

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Diseño de un módulo de desalinización de agua salobre mediante electrodiálisis capacitiva para obtención de agua de uso industrial: Caso de estudio empacadora de camarón.

### **PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Previo la obtención del Título de:

**Máster en ingeniería civil con mención a construcción y saneamiento**

Presentado por:

Oswaldo Simón Vélez Villacis

Amílcar Fidel Valdivieso Toledo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo va dedicado a nuestras familias, parejas, amigos y colegas. Sobre todo, a cada joven que se vea interesado por seguir aprendiendo y aumentando sus conocimientos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro más grande agradecimiento a la empresa CODEMET por financiar nuestra educación y preparación. A los ingenieros Fernando Idrovo y José Carlos Pere, sobre todo a Fernando Idrovo Peña por siempre confiar en nosotros y abrirnos las puertas de nuevas oportunidades. Finalmente, al grupo de investigación del laboratorio de Sanitaria de la ESPOL, dirigidos por la PhD. Priscila Valverde y el PhD. Leonardo Gutiérrez, quienes nos apoyaron en todo momento.

## DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotros Amílcar Fidel Valdivieso Toledo y Oswaldo Simón Vélez Villacis acordamos y reconocemos que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 21 de noviembre del 2025.

---

Ing. Amílcar Valdivieso

---

Ing. Oswaldo Vélez

## EVALUADORES

---

**Ing. Fernanda Mejía Peralta, M.Sc.**

Profesor de Materia

---

**Ing. Samantha Jiménez Oyola, Ph.D.**

Profesor de Materia

---

**Ing. Leonardo Gutiérrez Garces,  
Ph.D.**

Tutor de proyecto

---

**Ing. Priscila Valverde Armas, Ph.D.**

Cotutor de proyecto

## RESUMEN

El presente proyecto aborda el diseño de un sistema de tratamiento de agua salobre para uso industrial en una empacadora de camarón ubicada en el sur de Guayaquil, con el fin de garantizar un suministro de agua de calidad potable mediante la aplicación de electrodiálisis capacitiva. Se plantea como objetivo principal disminuir los niveles de salinidad del agua captada del río Guayas. Se justifica por la necesidad de asegurar la continuidad operativa y reducir los costos asociados al uso de agua potable proveniente de la red pública, proponiendo una tecnología energéticamente eficiente y sostenible.

El estudio se desarrolló a partir de la caracterización del agua, el levantamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) existente y la experimentación con un módulo de electrodiálisis a escala de laboratorio. Para este propósito, se emplearon equipos de medición multiparamétrica, bombas peristálticas y un potenciómetro, registrando parámetros de voltaje, corriente, caudal y sólidos disueltos totales (SDT) conforme a las normas INEN 1108 y TULSMA.

Los resultados mostraron que el sistema de dos etapas de electrodiálisis permitió reducir los SDT desde 5.95 g/L hasta valores proyectados inferiores a 1 g/L, con una energía específica de 0.44 a 0.48 kWh/m<sup>3</sup>. Se diseñó un modelo a escala con capacidad de tratar 216 m<sup>3</sup>/h de agua, con un costo estimado de \$3.45 millones de años por cada 5 años de operación, lo que resulta competitivo frente a tecnologías convencionales. Se concluye que la electrodiálisis capacitiva constituye una alternativa viable técnica y económicamente para el tratamiento de agua salobre en la industria camaronera, favoreciendo la eficiencia energética y la sostenibilidad del recurso hídrico.

**Palabras Clave:** Electrodiálisis capacitiva, desalinización, energía específica, industria camaronera.

## **ABSTRACT**

*The present project addresses the design of a brackish water treatment system for industrial use in a shrimp packing plant, located south of Guayaquil, with the purpose of ensuring a potable quality water supply through the application of capacitive electrodialysis. The main objective of this document is to reduce the salinity levels of water drawn from the Guayas river. The study is justified by the need to ensure operational continuity and reduce the costs associated with the use of potable water from public networks, presenting energy-efficient and sustainable technology.*

*The study was developed based on water characterization, the survey of the existing water treatment plant, and experimentation with a laboratory scale electrodialysis module. For this purpose, were employed multiparameter equipment, peristaltic pumps, and potentiostat, and recording parameters such as voltage, current, flow rate and total dissolved solids (TDS). The proposed design is in accordance with INEN 1108 and TULSMA standards.*

*The results showed that the two stage electrodialysis system enabled the reduction of TDS from 5.95 g/L to projected values bellows 1 g/L, with a specific energy consumption ranging from 0.44 to 0.48 kWh/m<sup>3</sup>. The laboratory design was scaled up to treat 216 m<sup>3</sup>/hr with an estimated cost of \$3.45 million for every five years of operation, which is competitive compared to conventional technologies. It is concluded that capacitive electrodialysis represents a technically and economically viable alternative for the treatment of brackish water in the shrimp industry, promoting energy efficiency and sustainability of water resources.*

**Keywords:** *Capacitive Electrodialysis, desalination, energy efficiency, shrimp industry.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XI
ÍNDICE DE PLANOS .....	XI
CAPÍTULO 1.....	12
Introducción .....	12
1.1    Antecedentes.....	12
1.2    Localización .....	14
1.3    Estudios previos .....	15
1.4    Definición del problema .....	17
1.5    Justificación .....	17
1.6    Objetivos.....	18
1.6.1    Objetivo General .....	18
1.6.2    Objetivos Específicos.....	18
CAPÍTULO 2.....	20
Desarrollo del proyecto .....	20
2.1    Marco conceptual.....	20
2.1.1    Electrodialisis capacitiva (E.C). .....	20
2.1.2    Estado de la E.C con respecto a otras tecnologías.....	23
2.1.3    Aplicaciones en las industrias. ....	25

2.2	Marco metodológico.....	25
2.2.1	Trabajos previos.....	25
2.2.2	Trabajo de campo .....	27
2.2.3	Trabajo de laboratorio .....	29
2.2.4	Tabulación de datos .....	31
2.2.5	Solución a diseñar.....	31
CAPÍTULO 3.....		32
Resultados Y Discusión .....		32
3.1	Resultados.....	32
3.1.1	Caracterización in situ de los puntos de muestreo de la PTAP actual. ..	32
3.1.2	Simulación del primer stack. ....	32
3.1.3	Simulación del primer stack con parámetros optimizados.....	36
3.1.4	Simulación del segundo stack.....	36
3.2	Extrapolación módulo de tratamiento.....	41
3.2.1	Propuestas de diseño.....	42
3.3	Análisis costo beneficio.....	43
3.3.1	Escenario base.....	44
3.3.2	Escenario de tratamiento. ....	44
3.3.3	Escenario de tratamiento. ....	46
3.4	Especificaciones técnicas .....	48
3.5	Diseño de la solución.....	49
3.5.1	Diagrama de flujo del sistema. ....	49
3.5.2	Modelo BIM de la solución. ....	50
3.6	Precios CAPEX de la solución.....	53
CAPÍTULO 4.....		54
Conclusiones Y Recomendaciones .....		54

4.1	Conclusiones .....	54
4.2	Recomendaciones .....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	PLANOS Y ANEXOS.....	59

