finalmente, sustituyendo las ecuaciones (11), (12), (13) y (14) en la ecuación (10), se llega a la siguiente expresión

$$\begin{aligned} [(\rho_w \bar{u}\bar{v})_x - (\rho_w \bar{u}\bar{v})_{x+\Delta x}]\Delta y H + [(\rho_w \bar{v}\bar{v})_y - (\rho_w \bar{v}\bar{v})_{y+\Delta y}]\Delta x H + \dot{M}_w \bar{v}_D \\ + [(\tau_{zy})_{z=H} - (\tau_{zy})_{z=0}]\Delta x \Delta y = \frac{\Delta(m_w \bar{v})}{\Delta t} \end{aligned} \quad (15)$$

Dividiendo la ecuación (15) por el volumen del elemento, obtenemos

$$\begin{aligned} \frac{(\rho_w \bar{u}\bar{v})_x - (\rho_w \bar{u}\bar{v})_{x+\Delta x}}{\Delta x} + \frac{(\rho_w \bar{v}\bar{v})_y - (\rho_w \bar{v}\bar{v})_{y+\Delta y}}{\Delta y} + \frac{\dot{M}_{wD} \bar{v}_D}{\Delta x \Delta y H} \\ + \frac{(\tau_{zy})_{z=H} - (\tau_{zy})_{z=0}}{H} = \frac{\Delta(\rho_w \bar{v})}{\Delta t} \end{aligned} \quad (16)$$

Tomando límite cuando Δx , Δy y Δt tienden a cero:

$$-\frac{\partial(\rho_w \bar{u}\bar{v})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho_w \bar{v}\bar{v})}{\partial y} + \lim_{\Delta x, \Delta y, \Delta t \rightarrow 0} \frac{\dot{M}_{wB} \bar{v}_B}{\Delta x \Delta y H} + \frac{(\tau_{zy})_{z=H} - (\tau_{zy})_{z=0}}{H} = \frac{\partial(\rho_w \bar{v})}{\partial t} \quad (17)$$

La ecuación (17) está sujeta a las siguientes condiciones de frontera

$$\bar{v}(x, 0, t) = \bar{v}(L, y, t) = \bar{v}_0$$

y a las siguientes condiciones iniciales

$$\bar{v}(x, y, 0) = \bar{v}_0$$

donde \bar{v}_0 es la velocidad promedio del mar en el eje y para el sistema inicial.

2.3 Datos de entrada de la simulación

Para llevar a cabo la simulación de la descarga en el mar, es necesario conocer los valores del coeficiente de difusión D , de la distancia promedio desde el fondo del mar hasta la superficie H , el flujo másico de sal proveniente de la descarga \dot{M}_D , el flujo másico de agua proveniente de la descarga \dot{M}_{wD} , la velocidad de la descarga \bar{v}_D , la salinidad inicial ρ_0 y las velocidades iniciales promedio del mar \bar{u}_0 y \bar{v}_0 (cabe mencionar que $\bar{u}_0 = \bar{u}(x, y, t) = \text{constante}$ debido que solo hay variaciones de momentum en el eje y).

Respecto al coeficiente de difusión de la sal marina, es necesario notar que la sal marina está conformada de una compleja de mezcla de electrolitos [31]; sin embargo, el NaCl es el componente que se encuentra en una mayor proporción en la sal marina (82.7 wt% [32]). Por lo tanto, en este trabajo se usará el coeficiente de difusión del NaCl como una aproximación para el coeficiente de difusión de la sal marina. En este trabajo se usó la expresión ajustada por Caldwell D. [33] para el coeficiente de difusión del NaCl en concentración oceánica:

$$D = 10^{-5} \times (0.44 + 0.0423T) \quad (18)$$

En donde D se expresa en cm^2/s y la temperatura T en $^\circ\text{C}$. De este modo, para una temperatura promedio del mar de 28°C , se obtiene un coeficiente de difusión de $1.62 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Por otro lado, distancia promedio desde el fondo del mar hasta la superficie H y la salinidad inicial ρ_0 fueron calculadas tomando un valor promedio de los datos de batimetría reportados en [27].

En cuanto a \bar{v}_0 y \bar{u}_0 , aunque se conoce la velocidad del viento [34], en la literatura científica revisada no se encontraron datos relacionados con la velocidad del mar en la zona que se

está estudiando. Por lo tanto, para calcular \bar{v}_0 y \bar{u}_0 , es necesario encontrar una relación entre la velocidad del viento y la velocidad de del mar⁴.

Se sabe que la velocidad superficial de las corrientes marinas no sólo depende de la velocidad del viento sino también de la latitud [35]–[38]. En este sentido, Henderson-Sellers B. [39] presentó una expresión simple que relaciona la velocidad del viento y la latitud con la velocidad superficial del mar:

$$|\mathbf{u}_s| = \frac{1}{m} \frac{24}{\sqrt{\sin \varnothing}} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w} c_D} |\mathbf{u}_w| \quad (19)$$

Donde \mathbf{u}_s es el vector velocidad del agua en la superficie, m es una constante empírica que tiene un valor de 1 para océanos y de 2 para lagos y grandes cuerpos de agua, \varnothing es la latitud expresada en radianes, ρ_a es la densidad del aire, \mathbf{u}_w es el vector velocidad del viento y c_D es el coeficiente de arrastre. Todos los parámetros anteriormente mencionados se pueden encontrar en la literatura; sin embargo, el coeficiente de arrastre depende de la velocidad del viento [40], [41] y debe ser calculado a partir de la siguiente correlación empírica [13]

$$10^3 c_D = 0.63 + 0.066 |\mathbf{u}_w| \quad (20)$$

Finalmente, el valor calculado para $|\mathbf{u}_s|$ fue de 0.82 m/s y los parámetros usados en la ecuación (19) se listan en la **Tabla 2-1**.

⁴Dado que se tenían teníamos medidas de velocidad del viento en la zona, además, se sabe esta velocidad no es la misma que la del mar, se buscó una correlación en la literatura entre las dos (por nivel y dirección del viento), y esta correlación es la (19).

Tabla 2-1. Parámetros usados para calcular la velocidad del agua en la superficie

| Parámetro | Valor |
|------------------|-------------------------|
| m | 1 |
| ϕ | 11.07° |
| ρ_a | 1.168 kg/m ³ |
| ρ_w | 996.2 kg/m ³ |
| $ \mathbf{u}_w $ | 12.6 m/s |
| c_D | 1.2*10 ⁻³ |

Ahora es necesario calcular las velocidades iniciales promedio del mar en las direcciones x y y (\bar{u}_0 y \bar{v}_0 , respectivamente), las cuales están dadas por

$$\bar{u}_0 = \frac{1}{H} \int_0^H u(z) dz \quad (21)$$

$$\bar{v}_0 = \frac{1}{H} \int_0^H v(z) dz \quad (22)$$

Donde $u(z)$ y $v(z)$ son las velocidades locales en las direcciones x y y , respectivamente. Para calcular estas velocidades es necesario resolver la ecuación de momentum en todo el volumen de control que se está estudiando (ver Figura 2-1). La ecuación de momentum en la dirección x para el estado inicial se expresa como [30], [42]

$$\frac{\partial(\rho_w u)}{\partial t} = -\rho_w \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (23)$$

donde τ_{zx} es el esfuerzo cortante en la dirección x , τ_{xx} es el esfuerzo normal y P es la presión. Como en para la condición inicial la velocidad de las corrientes no varía ni en el tiempo ni en el eje x ni en el eje y , la ecuación (23) se reduce a

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (24)$$

Adicionalmente, debido a que el movimiento del mar se debe al viento y no a la diferencia de presión, el término $\frac{\partial P}{\partial x}$ también se puede despreciar. Los esfuerzos se expresan usando la ley de viscosidad de Newton como sigue [30]

$$\tau_{zx} = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (25)$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (26)$$

Sustituyendo las ecuaciones (25) y (26) en la ecuación (24), se obtiene la siguiente ecuación diferencial

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (27)$$

La cual está sujeta a

$$u = |\mathbf{u}_s| \cos \theta \quad \text{en } z = H$$

$$u = 0 \quad \text{en } z = 0$$

Solucionando la ecuación diferencial (27), se encuentra el siguiente perfil de velocidad

$$u = |\mathbf{u}_s| \cos\theta \frac{z}{H} \quad (28)$$

Sustituyendo la ecuación (28) en la ecuación (21), se obtiene la velocidad promedio inicial en el eje x :

$$\bar{u}_0 = \frac{|\mathbf{u}_s| \cos\theta}{2} \quad (29)$$

Siguiendo un procedimiento similar al utilizado para derivar la ecuación (29), se llega al siguiente perfil de velocidad:

$$v = |\mathbf{u}_s| \sen\theta \frac{z}{H} \quad (30)$$

Finalmente, la velocidad promedio inicial en el eje y se expresa como

$$\bar{v}_0 = \frac{|\mathbf{u}_s| \sen\theta}{2} \quad (31)$$

Así, se calculan valores de -0.2 m/s y 0.36 m/s para \bar{u}_0 y \bar{v}_0 , respectivamente. Adicionalmente, cabe resaltar que los perfiles de velocidad representados por las ecuaciones (28) y (30) son lineales; por lo tanto, el cuarto término del lado izquierdo de la ecuación (17) desaparece.