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PTAP	Planta de Tratamiento de Agua Potable
EC	Electrodiálisis Capacitiva
SDT	Sólidos Disueltos Totales
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
PAC	Policloroaluminato de Aluminio
BIM	Building Information Modeling
CAPEX	Capital Expenditure
OPEX	Operational Expenditure
FAO	Food and Agriculture Organization
OMS	Organización Mundial de la Salud
FDA	Food and Drug Administration (EE. UU.)
BRC	British Retail Consortium
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Points
FSSC	Food Safety System Certification
IFS	International Featured Standards
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente
WHO	World Health Organization
PVC	Policloro de Vinilo
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
MPCEIP	Ministerio de Producción, Comercio Exterior e Inversiones

## SIMBOLOGÍA

pH	Potencial de Hidrógeno
T	Temperatura (°C)
$\mu\text{S/cm}$	Microsiemens por centímetro
mS/cm	Milisiemens por centímetro
$\text{m}^3/\text{h}$	Metro cúbico por hora
A	Amperio
V	Voltio
P	Densidad
$\Delta\text{C}$	Diferencia de concentración
$\text{R}^2$	Coeficiente de determinación
$\text{kWh/m}^3$	Kilovatio-hora por metro cúbico
mg/L	Miligramos por litro
cm/s	Centímetros por segundo

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Mapa de ubicación de la zona de estudio</i> .....	15
Figura 2: Diagrama de electrodiálisis capacitiva en polaridad negativa.....	21
Figura 3: Diagrama de electrodiálisis capacitiva en polaridad positiva. ....	21
Figura 4: Sólidos Disueltos Totales del río Guayas en las cercanías del punto de captación en alta mar.....	26
Figura 5: Conductividad del río Guayas en las cercanías del punto de captación en alta mar.....	26
Figura 6: Captación de la PTAP.....	27
Figura : Unidades de tratamiento.....	28
Figura 8: (a)Punto de muestreo de la captación. (b) Punto de muestreo a la salida del filtro .....	29
Figura 9: Diagrama carga vs tiempo para cada experimento. ....	30
Figura 10: Variación de corriente eléctrica vs Tiempo (4.5 V-400ml/min).....	33
Figura 11: Variación de CE vs Tiempo (4.5 V-400ml/min).....	34
Figura 12: Variación de voltaje- eficiencia de remoción- energía específica. ....	35
Figura 13: Resultados del primer stack en disminución de SDT.....	35
Figura 14: Comparación de los resultados experimentales con el piloto de pasar agua por el primer stack con las condiciones de 4.5 V-400 ml/min. ....	36
Figura 15 Experimento 7V-400ml/min.....	37
Figura 16: Variación de voltaje- eficiencia de remoción- energía específica- segundo stack. ....	38
Figura 17 Resultados de experimentación del segundo stack.....	38
Figura 18 Grafica Voltaje vs Eficiencia de remoción.....	39
Figura 19 Grafica voltaje vs Energía específica.....	39
Figura 20 Resultados proyectados para el segundo stack. ....	40
Figura 21 Capex por los m <sup>2</sup> de membrana. ....	45
Figura 22 Opex por consumo energético.....	46
Figura 23 Costo beneficio de la propuesta 1. ....	46
Figura 24 Costo beneficio de la propuesta 2. ....	47
Figura 25 Costos y beneficios acumulados en 5 años- Propuesta 1. ....	47
Figura 26 Costos y beneficios acumulados en 5 años- Propuesta 2. ....	48

Figura 27: Diagrama de flujo de la solución.....	49
Figura 28: Implantación de modelo.....	51
Figura 29: Vista 3D del modelo.....	51
Figura 30: Vista lateral del modelo.....	52
Figura 31: Vista 3D de conexión entre módulos. ....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Promedio de parámetros del río en dos épocas del año (lluviosa y seca). Fuente datos proporcionados por la camaronera.</i> .....	16
Tabla : Dimensiones de unidades de tratamiento. ....	28
Tabla 3: Resultados de la caracterización in situ de los puntos de muestreo. ....	32
Tabla 4 Parámetros optimizados para cada stack a escala de laboratorio. ....	41
Tabla Dimensiones del stack. ....	41
Tabla 6 Velocidades del stack bajo los 400 ml/min. ....	41
Tabla 7 Dimensiones del stack propuesta 1. ....	42
Tabla 8 Dimensiones del stack propuesta 2. ....	43
Tabla 9 Velocidades del stack propuesta 2. ....	43
Tabla 10 Resultados de la propuesta 2. ....	43
Tabla 11 Resultados del escenario base. ....	44
Tabla 12 Capex de las 2 propuestas. ....	45
Tabla :Costos de implementación.....	53

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Toma de parámetros el agua de captación.....	59
Anexo 3: PH en la captación.....	59
Anexo 4: Turbiedad en captación. ....	60
Anexo 5: Primera toma de parámetros en agua tratada. ....	60
Anexo 6: Segunda toma de parámetros en agua tratada. ....	61
Anexo 7: Turbiedad en agua tratada.....	61

## ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Implementación del módulo de desalinización.
PLANO 2	Vista 3D del módulo de desalinización.
PLANO 3	Diagrama de flujo.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

En el Ecuador, la industria del camarón representa aproximadamente el 27,0 % del total de exportaciones no petroleras, consolidándose como una de las actividades económicas más importantes del país (MPCEIP, 2024). Es así como la producción camaronera es un pilar económico nacional, con exportaciones que alcanzaron aproximadamente USD 6 070 millones en 2024, consolidando al país como uno de los mayores exportadores de camarón a nivel mundial (SeafoodSource, 2024). La mayor parte de la industria camaronera en Ecuador se concentra en la provincia del Guayas, donde existen aproximadamente 210 000 hectáreas dedicadas al cultivo de camarón, de las cuales alrededor del 60 % está en la provincia del Guayas, consolidando a esta zona como el principal núcleo productivo del sector (Piedra & Aguirre, 2022).

En las empacadoras de camarón, el agua es un recurso esencial para garantizar la salubridad y calidad del producto final. Durante el procesamiento, el agua se utiliza en diversas etapas, como el lavado inicial del camarón, la remoción de impurezas, el pelado, la limpieza de equipos, el enfriamiento con hielo y el envasado. También se emplea intensivamente en el saneamiento de las instalaciones. Según Casani (2006), el procesamiento de camarón puede requerir aproximadamente 50 toneladas de agua por cada tonelada de producto, lo que equivale a 50 m<sup>3</sup>/t. A su vez Malmstedt (2019), reporta un consumo similar de 50 000 litros de agua por tonelada de camarón pelado, equivalente también a 50 m<sup>3</sup> por tonelada. Estos valores reflejan la alta demanda hídrica de la industria camaronera durante la fase de transformación del producto, sin considerar aún el agua empleada en la crianza o cultivo.

La industria camaronera en Guayaquil representa una base económica del sector productivo local, albergando numerosas empresas dedicadas al cultivo, procesamiento y exportación de camarón (Piedra & Aguirre, 2022). Gracias a su ubicación estratégica y conectividad portuaria, la ciudad se ha consolidado como un centro logístico clave que dinamiza la economía regional. Esta actividad genera miles de empleos directos e

indirectos, impulsa la inversión en infraestructura tecnológica y contribuye significativamente a las exportaciones no petroleras del país. Además, el desarrollo de centros de procesamiento y plantas empacadoras en la zona permite agregar valor al producto, fortaleciendo la competitividad del camarón ecuatoriano en mercados internacionales.

Una estrategia de los empresarios, de este sector, es ubicar la empacadora lo más cercano posible a sus piscinas de camarón para optimizar la logística de sus operaciones. Lo que implica que en ciertas ocasiones no tengan la facilidad de obtener agua desde la red pública, sino que tengan que extraerla desde fuentes naturales como pozos o ríos. Ya que las piscinas de camarón tienen que ubicarse lo más cercano posible a una fuente de agua salobre, las fuentes de agua disponibles también se contaminan de sales.

Para poder exportar el camarón a otros mercados más grandes, como el norteamericano, es importante cumplir con certificaciones que avalen la calidad del producto que se exporta. Entre ellas tenemos HACCP, BRC, FSSC y la IFS; que siguen estándares o códigos internacionales de la FDA, la Unión Europea, la FAO o la OMS. Por lo que indica el Parlamento Europeo en su reglamento 853/2004, todo operador de alimentos tiene que utilizar agua potable para actividades de limpieza de productos o por lo menos agua que se considere limpia. Por otro lado, FAO & OMS. (1981) en su CODEX STAN 92-1981, indica que todo producto que se encuentre roseado por una capa de hielo, el agua que se empleó deberá tener una calidad potable o de agua de mar limpia. Mientras que, OIRSA (2017) solo indica que el agua tiene que ser segura para el uso que se le vaya a dar. Finalmente, según el Registro Oficial del Ecuador, en su Reglamento para las Buenas Prácticas de Manufactura también se especifica que se puede usar agua potable o un agua tratada según normas internacionales. Sin embargo, en todas estas certificaciones no se indica a que parámetros llegar para la calidad de agua, por lo que las empresas del sector camaronero apuntan a una calidad potable en base a sus normativas locales.

Hoy en día, las tecnologías con membranas son un componente fundamental de los métodos para desalinizar agua, ya que permiten separar de manera selectiva contaminantes y sales disueltas con gran eficacia. Estas tecnologías se fundamentan en

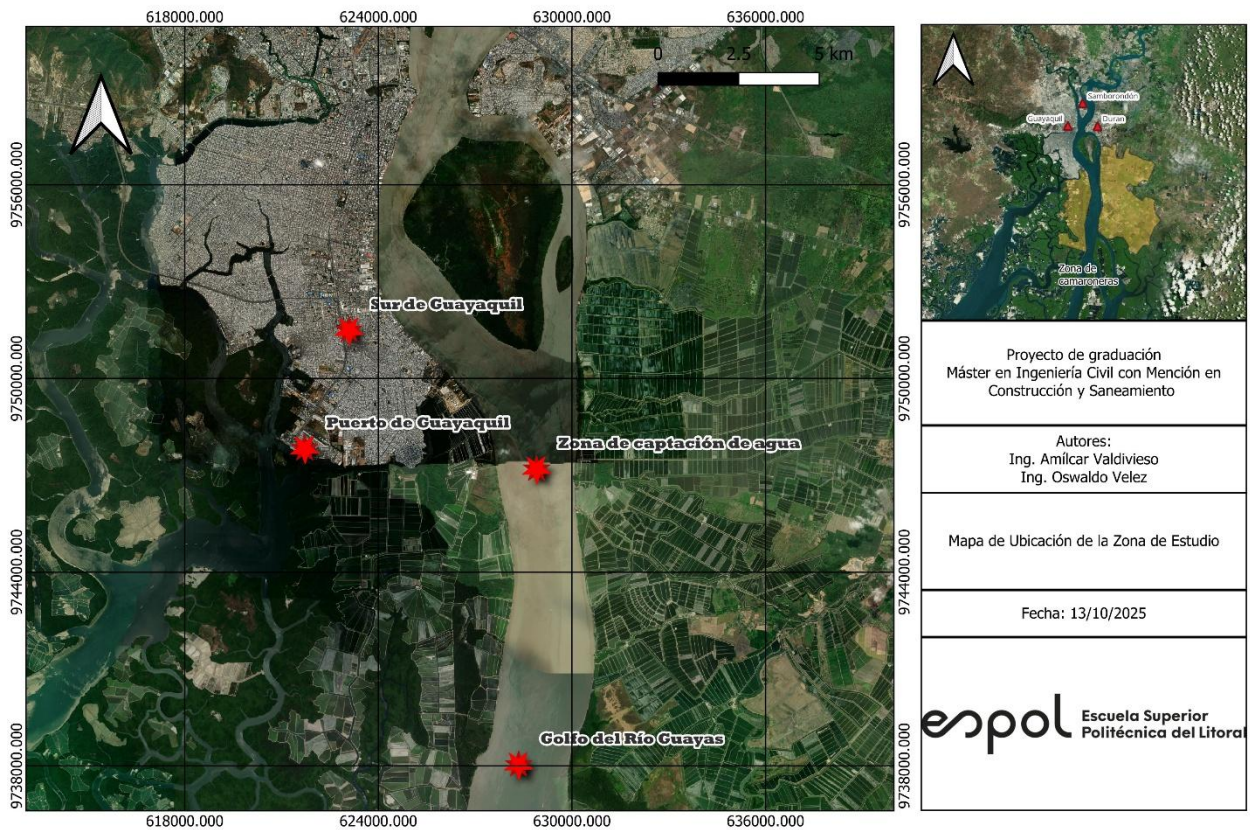
la utilización de membranas semipermeables, las cuales posibilitan el paso del agua, pero limitan los solutos y iones, empleando diversos métodos de transporte dependiendo del tipo de proceso. La electrodiálisis (ED), la nanofiltración (NF), la ósmosis inversa (RO) y la ultrafiltración (UF) son algunos de los métodos más empleados (Shannon, y otros, 2008).

Una de las variables económicas más importantes, en las tecnologías con membranas, es el consumo de energía para tratar el agua. La tecnología de electrodiálisis se presenta como un buen candidato para tratar el agua salobre, dado que se ha reportado que ha presentado un consumo energético de entre 0.75 a 2.5 kWh/m<sup>3</sup>, que ha permitido su implementación con paneles solares, y al ser una tecnología que a diferencia de la osmosis no presenta una obstrucción tan significativa en sus membranas (Roman, y otros, 2021).

## **1.2 Localización**

La Figura 1 muestra la ubicación de la zona de estudio en el cantón Guayaquil, identificando los principales puntos de interés vinculados al caso de investigación. Se observa la zona sur de la ciudad, donde se encuentra la empacadora de camarón, así como el puerto de Guayaquil y la zona de captación de agua en el río Guayas, la cual abastece a la PTAP existente. Esta localización es estratégica debido a la cercanía con las áreas de camaroneras, situadas en el estuario del golfo del río Guayas. Se evidencia la cercanía entre la captación, las piscinas de camarón y la industria empacadora.

Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio



### 1.3 Estudios previos

Se cuenta con datos de calidad del agua de captación de la camaronera, de los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre del 2021, en 4 puntos de muestreo cercanos a la empacadora de camarón y marea baja como en alta. Estos datos resultan de gran relevancia para el desarrollo de la investigación, permiten comprender las condiciones de calidad de agua de la fuente de captación y a su vez evidencia la existencia de salinidad, por ello, un método tradicional de potabilización no lograría disminuir los parámetros de salinidad y se requiere un tratamiento más complejo al actual.

Se procedió a tratar la información depurando y organizando los datos con el fin de tener valores representativos. Se calculó el promedio de los parámetros más importantes durante todo el mes de muestreo y se los presenta en la tabla 1.

**Tabla 1:** Promedio de parámetros del río en dos épocas del año (lluviosa y seca). Fuente datos proporcionados por la camaronera.