La velocidad de la descarga \bar{v}_D está dada por la siguiente expresión

$$\bar{v}_D = \frac{\dot{V}_D}{\pi r_D^2} \quad (32)$$

Donde \dot{V}_D es el flujo volumétrico de la descarga (0.4 m³/s) y r_D es el radio de la tubería de la descarga. El flujo másico de sal proveniente de la descarga \dot{M}_D está dada por

$$\dot{M}_D = \dot{V}_D \rho_D \quad (33)$$

donde ρ_D es la salinidad de la descarga. Finalmente, en la **Tabla 2-2** se resumen todos los datos de entrada de la simulación.

Tabla 2-2. Resumen de datos de entrada en la simulación

| Parámetro | Valor |
|----------------|---|
| D | 1.62*10 ⁻⁹ m ² /s |
| H | 3.5 m |
| ρ_0 | 36.2 g/L |
| θ | 119° |
| \bar{u}_0 | -0.2 m/s |
| \bar{v}_0 | 0.36 m/s |
| L | 1.14 km |
| W | 0.51 km |
| ρ_w | 1026 kg/m ³ [43] |
| \dot{M}_{wD} | 410.4 kg/s |
| \bar{v}_D | 2.23 m/s |
| ρ_D | 18.1 g/L |
| \dot{M}_D | 7.3 kg/s |

2.4 Método de solución

Para resolver las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (9) y (17) se empleó el método numérico conocido como diferencias finitas, el cual permite aproximar la primera y segunda derivada [44]. Para los términos difusivos se usaron diferencias finitas centradas como sigue:

$$\left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x_0} \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - 2f(x_0) + f(x_0 - \Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad (34)$$

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x_0} \approx \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (35)$$

Se sabe que el esquema de diferencias finitas centradas genera inestabilidad numérica si se usa para discretizar los términos convectivos [45]. Por lo tanto, para estos términos se usó el esquema “*upwind*” [46]. En este esquema, la derivada en el término convectivo se discretiza usando diferencias finitas regresivas si la velocidad tiene la misma dirección del eje de coordenadas, y diferencias finitas progresivas si la velocidad tiene dirección contraria al eje de coordenadas:

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x_0} \approx \begin{cases} \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} & \text{si } \bar{u} > 0 \\ \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} & \text{si } \bar{u} < 0 \end{cases} \quad (36)$$

Finalmente, usando las ecuaciones (34), (35), y (36), es posible discretizar las ecuaciones (9) y (17) como sigue:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} \approx & -\frac{(\rho u)_{i+1,j} - (\rho u)_{i,j}}{\Delta x} - \frac{(\rho u)_{i,j} - (\rho u)_{i,j-1}}{\Delta y} + D \frac{\rho_{i+1,j} - 2\rho_{i,j} + \rho_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \\ & + D \frac{\rho_{i,j+1} - 2\rho_{i,j} + \rho_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} + \frac{\dot{M}_D}{\Delta x \Delta y H} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_w \bar{v})}{\partial t} \approx & -\frac{(\rho_w \bar{u}\bar{v})_{i+1,j} - (\rho_w \bar{u}\bar{v})_{i,j}}{\Delta x} - \frac{(\rho_w \bar{v}\bar{v})_{i,j} - (\rho_w \bar{v}\bar{v})_{i,j-1}}{\Delta y} + \frac{\dot{M}_{wD} \bar{v}_D}{\Delta x \Delta y H} \\ & + \frac{(\tau_{zy})_{z=H} - (\tau_{zy})_{z=0}}{H} \end{aligned} \quad (38)$$

2.5 Resultados

Para evaluar el efecto de la descarga en la salinidad, se realizaron simulaciones considerando diferentes cantidades de *stacks* (1-100); es decir, considerando diferentes flujos de descarga ($0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ - $40 \text{ m}^3/\text{s}$). En la **Figura 2-4** se muestra la evolución del contorno de salinidad hasta que se alcanza el estado estacionario.

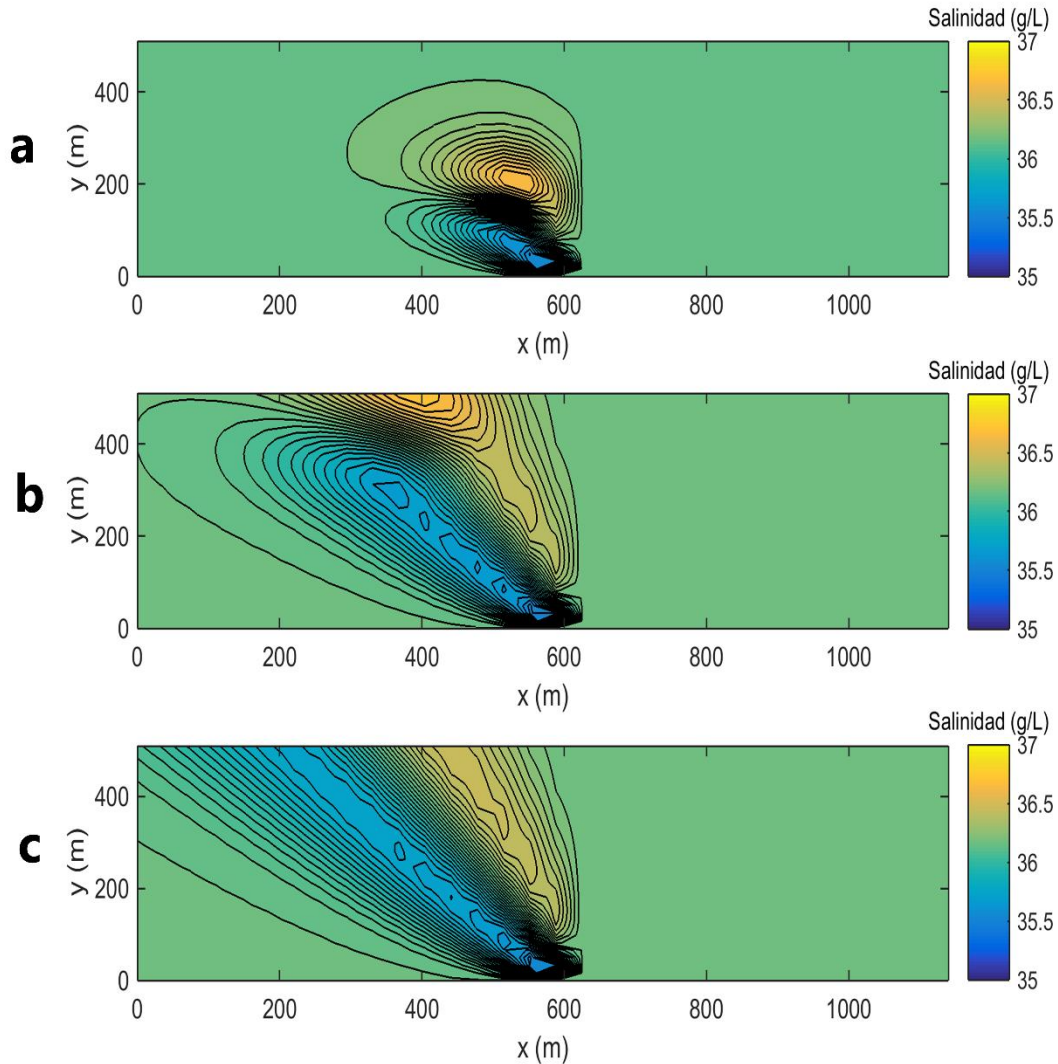


Figura 2-4. Contornos de salinidad para a) $t=9 \text{ min}$, b) $t=25 \text{ min}$ y c) $t=\infty$ (1 *stack*).