PARÁMETRO	FEBRERO 2021	MAYO 2021	AGOSTO 2021	NOVIEMBRE 2021
<b>CLORUROS (mg/L)</b>	60,25	21,88	2850,75	3062,50
<b>CONDUCTIVIDAD (μS/cm)</b>	345,38	182,88	9043,75	9811,25
<b>SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (mg/L)</b>	183,25	94,75	5468,75	5456,75
<b>SULFATOS (mg/L)</b>	15,63	11,88	421,25	455,25

En los meses de febrero y mayo, que corresponden a la temporada de lluvias, los niveles de cloruros y sólidos disueltos totales (SDT) se conservan relativamente bajos, registrando concentraciones en febrero de 60 mg/L de cloruros y 183 mg/L de SDT, en mayo de 21 de cloruros mg/L y 94 mg/L de SDT. Estos niveles, a pesar de ser menores a los límites fijados por la norma INEN 1108 y el TULSMA, ya indican que el agua posee una considerable carga de sales, lo que supone un desafío para los procesos industriales que requieren un abastecimiento continuo de agua potable o de calidad regulada. Sin embargo, lo más crítico sucede en la época de estiaje donde no hay lluvias, es decir los meses de agosto y noviembre. En este periodo la concentración de sales aumenta registrando valores en agosto de 2 850 mg/L de cloruros y cerca de 5 468 mg/L de sólidos disueltos totales, mientras que en noviembre los valores alcanzan 3 062 mg/L de cloruros y 5 456 mg/L de SDT. Estas cifras son muy elevadas. La conductividad eléctrica, indicador directo de la salinidad del agua, pasa de valores cercanos a 300 μS/cm en época lluviosa a más de 9 000 μS/cm en época seca, lo que confirma un grado de salinidad que hace inviable el uso directo de esta agua en los procesos de la empacadora.

Con esto se pone en evidencia la necesidad de un tratamiento avanzado para lograr que la industria garantice la reducción de las sales, ya que el producto debe ser potable para su utilización, estos datos nos marcan un punto de partida para el diseño de un sistema que utilice la electrodiálisis capacitiva orientado a disminuir cloruros desde niveles de 2500 mg/L hasta concentraciones menores a 250 mg/L, y sólidos disueltos totales desde aproximadamente 5 000 mg/L hasta valores por debajo de 1 000 mg/L.

#### **1.4 Definición del problema**

El caso de estudio se centra en una empacadora del Sur de Guayaquil, que necesita aproximadamente 216m<sup>3</sup>/h de agua potable para la limpieza del camarón, fabricación de hielo y limpieza de equipos. Según certificaciones internacionales, como la BAP, es necesario que el agua que este en contacto con el camarón sea de calidad potable para evitar la contaminación del camarón.

Actualmente, la empacadora cuenta con una PTAP que extrae agua del río Guayas, a la altura del sector de las camaroneras. El problema radica en que la planta de tratamiento actual no es capaz de reducir los niveles de SDT, los cuales, durante la época de estiaje pueden oscilar entre 8.9 y 1.9 g/L. Estos valores superan ampliamente el límite admisible para agua potable, establecido en 1 g/L de sólidos disueltos totales (SDT), según la norma INEN 1108 y la Tulsma Libro VI. Esta situación compromete su uso en procesos industriales como el de una empacadora de camarón, donde se requiere agua que cumpla con parámetros inorgánicos estrictos, tales como concentraciones máximas de cloruros ( $\leq 250$  mg/L), sulfatos ( $\leq 250$  mg/L), nitratos ( $\leq 50$  mg/L) y un pH dentro del rango de 6.5 a 8.5. Garantizar el cumplimiento de estos requisitos es fundamental para asegurar la seguridad sanitaria del producto y cumplir con las exigencias de certificaciones internacionales de calidad. Es importante que estas industrias cuenten con su planta propia ya que así, la empacadora asegura la continuidad operativa, evita interrupciones por restricciones externas, reduce costos en el largo plazo asociados a compras de agua o tratamiento externo, y puede implementar tecnologías adaptadas a sus necesidades específicas, como la eliminación de sales mediante electrodiálisis o el uso de filtros avanzados para remover sólidos y materia orgánica. Esta autonomía hídrica se traduce en mayor control operativo, cumplimiento normativo y sostenibilidad económica.

#### **1.5 Justificación**

La presente investigación trata de suplir la necesidad de garantizar un suministro de agua de calidad en la industria camaronera, sector que representa uno de los principales motores económicos del país. La alta salinidad del agua del río Guayas durante épocas de estiaje impide el uso de agua tratada mediante métodos convencionales, lo que compromete la sanidad del producto y lleva a la industria a depender del proveedor

municipal de agua. Desde el punto de vista económico, la implementación de un sistema de tratamiento mediante electrodiálisis capacitiva permitirá reducir costos asociados a la compra de agua tratada o pérdidas por incumplimiento de estándares, el proyecto contribuye a sostener miles de empleos vinculados a la cadena camaronera, garantizando la competitividad de un sector clave para la economía nacional.

El uso de electrodiálisis capacitiva supone una alternativa sostenible frente a tecnologías tradicionales como la ósmosis inversa, al reducir el consumo energético y minimizar la generación de residuos. Desde la ingeniería, este proyecto aporta una solución concreta al diseñar un módulo escalable de desalinización.

Este proyecto se alinea con el objetivo 6 “Agua limpia y saneamiento” dado que la tecnología de electrodiálisis se usa para eliminar sales del agua salobre con la finalidad de potabilizarla. Además, se alinea con el objetivo 12 “Producción y consumo responsable”, esto debido a que la empresa al enfrentarse al aumento de la demanda de camarón en el mercado internacional ha tenido que aumentar su consumo de agua potable, para optimizar costos ha implementado su propia PTAP, y este proyecto les brindará una herramienta que los ayude a utilizar el recurso agua de la mejor manera. También se alinea con el objetivo 9 “Industria, innovación e infraestructura” al promover una tecnología poco utilizada en el Ecuador y con la capacidad de conseguir eficiencia energética.

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema de tratamiento de agua, que pueda ser usado en procesos de empackado de camarón, mediante electrodiálisis capacitiva para la disminución de los niveles de salinidad y el cumplimiento de los estándares nacionales e internacionales de sanidad, priorizando un proceso energéticamente eficiente que minimice el consumo eléctrico sin comprometer la calidad del agua tratada.

### **1.6.2 Objetivos Específicos**

- Experimentar la tecnología de electrodiálisis capacitiva para el tratamiento de agua salobre en empackadoras de camarón, analizando parámetros operativos

(voltaje, corriente, tiempo de adsorción, velocidad perpendicular, eficiencia de remoción de sales y consumo energético específico) para la proyección de un diseño con una energía específica de  $\sim 1$  kWh/m<sup>3</sup> y que cumpla con la salinidad final ( $< 1$  g/L SDT) exigida por la industria.

- Evaluar la viabilidad económica de la electrodiálisis capacitiva, por medio de un análisis costo-beneficio, para su implementación en la PTAP actual, priorizando un bajo consumo energético para la obtención de una propuesta sostenible.
- Diseñar la propuesta técnica del sistema de tratamiento mediante la electrodiálisis capacitiva a escala de laboratorio, considerando el caudal requerido de 216m<sup>3</sup>/h para la definición de una base técnica que permita su posterior escalamiento y aplicación en condiciones reales de operación.

# CAPÍTULO 2

## DESARROLLO DEL PROYECTO

### 2.1 Marco conceptual.

#### 2.1.1 Electrodiálisis capacitiva (E.C).

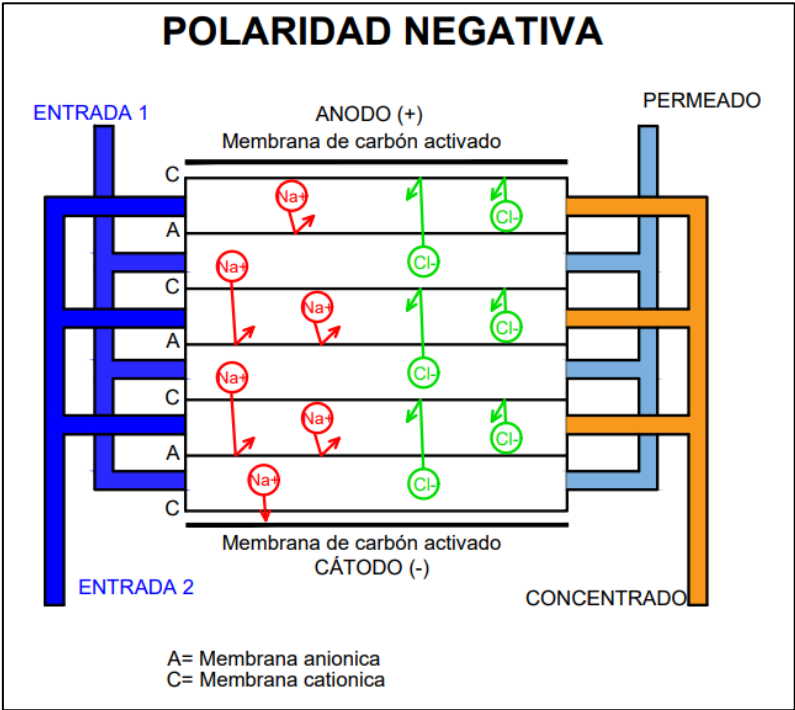
La electrodiálisis capacitiva (EC) es una tecnología emergente para la desalinización y tratamiento de aguas salobres, que opera bajo el principio de separación iónica mediante adsorción electrostática en electrodos porosos. En este proceso se aplica una diferencia de potencial, los iones positivos y negativos presentes en el agua se desplazan hacia electrodos de carga opuesta, donde son retenidos temporalmente en las superficies activas del material conductor. Una vez saturados los electrodos, el sistema entra en fase de desorción, liberando los iones acumulados y regenerando la capacidad de los electrodos para un nuevo ciclo de operación (Sayed, Elsaid, Al Radi, Alqadi, & Abdelkareem, 2022). Esta dinámica de adsorción–desorción permite que la tecnología trabaje de manera cíclica, optimizando el consumo energético y evitando el uso continuo de altas presiones, como ocurre en la ósmosis inversa.

A diferencia de otras tecnologías de membranas, la EC no requiere un gradiente de presión elevado para forzar el paso del agua a través de una barrera semipermeable, sino que se fundamenta en el transporte iónico impulsado por el campo eléctrico aplicado. Esto reduce significativamente los problemas asociados al fouling de membranas y permite una operación más sencilla en condiciones variables de calidad del agua. Además, al utilizar materiales como carbón activado, se logra aumentar la superficie específica de adsorción, mejorando la capacidad de captura de iones y la eficiencia global del proceso (Roman, y otros, 2021). Estas características hacen que la EC se considere una alternativa sostenible y de bajo impacto donde el acceso al agua potable está limitado por la presencia de sales disueltas.

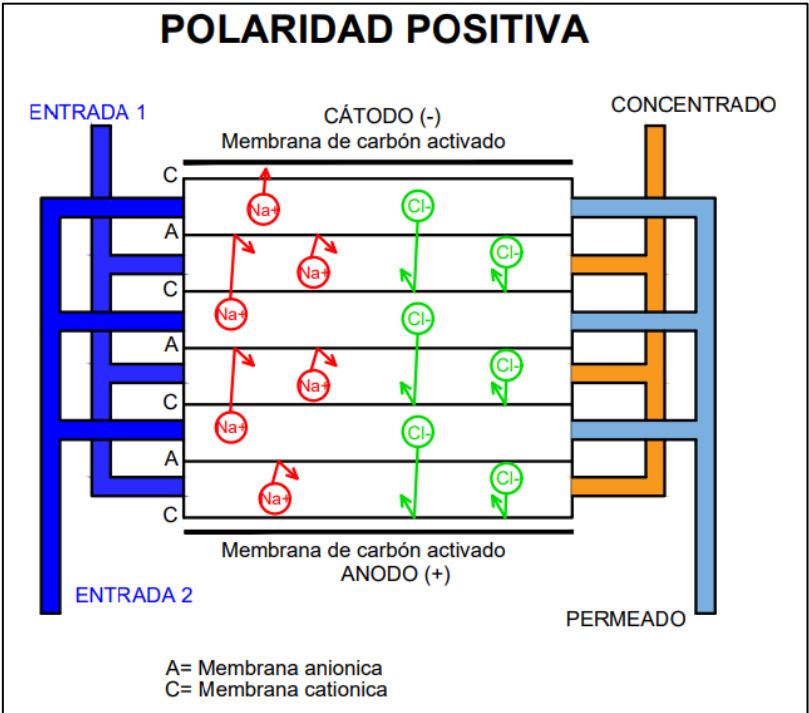
La figura 2 muestra el principio de funcionamiento de la electrodiálisis capacitiva, donde un par de electrodos (ánodo y cátodo) generan un campo eléctrico que induce el movimiento de los iones disueltos en el agua a través de membranas de intercambio iónico. Los cationes migran hacia el electrodo negativo y atraviesan las membranas catiónicas, mientras que los aniones se desplazan hacia el electrodo positivo y cruzan las membranas aniónicas. De este modo, algunos compartimentos del sistema se

enriquecen con sales (canales de concentrado) y otros se desalinizan progresivamente (canales de permeado), logrando así la reducción de la salinidad del agua. Este proceso combina la selectividad de las membranas, la capacidad de los electrodos de retener temporalmente iones y la inversión de polaridad en los ciclos, tal como se muestra en la figura 3 donde se invierte la polaridad y cambia el comportamiento.

**Figura 2: Diagrama de electrodiálisis capacitiva en polaridad negativa.**



**Figura 3: Diagrama de electrodiálisis capacitiva en polaridad positiva.**



En la electrodiálisis capacitiva, el voltaje aplicado constituye una de las variables más importantes, ya que impulsa el transporte iónico hacia los electrodos para su adsorción. Se ha demostrado que un aumento del voltaje mejora la eficiencia de remoción de sales debido a un mayor gradiente eléctrico, lo cual acelera la migración de iones y permite obtener un agua con menor conductividad y por tanto menor salinidad. Sin embargo, este incremento también eleva el consumo energético y puede acelerar la degradación de los electrodos si se sobrepasan ciertos límites (Roman, y otros, 2021). Por otro lado, aplicar un voltaje demasiado bajo genera una adsorción incompleta, prolongando los tiempos de tratamiento y reduciendo el rendimiento global del sistema (Sayed, Elsaid, Al Radi, Alqadi, & Abdelkareem, 2022) En este sentido, las pruebas de laboratorio deben realizarse con variaciones escalonadas de voltaje (por ejemplo, intervalos de 2-4 V) con el fin de identificar el punto de operación óptimo, donde se logre un equilibrio entre eficiencia de remoción de sales y consumo energético específico.