En la **Figura 2-4** se observa que mientras en una zona se produce una reducción en la salinidad del mar, en otra se produce un incremento. La disminución en la salinidad del

mar se debe a la menor salinidad del agua de la descarga; sin embargo, el aumento de la salinidad se debe a un fenómeno más complejo. Para ilustrar lo anterior es preciso conocer la variable vorticidad ω , la cual muestra la tendencia del fluido a rotar; es decir, la tendencia a formar remolinos. La generación de vórtices genera que la materia se acumule en la cercanía del mismo, evitando que fluya aguas arriba, lo cual se ve reflejado en una “acumulación” de masa en el lugar donde está ubicado el vórtice. La vorticidad se define como

$$\omega = \nabla \times \mathbf{u} \quad (39)$$

donde \mathbf{u} es el vector velocidad media del mar y $\nabla \times$ es el operador rotacional.

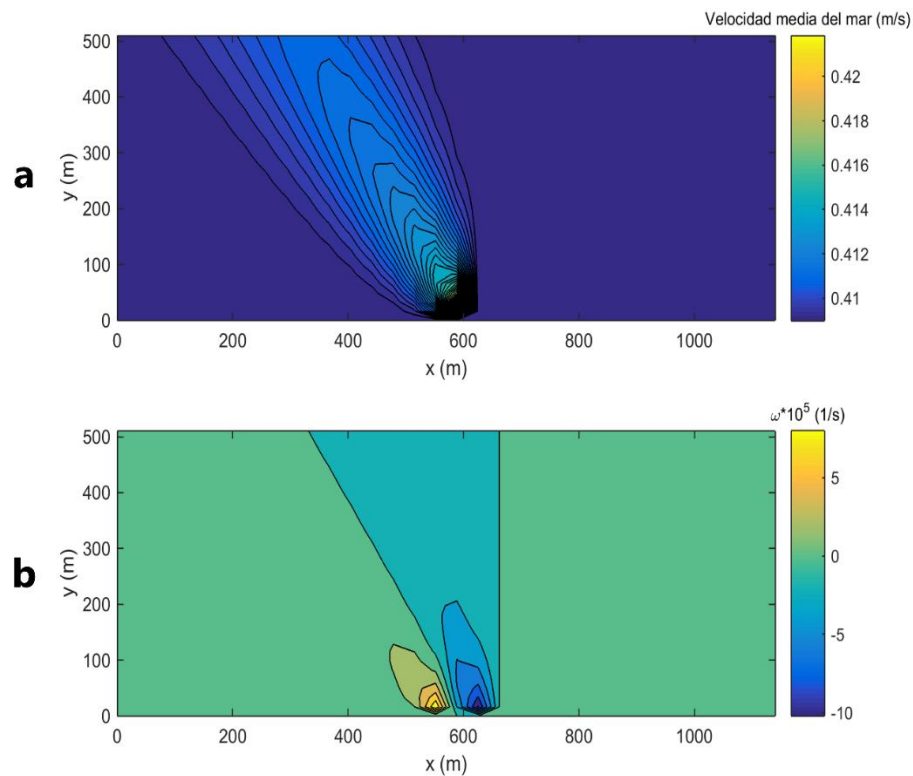


Figura 2-5. Contornos de a) velocidad media $|\mathbf{u}|$ y b) vorticidad en estado estacionario (1 stack).

En la **Figura 2-5** se muestran los contornos de la magnitud de la velocidad media del mar $|u|$ (**Figura 2-5a**) y de la vorticidad en estado estacionario (**Figura 2-5b**). Se puede observar que la velocidad aumenta en la zona de la descarga (Figura 2-5a), lo cual se espera, ya que la descarga produce un incremento local del momentum. Este aumento local genera la aparición de remolinos (**Figura 2-5b**) en los que se acumula la sal, lo cual produce un aumento de la salinidad. Por otro lado, también se analizó el área superficial del volumen de control cuyo cambio de salinidad es superior al 1%. Para esto se definió la variable área fraccional afectada A_f :

$$A_f = \frac{A_a}{A_T} \quad (40)$$

donde A_a es el área superficial cuyo cambio de salinidad es superior al 1% y A_T es el área superficial total del volumen de control.

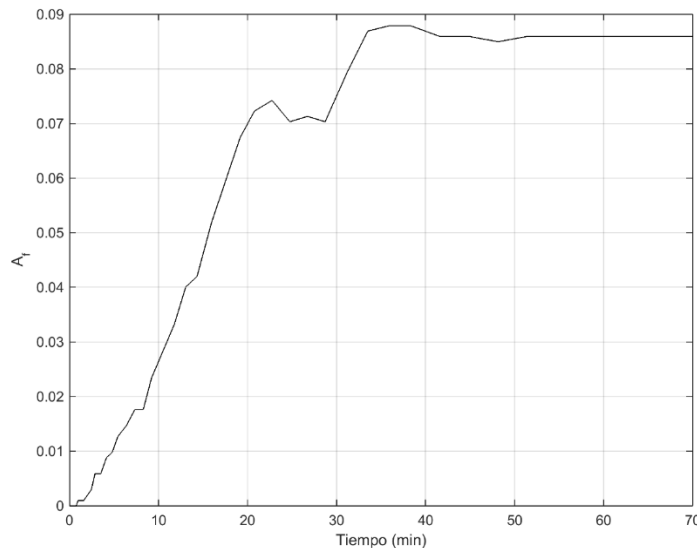


Figura 2-6. Evolución de la fracción de área superficial cuya salinidad varía en más de 1% respecto a la salinidad inicial (1 *stack*).

La **Figura 2-6** muestra la evolución temporal de la fracción de área superficial afectada y se puede observar que alrededor del minuto 52 se alcanza el estado estacionario con un área fraccional de 0.086. Esta área afectada constituye bajo el supuesto de no tener variación superior al 1% en la concentración podría tomarse como un riesgo ambiental admisible, situación que para próximos estudios se debería revisar con profesionales en análisis biótico por cambio de concentración salina; sin embargo, es necesario analizar el efecto del uso de múltiples *stacks* en la salinidad del mar.