Otro de los parámetros importantes a considerarse es el tiempo de absorción y desorción esto determina la eficiencia del ciclo de tratamiento y a su vez ayuda a la regeneración de los electrodos. Durante la fase de absorción, tener un periodo demasiado corto provoca una remoción incompleta de iones, mientras que el exceso o un tiempo demasiado prolongado de la misma causa un mayor consumo energético. Por otra parte, en la fase de desorción un tiempo insuficiente impide una correcta regeneración de los electrodos y reduce la capacidad de desalinizar para los ciclos posteriores (Fu, y otros, 2022). En otras bibliografías se ha demostrado que el rendimiento óptimo depende de encontrar el equilibrio de tiempo dónde la absorción permite alcanzar una remoción significativa de sólidos disueltos y la desorción garantice la liberación casi total de los iones acumulados. Por ello, establecer tiempos adecuados para ambos procesos no solo optimiza la calidad del agua producida, sino que también prolonga la vida útil de los materiales y mejora la sostenibilidad del sistema en aplicaciones industriales (Kuhnert, Heidinger, Sandu, Hacker, & Bodner, 2023).

En la EC también influye la velocidad de flujo del agua, la misma es un parámetro operacional decisivo ya que controla el tiempo de contacto del agua con los electrodos y las membranas, es así como el flujo al ser muy bajo el agua puede estar más tiempo dentro del sistema lo que ofrece un mejor contacto y así favorece a la remoción de iones, equivale a la reducción de la salinidad. Sin embargo, este mismo efecto puede ocasionar

pérdida de la eficiencia por acumulación iónica dentro de la interfaz. Por otro lado, contar con una velocidad muy alta disminuye el tiempo de contacto entre las membranas y el agua lo que reduce la eficiencia de desalinización, pero ayuda a mitigar la formación de capas de concentración y a mantener el sistema más estable, por lo tanto, se logra cuidar la vida útil del módulo (Ma, y otros, 2019).

El ajuste óptimo de la velocidad de flujo depende de alcanzar un balance entre la eficiencia de remoción de la salinidad y el consumo energético puesto que a caudales bajos implica mayores pérdidas de carga y eso se traduce en un gasto energético adicional. Se resalta que la cinética de absorción y desorción se ve directamente afectada por el caudal ya que el transporte de iones es más eficiente en un caudal controlado, en ese sentido el parámetro debe ser optimizado mediante pruebas de laboratorio de forma escalonada observando cómo varía la conductividad final y a su vez la eficiencia de remoción a medida que se modifica la velocidad perpendicular en la celda o módulo de electrodiálisis capacitiva (Liang, y otros, 2025).

### **2.1.2 Estado de la E.C con respecto a otras tecnologías.**

Las tecnologías para desalar pueden ser muy variantes, dentro de las más comunes está la osmosis inversa (OR) y el intercambio iónico (IX), es así que para elegir cuál opción es la correcta, se debe analizar los parámetros de entrada y definir que se quiere lograr en la salida para optimizar los recursos, obtener una solución sostenible y aplicable.

La EC se basa en la absorción de iones en electrodos porosos cuando se aplica un campo eléctrico, funciona de manera óptima en aguas con baja a una moderada salinidad y es así como la tecnología puede alcanzar consumos eléctricos que pueden ser competitivos frente a otras tecnologías (Roman, y otros, 2021). En cambio, en la OR se emplean membranas semipermeables y con ayuda de una presión hidráulica se logra separar el agua de los sólidos disueltos esto es aplicable tanto a aguas poco salobres como aguas con alta salinidad, tal es el caso del agua de mar (Shannon, y otros, 2008). Por otra parte, el IX utiliza resinas catiónicas y aniónicas que intercambian selectivamente iones del agua lo cual resulta ideal para aplicaciones de pulido y desmineralización profunda o para una remoción específica de algún contaminante, pero depende del uso periódico de regenerantes químicos. Con ese contexto mientras la OR ofrece una alternativa robusta para la desalinización y el IX un método para el ajuste de

calidad, la EC ofrece un equilibrio innovador para el tratamiento eficiente del agua con una salinidad baja causando menor impacto químico y energético para este rango de aplicación específico.

En cuanto a la calidad de agua alcanzable la EC permite reducir concentraciones de TDS de manera eficiente alcanzando la calidad de agua propuesta, que cumple los límites potables de acuerdo con las normas antes mencionadas. La OR en cambio ofrece una de las calidades más altas de agua tratada produciendo permeados que pueden llegar a TDS inferiores a 50 mg/L y con la posibilidad de alcanzar valores menores en un sistema de 2 etapas, pero esto resulta excesivo para el caso propuesto e ideal para procesos que requieren de un agua con mayor pureza (Shannon, y otros, 2008). Por otro lado, el IX puede llegar incluso más allá logrando agua desmineralizada con conductividad inferior a un  $1\mu\text{s}/\text{cm}$  lo que se vuelve una opción aplicable en industrias críticas, tal es el caso del agua que alimenta a calderas de alta presión, laboratorios o industria eléctrica (Ma, y otros, 2019). En conclusión, la EC asegura niveles de potabilización en el contexto requerido, la OR garantiza una desalineación casi completa y el IX el pulido y la desmineralización profunda para aguas de mayor exigencia.

En lo referente a operación, modularidad y costos (CAPEX/OPEX), las diferencias entre las tres tecnologías son notables. La EC se caracteriza por su operación sencilla y modularidad elevada, lo que permite escalar progresivamente en función de la demanda y adaptarse a variaciones de caudal sin requerir presiones elevadas ni químicos de regeneración; su OPEX está dominado principalmente por el consumo eléctrico y el reemplazo periódico de electrodos o membranas, mientras que el CAPEX suele ser competitivo en aplicaciones de baja a moderada salinidad (Porada, Zhao, van der Wal, Presser, & Biesheuvel, 2013). La RO, por su parte, es una tecnología madura y estandarizada que puede implementarse tanto en plantas pequeñas como en grandes complejos desalinizadores; sin embargo, su CAPEX inicial es mayor por los sistemas de bombeo y pretratamiento, y su OPEX está condicionado por el consumo energético, la limpieza química de membranas y el uso de antiincrustantes, lo que la hace más costosa en el largo plazo, aunque estable y confiable (Shannon, y otros, 2008). En contraste, el IX destaca por su compacidad y simplicidad de operación en ciclos de servicio-regeneración, siendo muy eficaz para caudales pequeños o como etapa de pulido; no obstante, su OPEX depende fuertemente de los regenerantes químicos (NaCl, HCl, NaOH) y de la gestión de los efluentes generados, lo que incrementa tanto los costos

operativos como el impacto ambiental (Ma, y otros, 2019). En síntesis, la EC ofrece ventajas en flexibilidad y bajo costo químico, la RO sobresale en escalabilidad y confiabilidad, aunque con mayores gastos energéticos, y el IX resulta más económico en la instalación inicial pero costoso en operación por la dependencia de regenerantes.

### **2.1.3 Aplicaciones en las industrias.**

La electrodiálisis capacitiva es una técnica que se ha implementado diferentes en industrias para poder disminuir la cantidad de iones presentes en el agua y reaprovecharlos. Por ejemplo, según Guleria et al. (2024), se realizó un piloto de una electrodiálisis capacitiva conformada por dos stacks, para tratar el agua residual de un invernadero. Este módulo de tratamiento consiguió una conductividad menor a 0.2 mS/cm, el concentrado resultó en un suero de bastantes nutrientes que se consideran útiles y tuvieron una energía específica de entre 0.14 a 0.24 kWh/m<sup>3</sup> (4 veces menor a un modelo de osmosis inversa).

Así mismo se lo ha utilizado para potabilizar agua con presencia de micro contaminantes orgánicos, como reporta Ma et al. (2023). En este caso alcanzaron una recuperación del 80% y una energía específica de 0.54 kWh/m<sup>3</sup>, pudiendo remover hasta alrededor de un 94% de los micro contaminantes orgánicos y alcanzando una concentración de sólidos disueltos totales menor a 100 mg/l.

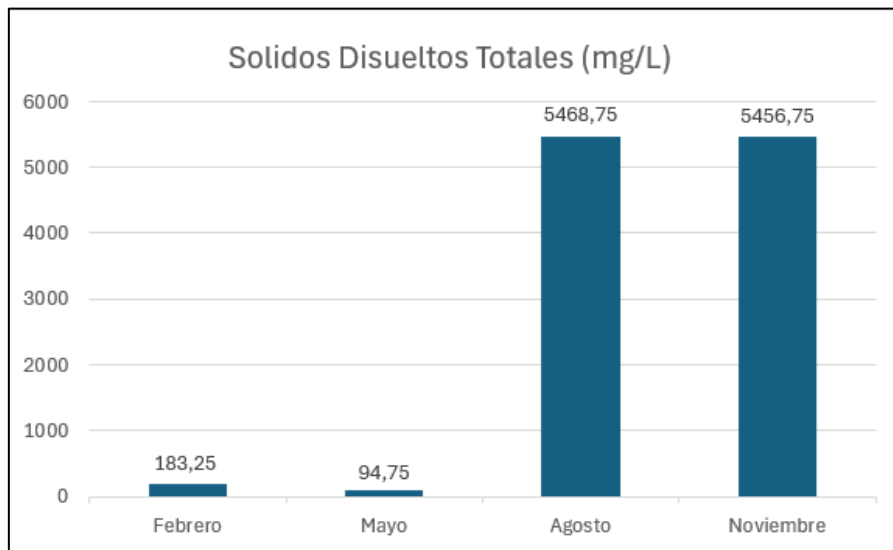
La electrodiálisis capacitiva es una tecnología que actualmente no cuenta con muchos casos de estudio publicados por lo que seguir fomentando su estudio es importante para fomentar su aplicabilidad.

## **2.2 Marco metodológico**

### **2.2.1 Trabajos previos**

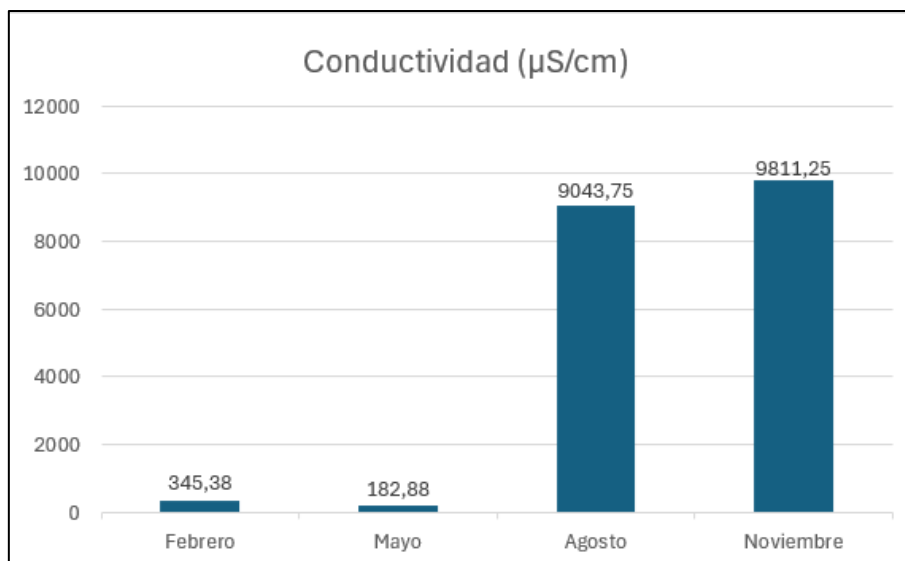
La empacadora de camarón compartió las caracterizaciones del río Guayas en las cercanías de su captación en diferentes meses del 2021, en baja y alta mar. De estas caracterizaciones se presentan los resultados en las figuras 4 y 5.

**Figura 4: Sólidos Disueltos Totales del río Guayas en las cercanías del punto de captación en alta mar.**



Como se ve en la Figura 4, los SDT son bajos en los meses de la época húmeda y alto en la temporada seca. Esto se puede deber principalmente a que como no hay lluvias el agua que encontramos en el río Guayas tiene una mayor incidencia por parte del nivel del mar que por parte de la escorrentía. Como se ve en el mes de noviembre y de agosto el río pasa a ser de agua salobre.

**Figura 5: Conductividad del río Guayas en las cercanías del punto de captación en alta mar.**



Como se aprecia en la figura 5, se reafirmó lo mencionado anteriormente con respecto a la incidencia del mar en la época seca en el río Guayas. Además, comparando la

conductividad con los SDT hay una relación entre 0.63 a 0.5 entre ellos en la época seca. Finalmente, con las gráficas podemos concluir que la época en la cual se tendrá que hacer un tratamiento sobre los sólidos disueltos es entre agosto y noviembre.

### 2.2.2 Trabajo de campo

Se recopilieron datos reales sobre la planta de tratamiento de agua de la empacadora y del punto de captación, esto implicó una visita técnica a la planta para identificar y medir sus unidades instaladas junto con los procesos existentes. Además, se tomó muestras de agua para medir parámetros en campo y posteriormente usarlas en los ensayos de laboratorio con el módulo de electrodiálisis capacitiva.

- **Levantamiento de información de la PTAP.**

La PTAP toma el agua directamente del río Guayas desde un muelle. El sistema de captación cuenta con 3 bombas centrífugas que trabajan en un sistema 2+1 (dos en funcionamiento y una de respaldo). Este sistema impulsa 216 m<sup>3</sup>/hr, que es el caudal de diseño de toda la planta.

**Figura 6: Captación de la PTAP.**



La PTAP tiene 2 trenes de tratamiento con la capacidad de tratar el flujo a la mitad. El tratamiento comienza con las bandejas de oxidación para precipitar sales de magnesio y hierro. Luego pasa por un desarenador (figura 7 A). Luego pasa por un tanque de floculación donde se inyecta PAC para aglomerar las partículas coloidales (figura 7 B). El agua tratada químicamente pasa por un sedimentador de alta tasa con lamelas (figura 7 C), para sedimentar los flóculos generados anteriormente. Finalmente, pasa por un filtro ascendente de grava y sílice que afina la turbiedad de

salida (figura 7 D), antes de pasar a una inyección de cloro en línea. Las dimensiones de todas estas unidades se detallan en la tabla 2.