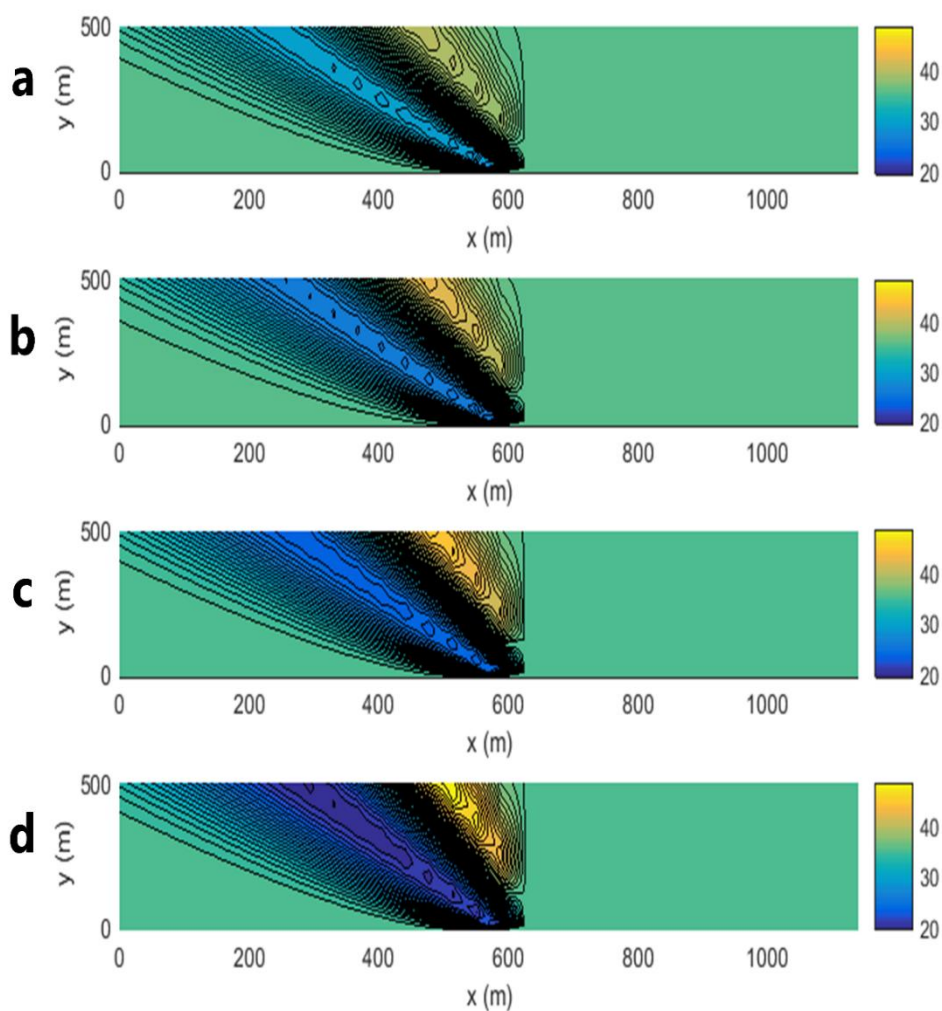


Figura 2-7. Contornos de salinidad en estado estacionario para a) 20, b) 40, c) 60 y d) 100 *stacks*.

En la **Figura 2-7** se muestran los contornos de salinidad para diferentes cantidades de *stacks* y se puede observar que independiente del número de *stacks*, el comportamiento de la salinidad es muy similar al mostrado en la **Figura 2-4**: por un lado, hay una disminución de la salinidad y, por el otro, se observa un aumento de la salinidad debido a la aparición de remolinos.

Las diferencias en las concentraciones a la descarga se deben a que al lado izquierdo de la pluma de agua no se tiene restricción de flujo y puede continuar su camino, por lo cual no hay acumulación, esta pluma funciona como una pared al lado derecho.

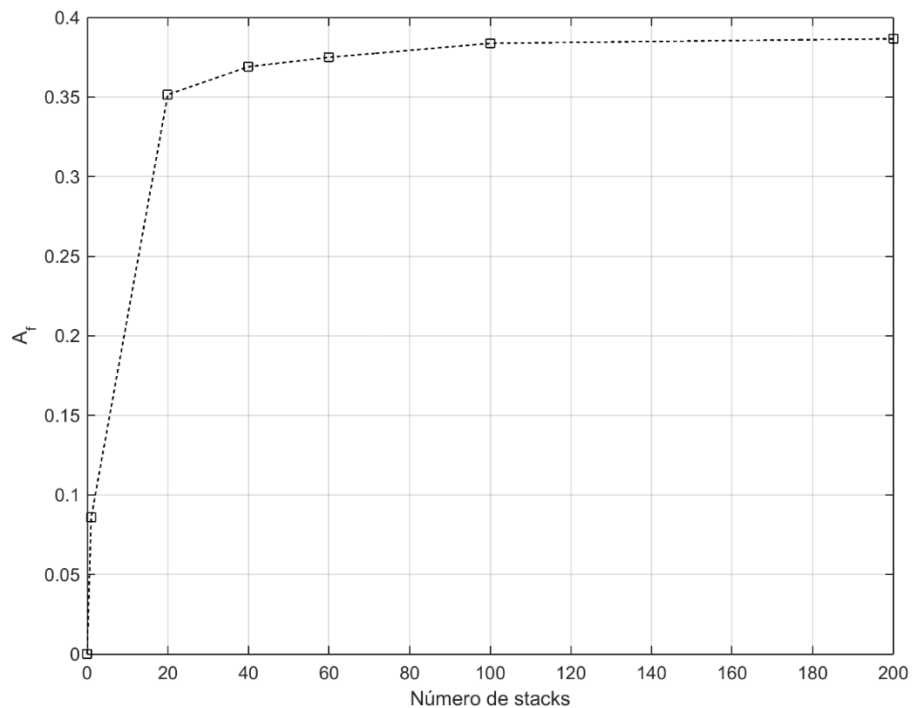


Figura 2-8. Dependencia del área fraccional afectada con el número de *stacks*.

Finalmente, se evaluó el efecto del número de *stacks* en el área fraccional afectada en estado estacionario (ver **Figura 2-8**). Se observa que de 1 a 20 *stacks* hay un aumento

considerable del área fraccional afectada; sin embargo, dicho incremento se vuelve cada vez más leve a medida que se aumenta el número de *stacks* y el área fraccional afectada se estabiliza en un valor de alrededor de 0.38.

3. BALANCE DE EXERGÍA

El objetivo de la presente sección es desarrollar un análisis exergético del sistema de generación de energía por gradiente salino. En otras palabras, se quiere calcular la eficiencia exergética del sistema para diferentes configuraciones (número de stacks) con el fin de determinar cuál es la configuración óptima desde el punto de vista de calidad de la energía y cambio en la concentración salina en la descarga. Dado que el tema de estudio de esta tesis es un sistema de generación de potencia, la eficiencia exergética del sistema η_{ex} se puede definir como sigue [47]

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{W}_{rev}} = \frac{\dot{W}_{neto}}{\sum_{entra} \dot{B} - \sum_{sale} \dot{B}} \quad (41)$$

Donde \dot{W}_{neto} es la potencia neta generada por el sistema, \dot{W}_{rev} es la potencia producida, $\sum_{entra} \dot{B}$ es la sumatoria de todas las exergías de las corrientes entrantes al sistema y $\sum_{sale} \dot{B}$ es la sumatoria de todas las exergías de las corrientes salientes. Dado que se debe cumplir que $\sum_{sale} \dot{B} + \dot{W}_{neto} = \sum_{entra} \dot{B} - \dot{B}_D$, la ecuación (41) se convierte en

$$\eta_{ex} = \frac{\sum_{entra} \dot{B} - \sum_{sale} \dot{B} - \dot{B}_D}{\sum_{entra} \dot{B} - \sum_{sale} \dot{B}} \quad (42)$$

donde \dot{B}_D es la exergía destruida. Por lo tanto, para calcular la eficiencia exergética del sistema es necesario conocer la exergía de las corrientes de entrada y la exergía destruida en el proceso. Por un lado, la exergía de entrada puede ser fácilmente calculada ya que se conocen las condiciones de entrada de todas las corrientes y, por otro lado, la exergía destruida se puede calcular a partir de un balance de exergía en el volumen de control. El esquema general del proceso se observa en la **Figura 3-1**, en la que se observa que al sistema entran dos corrientes (una proveniente del mar y la otra del río), las cuales pasan

por un proceso de filtrado que produce una caída de presión significativa. Posteriormente las corrientes se dirigen a las celdas de generación de potencia por gradiente salino, en las cuales las corrientes se mezclan antes de ser descargadas nuevamente en el mar.

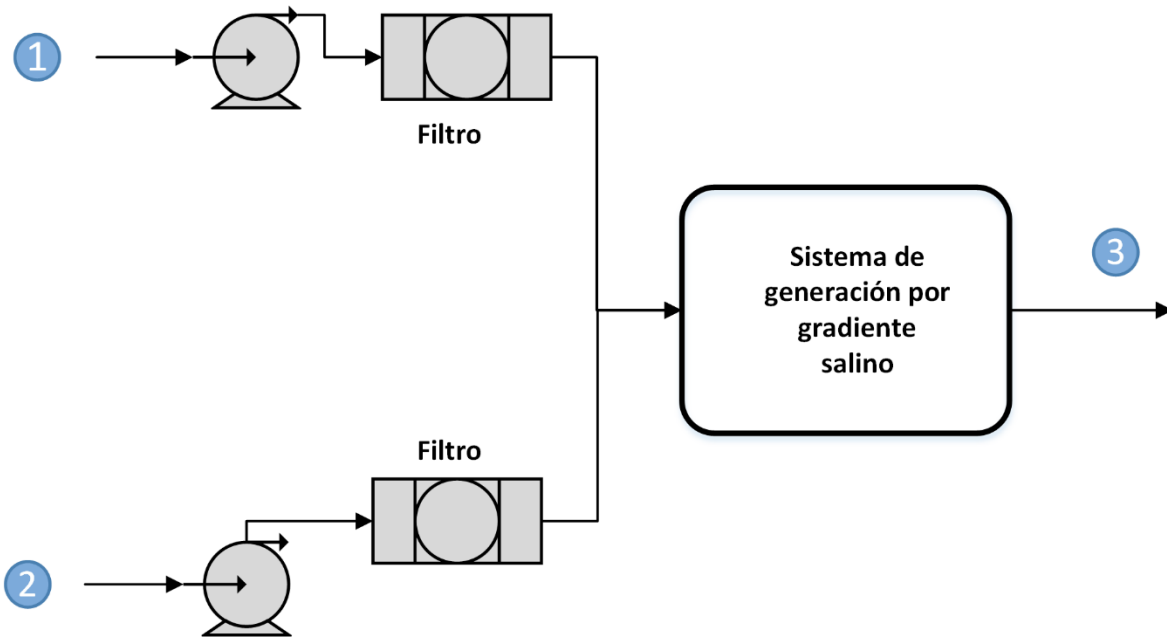


Figura 3-1. Diagrama de proceso. (1) Succión en el mar; (2) succión en el río; y (3) descarga en el mar. Elaboración propia.

3.1 Balance de energía para la descarga en el océano

Para efectos de esta tesis, y en términos de variación matemática, la temperatura del mar no debería cambiar en más de 1 °C aproximadamente; por lo tanto, inicialmente se calculará la temperatura de la descarga. En estado estacionario, el balance de energía entre los puntos (S), (R) y (D) está dado por:

$$\dot{M}_{wS}h_S + \dot{M}_{wR}h_R = \dot{M}_{wD}h_D \quad (43)$$

donde \dot{M}_{WS} , \dot{M}_{WR} son respectivamente los flujos máscicos provenientes de la succión y del río, y h_S , h_R y h_D son las entalpías específicas en la succión, el río y la descarga, respectivamente. El balance de materia en estado estacionario se expresa como

$$\dot{M}_{WS} + \dot{M}_{WR} = \dot{M}_{WD} \quad (44)$$

Sustituyendo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se obtiene

$$\dot{M}_{WS}h_S + \dot{M}_{WR}h_R = (\dot{M}_{WS} + \dot{M}_{WR})h_D \quad (45)$$

Reorganizando:

$$\dot{M}_{WS}(h_S - h_D) + \dot{M}_{WR}(h_R - h_D) = 0 \quad (46)$$

En el balance de energía aparentemente los términos de energía cinética asociados a los flujos se ven reflejados, estos términos se tuvieron en cuenta, sin embargo, en los supuestos se considera que no hay cambios significativos entre las corrientes de entradas y salidas, lo que explica porque no se incluyeron en el sistema de ecuaciones.

Teniendo que el cambio de entalpía se puede expresar en términos de la capacidad calorífica, se llega a la siguiente expresión

$$\dot{M}_{WS}C(T_S - T_D) + \dot{M}_{WR}C(T_R - T_D) = 0 \quad (47)$$

donde C es la capacidad calorífica, y T_S , T_R y T_D son las temperaturas de la succión, del río y de la descarga, respectivamente. Finalmente, ya que $\dot{M}_S = \dot{M}_R$, obtenemos

$$(T_S - T_D) + (T_R - T_D) = 0 \quad (48)$$

lo cual lleva a

$$T_D = \frac{T_S + T_R}{2} \quad (49)$$

A partir de los datos de batimetría [27] conocemos que $T_S = 28^\circ\text{C}$ y $T_R = 30.5^\circ\text{C}$; por lo tanto, $T_D = 29.26^\circ\text{C}$. El cálculo anterior implica que el cambio de temperatura máximo que puede sufrir el mar es de 1.26°C , lo cual constituye una variación admisible. En conclusión, la descarga no afecta significativamente las condiciones térmicas del mar.

3.2 Balance de Exergía para el volumen de control propuesto

El balance de exergía para el volumen de control está dado por la siguiente ecuación

$$\frac{dB}{dt} = \dot{B}_1 + \dot{B}_2 - \dot{B}_3 + \dot{B}_Q - \dot{B}_W - \dot{B}_D \quad (50)$$

donde \dot{B}_1 , \dot{B}_2 y \dot{B}_3 son las exergías asociadas a las Corrientes 1, 2 y 3 respectivamente. \dot{B}_Q es la exergía asociada al calor, \dot{B}_W es la exergía asociada al trabajo y \dot{B}_D es la exergía destruida. La exergía asociada a las corrientes está expresada por [48], [49]

$$\dot{B}_i = \dot{m}_i \left[(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right] + \dot{n}_i \bar{b}_{CH,i} \quad (51)$$

donde \dot{m}_i , h_i , s_i , V_i , Z_i , \dot{n}_i y $\bar{b}_{CH,i}$ son el flujo molar, la entalpía específica, la entropía específica, la velocidad, la altura, el flujo molar y la exergía química molar de la corriente $i = 1,2,3$, respectivamente. h_0 , s_0 y T_0 son la entalpía específica, la entropía específica y la temperatura del estado muerto, respectivamente. La exergía química molar está dada por [50]

$$\bar{b}_{CH,i} = \sum_j (x_j \bar{b}_{CH,j} + R_u T_0 x_j \ln x_j) \quad (52)$$

Donde x_j es la fracción mol del componente j ($j = \text{agua pura, sal}$) en el agua, $\bar{b}_{CH,j}$ es la exergía química molar del componente j (la exergía química del NaCl reportada en la literatura es de 14300 kJ/kmol mientras que la del agua es de 900 kJ/kmol [51]) y R_u es la constante universal de los gases ideales. Dado que el proceso de generación se puede considerar adiabático, la exergía asociada al calor \dot{B}_Q será despreciada en este estudio. Por otro lado, la exergía asociada al trabajo está dada por

$$\dot{B}_W = \dot{W}_c - \dot{W}_b \quad (53)$$

Donde \dot{W}_c es el trabajo producido por el sistema de generación por gradiente salino y \dot{W}_b es el trabajo consumido por el sistema de bombeo. Finalmente, considerando estado estacionario, despreciando los cambios en energía cinética y potencial y combinando las ecuaciones (50)-(53), obtenemos

$$\begin{aligned} \dot{m}_1[(h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0)] + \dot{n}_1 \bar{b}_{CH,1} + \dot{m}_2[(h_2 - h_0) - T_0(s_2 - s_0)] + \dot{n}_2 \bar{b}_{CH,2} \\ = \dot{m}_3[(h_3 - h_0) - T_0(s_3 - s_0)] + \dot{n}_3 \bar{b}_{CH,3} + (\dot{W}_c - \dot{W}_b) + \dot{B}_D \end{aligned} \quad (54)$$

Todos los términos de la ecuación (54) son conocidos, excepto \dot{B}_D y \dot{W}_b . Sin embargo, el trabajo asociado al bombeo puede ser calculado a partir de un balance de energía. De este modo, el balance de energía para el volumen de control presentado en la **Figura 2-3** en estado estacionario está expresado por

$$0 = \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 \right) + \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 \right) - \dot{m}_3 \left(h_3 + \frac{V_3^2}{2} + gZ_3 \right) - (\dot{W}_c - \dot{W}_b) - \dot{L} \quad (55)$$

Reorganizando se obtiene

$$\dot{W}_b = \dot{W}_c + \dot{L} - \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 \right) + \dot{m}_3 \left(h_3 + \frac{V_3^2}{2} + gZ_3 \right) \quad (56)$$

donde \dot{L} representa las pérdidas por fricción, las cuales se deben principalmente al paso de las corrientes a través de los filtros. No obstante, los fabricantes proporcionan la caída de presión asociada a cada filtro y no precisamente la pérdida de energía. Por lo tanto, es necesario realizar algunas operaciones con la ecuación (55) para expresarla en términos de presiones. Si expresamos la entalpía específica como

$$h = u + Pv \quad (57)$$

Donde u es la energía interna específica, P es la presión y v es el volume específico. Ahora, si reemplazamos la ecuación (56) en la ecuación (57), despreciamos los cambios en energía cinética y potencial, y dividimos por v , se obtiene

$$\frac{\dot{W}_b}{v} = \frac{\dot{W}_c}{v} + \frac{\dot{L}}{v} - \dot{m}_1 \left(\frac{u_1}{v} + P_1 \right) - \dot{m}_2 \left(\frac{u_2}{v} + P_2 \right) + \dot{m}_3 \left(\frac{u_3}{v} + P_3 \right) \quad (58)$$

Finalmente, considerando que el sistema es isotérmico, que $\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$, y que $P_1 = P_2 = P_0$, se tiene que

$$\frac{\dot{W}_b}{v} = \frac{\dot{W}_c}{v} + \frac{\dot{L}}{v} - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2)(P_0 - P_3) \quad (59)$$

Finalmente, dividiendo la ecuación (58) por $(\dot{m}_1 + \dot{m}_2)$, se obtiene

$$\frac{\dot{W}_b}{v(\dot{m}_1 + \dot{m}_2)} = \frac{\dot{W}_c}{v(\dot{m}_1 + \dot{m}_2)} + \frac{\dot{L}}{v(\dot{m}_1 + \dot{m}_2)} - (P_0 - P_3) \quad (60)$$

De este modo, se puede concluir a partir de la ecuación (60) que la caída de presión asociada al proceso de filtrado suministrada por el fabricante $\Delta P_{filtrado}$ está relacionada con \dot{L} mediante la siguiente expresión

$$\Delta P_{filtrado} = \frac{\dot{L}}{v(\dot{m}_1 + \dot{m}_2)} \quad (61)$$

Después de combinar las ecuaciones (56) y (61), se puede calcular el trabajo asociado al trabajo de bombeo para diferentes configuraciones. En la **Tabla 3-1** se presentan los principales parámetros usados para calcular \dot{W}_b variando el número de stacks.

Tabla 3-1. Parámetros usados para calcular el trabajo de bombeo.

| \dot{m}_1 [kg/h] | \dot{m}_2 [kg/h] | Número de stacks | Número de contenedores | Diámetro de tubería [in] | Tipo de filtro | $\Delta P_{filtrado}$ [bar] |
|--------------------|--------------------|------------------|------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------|
| 731,134 | 720,000 | 6 | 1 | 10 | FMA-2010 INOX | 0.2 |
| 1,462,267 | 1,440,000 | 12 | 2 | 14 | FMA-2010 INOX | 0.3 |
| 2,193,401 | 2,160,000 | 18 | 3 | 24 | 10214 | 0.2 |
| 2,924,534 | 2,880,000 | 24 | 4 | 24 | 10214 | 0.3 |
| 3,655,668 | 3,600,000 | 30 | 5 | 24 | 10214 | 0.35 |
| 4,386,802 | 4,320,000 | 36 | 6 | 28 | 10314 | 0.35 |
| 5,117,935 | 5,040,000 | 42 | 7 | 28 | 10314 | 0.4 |
| 5,849,069 | 5,760,000 | 48 | 8 | 32 | 10414 | 0.18 |
| 6,580,202 | 6,480,000 | 54 | 9 | 32 | 10414 | 0.3 |
| 7,311,336 | 7,200,000 | 60 | 10 | 32 | 10414 | 0.35 |

Por otro lado, en la **Figura 3-2** se observan las predicciones del trabajo de bombeo requerido y potencia neta generada para diferentes configuraciones. Se puede observar que para 48 stacks hay una disminución del trabajo de bombeo; sin embargo, esto se puede explicar por el hecho de que el diámetro de tubería para esta configuración es mayor que para la configuración de 42, lo cual tiene asociado una reducción en las pérdidas por fricción. Adicionalmente, en esta figura se observa que la potencia neta generada aumenta

con el número de stacks. Por lo tanto, desde el punto de vista de la primera ley de la termodinámica, al maximizar el número de stacks instalados también se maximiza la potencia producida.

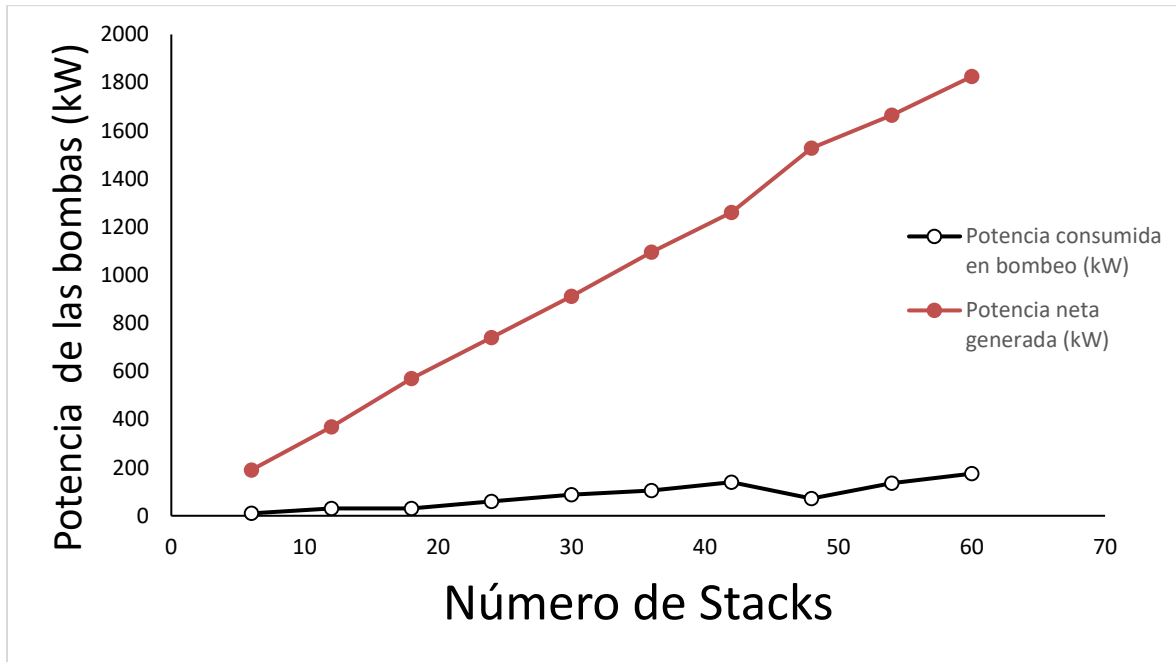


Figura 3-2. Trabajo de bombeo para diferentes configuraciones.

Finalmente, después de resolver las ecuaciones (51), (52), (53) y (54) se puede obtener las exergías de todas las corrientes, la cuales se pueden observar en la **Tabla 3-2**

Tabla 3-2. Resultados del balance de exergía.

| Número de stacks | \dot{B}_1 (kW) | \dot{B}_2 (kW) | \dot{B}_3 (kW) | \dot{W}_{neto} (kW) | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|--|
| | | | | | |

| | | | | | \dot{B}_D (kW) |
|----|---------|---------|---------|--------|------------------|
| 6 | 3445,8 | 3013,2 | 6249,1 | 190,0 | 19,9 |
| 12 | 6891,6 | 6026,4 | 12498,1 | 370,0 | 49,9 |
| 18 | 10337,4 | 9039,6 | 18747,2 | 570,0 | 59,8 |
| 24 | 13783,2 | 12052,8 | 24996,2 | 740,0 | 99,8 |
| 30 | 17229,0 | 15066,0 | 31245,3 | 912,5 | 137,2 |
| 36 | 20674,8 | 18079,2 | 37494,4 | 1095,0 | 164,6 |
| 42 | 24120,6 | 21092,4 | 43743,4 | 1260,0 | 209,6 |
| 48 | 27566,4 | 24105,6 | 49992,5 | 1528,0 | 151,5 |
| 54 | 31012,2 | 27118,8 | 56241,6 | 1665,0 | 224,5 |
| 60 | 34458,0 | 30132,0 | 62490,6 | 1825,0 | 274,4 |

Cabe mencionar que como el sistema se encuentra a temperatura y presión ambiental, el principal cambio de exergía se debe al proceso de mezcla que se da en las celdas de generación, el cual produce una disminución de la exergía química específica de la corriente de descarga.

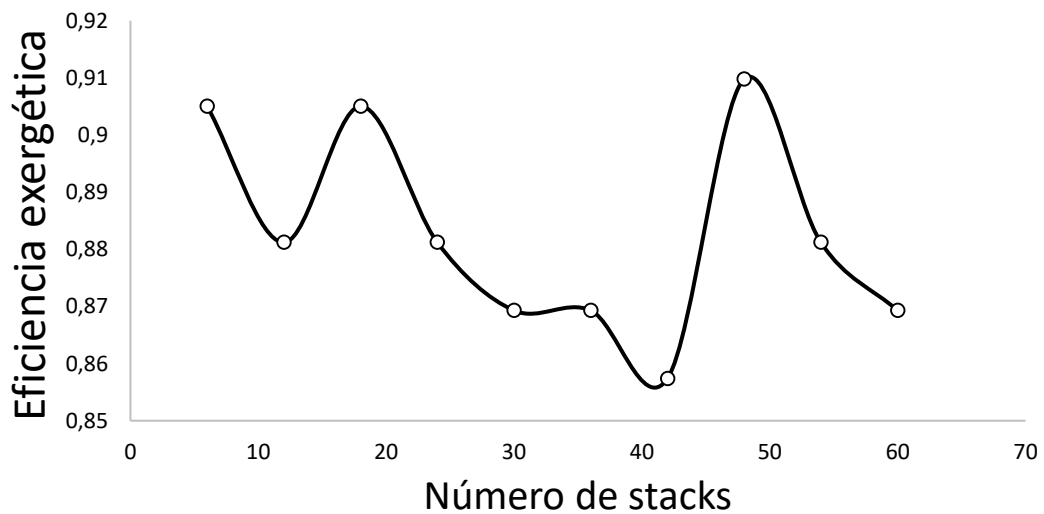


Figura 3-3. Eficiencia exergética para diferentes configuraciones.

Por otro lado, la **Figura 3-3** muestra la eficiencia exergética calculada para diferente cantidad de stacks. En esta figura se observa que la eficiencia exergética tiene un comportamiento fluctuante; sin embargo, se puede ver un máximo para un número de stacks igual a 48. Por lo tanto, desde el punto de vista de la primera ley de la termodinámica se encuentra que la configuración ideal es en la que el número de stacks es máximo, mientras desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica se encuentra que el número óptimo de stacks es 48.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

La energía de los gradientes salinos es una forma de energía que tiene un alto potencial de aprovechamiento en el Caribe Colombiano. En este trabajo se encontró, a partir de un modelo físico de base fenomenológica de RED, que el cambio en salinidad que experimentan las aguas en un stack de tamaño comercial es del 16.7% (De 6.02 g/kg para ambos tipos de agua); donde se podría inferir que las posibles modificaciones al medio, producto de las actividades de transformación de la EGS en energía eléctrica, no son debidas a los cambios en salinidad sino a los volúmenes de agua que se extraigan del ecosistema.

El estimar el efecto del número de *stacks* en el área fraccional afectada en estado estacionario, se observa que de 1 a 20 *stacks* hay un aumento considerable del área fraccional afectada; sin embargo, dicho incremento se vuelve cada vez más leve a medida que se aumenta el número de *stacks* y el área fraccional afectada se estabiliza en un valor de alrededor de 0.38

El cambio de temperatura máximo que puede sufrir el mar es de 1.26 °C en la descarga, lo cual constituye una variación admisible matemáticamente. En conclusión, la descarga no afecta significativamente las condiciones térmicas del mar, pero esto no aplica para las condiciones bióticas. Además, la estimación se realizó sin tener en cuenta el proceso mismo de RED.

La eficiencia exergética tiene un comportamiento fluctuante; sin embargo, se puede ver un máximo para un número de *stacks* igual a 48 (6 contenedores). Por lo tanto, desde el punto de vista de la primera ley de la termodinámica se encuentra que la configuración ideal es en la que el número de *stacks* es máximo, mientras desde el punto de vista de la segunda

ley de la termodinámica se encuentra que el número óptimo de stacks es 48. Las fluctuaciones en este comportamiento se deben al tipo de equipos comerciales disponibles para los caudales utilizados.

Aunque la eficiencia exergética muestra que el número óptimo son 48 stacks, el área de afectación por el cambio de salinidad muestra que debería ser un solo stack.

4.2 Recomendaciones

Los análisis realizados se hicieron partiendo de que la salinidad de las aguas se debe completamente al cloruro de sodio. Aunque la anterior es una aproximación común en el área de la EGS, no se puede dejar de lado que las aguas naturales están compuestas por más tipos de sales, los cuales contribuyen los cambios de salinidad de las aguas, afectan la eficiencia de las aguas y sus propiedades. A medida que se avance en la modelación de la tecnología de electrodiálisis inversa con otros iones monovalentes y multivalentes, los cálculos se deben actualizar con composiciones similares a las del río Magdalena y el mar Caribe, con fines de escalado y prueba en campo.

Se recomienda incluir las variaciones en temperatura que se dan en el proceso de RED.

Se debe realizar estudios que muestren la verdadera afectación de la parte biótica, dado que el máximo cambio supuesto en el 1% para el área de afectación y cambio de temperatura podrían generar cambios en la configuración óptima y en la toma de decisiones para la instalación de estos arreglos.

En cuanto al uso del recurso y la renovabilidad del mismo se deberían revisar otros estudios como el análisis emergético.

Se recomienda utilizar el Análisis de Ciclo de Vida unido al Análisis Exergético, como indicador de gestión de los recursos renovables y como evaluadores de la eficiencia energética y los impactos ambientales de generación de energía eléctrica a partir de energía por gradiente salino.

Así como la evaluación de un modelo de gestión sostenible que tome en cuenta los factores de capital natural crítico como la propuesta por Lopera en 2009 propuesta por Lopera (Lopera, 2009) para dar respuesta a la gestión sostenible de la generación de energía eléctrica a partir de energía por gradiente salino.

También se recomienda evaluar el sistema en términos de costos reales de generación de energía y de distribución de la misma una vez la tecnología esté un poco más madura. Hay estudios que muestran valores de alrededor de 35 mil euros por stack [10].

Bibliografía

- [1] United Nations - UN, "The Ocean Conference," New York, 2017.
- [2] M. Melikoglu, "Current status and future of ocean energy sources: A global review," *Ocean Eng.*, vol. 148, pp. 563–573, 2018.
- [3] UPME, "Informe Mensual de Variables de Generación y del Mercado Eléctrico Colombiano - agosto de 2018," Bogotá D.C, 2018.
- [4] O. Alvarez-Silva, A. F. Osorio, and C. Winter, "Practical global salinity gradient energy potential," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1387–1395, 2016.
- [5] J. Veerman, "Reverse Electrodialysis design and optimization by modeling and experimentation," University of Groningen, Groningen, 2010.
- [6] J. Moreno, S. Grasman, R. Van Engelen, and K. Nijmeijer, "Upscaling Reverse Electrodialysis," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 18, pp. 10856–10863, 2018.
- [7] O. Alvarez-Silva and A. F. Osorio, "Salinity gradient energy potential in Colombia considering site specific constraints," *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 737–748, 2014.
- [8] S. Vallejo, "Energy generation from salinity gradients through Reverse Electrodialysis and Capacitive Reverse Electrodialysis," Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, 2017.
- [9] N. Y. Yip and M. Elimelech, "Comparison of energy efficiency and power density in pressure retarded osmosis and reverse electrodialysis," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, no. 18, pp. 11002–11012, 2014.
- [10] R. A. Tufa *et al.*, "Progress and prospects in reverse electrodialysis for salinity gradient energy conversion and storage," *Appl. Energy*, vol. 225, no. May, pp. 290–331, 2018.
- [11] M. Tedesco, H. V. M. Hamelers, and P. M. Biesheuvel, "Nernst-Planck transport theory for (reverse) electrodialysis: I. Effect of co-ion transport through the membranes," *J. Memb. Sci.*, vol. 510, pp. 370–381, Jul. 2016.
- [12] N. Y. Yip, D. Brogioli, H. V. M. Hamelers, and K. Nijmeijer, "Salinity gradients for sustainable energy: Primer, progress, and prospects," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 22, pp. 12072–12094, 2016.
- [13] A. Cipollina *et al.*, "Reverse electrodialysis: Applications," in *Sustainable Energy from Salinity Gradients*, Elsevier, 2016, pp. 135–180.

-
- [14] M. Tedesco, A. Cipollina, A. Tamburini, and G. Micale, "Towards 1 kW power production in a reverse electro dialysis pilot plant with saline waters and concentrated brines," *J. Memb. Sci.*, vol. 522, pp. 226–236, 2016.
- [15] J. W. Post *et al.*, "Towards implementation of reverse electro dialysis for power generation from salinity gradients," *Desalin. Water Treat.*, vol. 16, no. 1–3, pp. 182–193, 2010.
- [16] J.-Y. Nam *et al.*, "Assessing the behavior of the feed-water constituents of a pilot-scale 1000-cell-pair reverse electro dialysis with seawater and municipal wastewater effluent," *Water Res.*, vol. 148, pp. 261–271, Jan. 2019.
- [17] J. Veerman, M. Saakes, S. J. Metz, and G. J. Harmsen, "Reverse electro dialysis: A validated process model for design and optimization," *Chem. Eng. J.*, vol. 166, pp. 256–268, 2011.
- [18] J. Veerman, M. Saakes, S. J. Metz, and G. J. Harmsen, "Reverse electro dialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water," *J. Memb. Sci.*, vol. 327, pp. 136–144, 2009.
- [19] D. a. Vermaas, M. Saakes, and K. Nijmeijer, "Doubled power density from salinity gradients at reduced intermembrane distance," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 16, pp. 7089–7095, 2011.
- [20] M. Tedesco, A. Cipollina, A. Tamburini, W. van Baak, and G. Micale, "Modelling the Reverse Electro Dialysis process with seawater and concentrated brines," *Desalin. Water Treat.*, vol. 49, no. 1–3, pp. 404–424, 2012.
- [21] S. Pawlowski, J. G. Crespo, and S. Velizarov, "Pressure drop in reverse electro dialysis: Experimental and modeling studies for stacks with variable number of cell pairs," *J. Memb. Sci.*, vol. 462, pp. 96–111, 2014.
- [22] L. Gurreri, A. Tamburini, A. Cipollina, G. Micale, and M. Ciofalo, "Flow and mass transfer in spacer-filled channels for reverse electro dialysis: a CFD parametrical study," *J. Memb. Sci.*, vol. 497, pp. 300–317, 2016.
- [23] R. Ibañez, M. Fallanza, L. Gomez-Coma, R. Ortiz-Imedio, I. Ortiz, and A. Ortiz, "Comparative performance of Salinity Gradient Power-Reverse Electro dialysis under different operating conditions," *Desalination*, vol. 457, no. December 2018, pp. 8–21, 2019.
- [24] S. Vallejo-Castaño and C. I. Sánchez-Sáenz, "Design and optimization of a reverse electro dialysis stack for energy generation through salinity gradients," *DYNA*, vol. 84, no. 202, pp. 84–91, Jul. 2017.
- [25] O. Alvarez-Silva and A. F. Osorio, "Salinity gradient energy potential in Colombia considering site specific constraints," *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 737–748, Feb. 2015.
- [26] M. Tedesco, A. Cipollina, A. Tamburini, I. D. L. Bogle, and G. Micale, "A simulation

- tool for analysis and design of reverse electro dialysis using concentrated brines,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 93, no. May, pp. 441–456, 2015.
- [27] G. D. I. E. FÍSICA, E. I. D. E. HIDRÁULICOS, and AMBIENTALES, “ANÁLISIS DEL POTENCIAL NETO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DE GRADIENTE SALINO EN LA DESEMBOCADURA DEL RÍO MAGDALENA,” Barranquilla, Colombia, 2015.
- [28] C. S. Yentsch, “Estimates of ‘new production’ in the Mid-North Atlantic,” *J. Plankton Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 717–734, Jan. 1990.
- [29] A. M. Davies, P. Hall, M. J. Howarth, and P. Knight, “Modelling and measuring the wind forced inflow to the Irish Sea through the North Channel,” *Cont. Shelf Res.*, vol. 22, no. 5, pp. 749–777, Mar. 2002.
- [30] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 5th Edition with IHT2.0/FEHT with Users Guides*, 5th ed. Wiley, 2001.
- [31] A. Poisson and A. Papaud, “Diffusion coefficients of major ions in seawater,” *Mar. Chem.*, vol. 13, no. 4, pp. 265–280, Oct. 1983.
- [32] J. L. Richardson *et al.*, *Sea Water Mass Diffusion Coefficient Studies*. Applied Research Laboratories, Aeronautic Division, Philco Corporation, 1965.
- [33] D. R. Caldwell, “Thermal and Fickian diffusion of sodium chloride in a solution of oceanic concentration,” *Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr.*, vol. 20, no. 11, pp. 1029–1039, Nov. 1973.
- [34] “es.windfinder.com.” .
- [35] C. S. Durst, “The relationship between current and wind,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 50, no. 210, pp. 113–119, Aug. 2007.
- [36] J. E. Weber and J. E. Weber, “Steady Wind- and Wave-Induced Currents in the Open Ocean,” *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 13, no. 3, pp. 524–530, Mar. 1983.
- [37] I. V. (Igor' V. Lavrenov, *Wind-waves in oceans : dynamics and numerical simulations*. .
- [38] H.-G. Ramming and Z. Kowalik, *Numerical modelling of marine hydrodynamics : applications to dynamic physical processes*. Elsevier Scientific Pub. Co., 1980.
- [39] B. Henderson-Sellers, “The dependence of surface velocity in water bodies on wind velocity and latitude,” *Appl. Math. Model.*, vol. 12, no. 2, pp. 202–203, Apr. 1988.
- [40] S. D. Smith and E. G. Banke, “Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 101, no. 429, pp. 665–673, Jul. 1975.
- [41] S. D. Smith, “Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature,” *J. Geophys. Res.*, vol. 93, no. C12, p. 15467, Dec. 1988.

- [42] H. K. (Henk K. Versteeg and W. (Weeratunge) Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method*. Pearson Education Ltd, 2007.
- [43] M. H. Sharqawy, J. H. Lienhard, and S. M. Zubair, "Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data," *Desalin. Water Treat.*, vol. 16, no. 1–3, pp. 354–380, Apr. 2010.
- [44] K. J. Beers, *Numerical Methods for Chemical Engineering: Applications in MATLAB*. Cambridge University Press, 2007.
- [45] S. V. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Pub. Corp., 1980.
- [46] H. P. Langtangen, *Computational partial differential equations : numerical methods and Diffpack programming*. Springer, 2003.
- [47] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th Ed. Boston, MA, 2006.
- [48] A. Bejan and M. J. Moran, *Thermal Design and Optimization*. 1996.
- [49] M. J. Moran and H. N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 6th ed. John Wiley & Sons Australia, Limited, 2009.
- [50] M. Fallah, S. M. S. Mahmoudi, and M. Yari, "A comparative advanced exergy analysis for a solid oxide fuel cell using the engineering and modified hybrid methods," *Energy Convers. Manag.*, vol. 168, pp. 576–587, 2018.
- [51] L. Fitzsimons, B. Corcoran, P. Young, and G. Foley, "Desalination exergy models: A mathematical model comparison," in *5th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-5)*, 2010.