**Tabla 2: Dimensiones de unidades de tratamiento.**

Unidad de tratamiento	Altura (m)	Largo (m)	Ancho (m)
Desarenador	3,00	4,50	3,00
Floculador	3,00	4,50	3,00
Sedimentador	3,00	7,00	3,00
Filtro ascendente	3,00	6,00	3,00

**Figura 7: Unidades de tratamiento.**



- **Muestreo**

El muestreo se realizó en 2 puntos; en la llegada a la planta desde la captación (PC1) y a la salida del filtro ascendente (PC2). De la captación se tomaron 2 botellones (aproximadamente 44 litros) mientras que de la salida del filtro se tomaron 10 botellones de agua (aproximadamente 220 litros) (figura 8). Además, se utilizó un turbidímetro y una multiparamétrica para medir parámetros físicos (turbiedad, SDT, conductividad y temperatura) en el agua (Anexos 1, 2, 3, 4, 5 y 6).

**Figura 8: (a) Punto de muestreo de la captación. (b) Punto de muestreo a la salida del filtro**



### **2.2.3 Trabajo de laboratorio**

Durante la fase experimental con la electrodiálisis, el objetivo fue la remoción de SDT a 1 g/L, valor correspondiente al límite permisible según TULSMA, realizando una experimentación con dos módulos o stacks de electrodiálisis capacitiva conectados en serie, esto debido a que con un solo módulo no se lograría remover la cantidad de SDT requerida, así mismo se estableció tener una recuperación del 50%, esto para evitar las incrustaciones y saturación de las membranas.

Para el proceso experimental se establecieron 3 ciclos operativos cada uno con las siguientes fases:

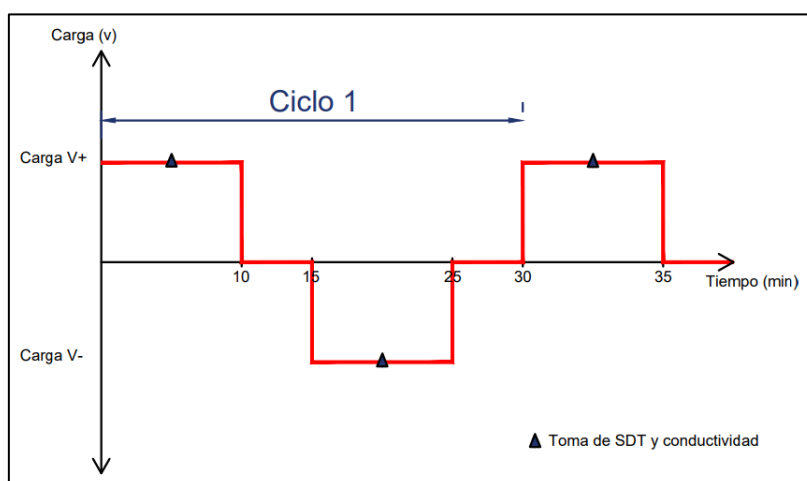
- 10 minutos de carga, en donde se aplicó corriente para atraer los iones y atraparlos en las membranas dando como resultado agua con menos SDT.
- 5 min de descarga, en donde no se aplicó carga y se liberaron parcialmente los iones retenidos.
- 10 min de carga con inversión de polaridad, en donde se cambió la polaridad (el ánodo pasó a ser cátodo y el cátodo a ánodo) con ello se aseguró la regeneración de la superficie en las membranas permitiendo el cuidado de estas.
- 5 min de descarga final, en donde no se aplicó carga y permitió la estabilización del sistema antes de iniciar el siguiente ciclo.

Las pruebas se llevaron a cabo con las muestras obtenidas en campo de la PTAP, las cuales se colocaron en un reservorio de 5 litros, para que una bomba peristáltica impulse

el flujo de agua a través del stack de electrodiálisis capacitiva, el mismo que tiene una dimensión de 10cmx40cm. Tanto el concentrado como el permeado se recirculaban al tanque de 5 litros para mantener un volumen constante y favorecer a la homogenización de la muestra durante el experimento.

Cada experimentación se controló con la toma los parámetros iniciales: turbidez, temperatura, sólidos disueltos totales y conductividad. Luego durante el experimento se tomaron parámetros de SDT y conductividad tanto del permeado como el concentrado cada 15 min permitiendo evaluar los resultados de remoción durante el proceso del ciclo, tal como se ve en la figura 9 donde se observa una gráfica de carga vs tiempo y detalla en qué momento tomar las medidas de SDT y conductividad.

**Figura 9: Diagrama carga vs tiempo para cada experimento.**



Cabe mencionar que el laboratorio disponía únicamente de un solo stack de electrodiálisis capacitiva, por tal motivo las pruebas tuvieron que ser realizadas de manera secuencial. Primero, se realizó las pruebas para optimizar caudal y voltaje del primer stack. Luego se filtró 40 litros agua con los parámetros encontrados como óptimos. Posteriormente se repitió la experimentación usando los 40 litros obtenidos del anterior stack para determinar las mejores condiciones para el segundo stack, garantizando la base experimental que permitió desarrollar la solución técnica más viable. Además, otra limitante fue que el potencióstato que se tenía en el laboratorio maneja una corriente de hasta 2 amperios.

### 2.2.4 Tabulación de datos

El experimento fue controlado por un potenciostato que configuraba el voltaje en los ciclos y media los amperios del circuito. Esta información era registrada por la computadora y se generó graficas corriente vs tiempo para luego obtener la energía específica en base a la siguiente ecuación (1):

$$E = \frac{V \cdot \int_0^t I dt}{v} \quad (1)$$

E: Energía específica (kW\*h/m<sup>3</sup>).

I: Corriente (A).

V: Voltaje (V)

v: Volumen permeado (m<sup>3</sup>)

Así mismo como se mencionó anteriormente, en cada condición de voltaje y caudal, se tomaron datos de SDT y de conductividad tanto del permeado como del concentrado. Luego se promedió los resultados de concentrado y permeado para determinar la eficiencia de remisión de SDT representativos para cada condición de voltaje y caudal. Con los datos de eficiencia de remoción, caudal, voltaje y energía específica se graficó las 4 variables con el que se identificó el punto óptimo.

### 2.2.5 Solución a diseñar

La problemática primero se llevó a un nivel de laboratorio para ver el comportamiento de sistema con el agua de la PTAP. En esta etapa se seleccionó la mejor combinación de caudal y voltaje dentro de las posibilidades de los equipos de laboratorio.

Una vez seleccionado los parámetros para el primer stack se realizó el mismo análisis simulando el segundo stack pero como fuente sería el agua del permeado del primero. Ya con la información de los parámetros optimizados para los dos stacks se procedió a escalar el modelo de laboratorio a uno que alcance a tratar 216 m<sup>3</sup>/hr, considerando la necesidad de trenes de tratamiento, manifolds de alimentación y de descarga, bombas de alimentación y de paso, y electroválvulas. Ya con estas consideraciones se procedió a evaluar el CAPEX y OPEX de la tecnología.

# CAPÍTULO 3

## Resultados Y Discusión

### 3.1 Resultados

#### 3.1.1 Caracterización in situ de los puntos de muestreo de la PTAP actual.

Como se evidencia en la tabla 3, la PTAP actualmente solo remueve la turbiedad y no elimina los sólidos disueltos, dado que no han instalado un sistema de desalinización. Además, se comparó la conductividad del día del muestreo con la de años anteriores, presentada en la sección de trabajos previos, se observó que los niveles de conductividad reportados son 16% más elevados que los esperados en esta época del año en el río (9.04 mS/cm).

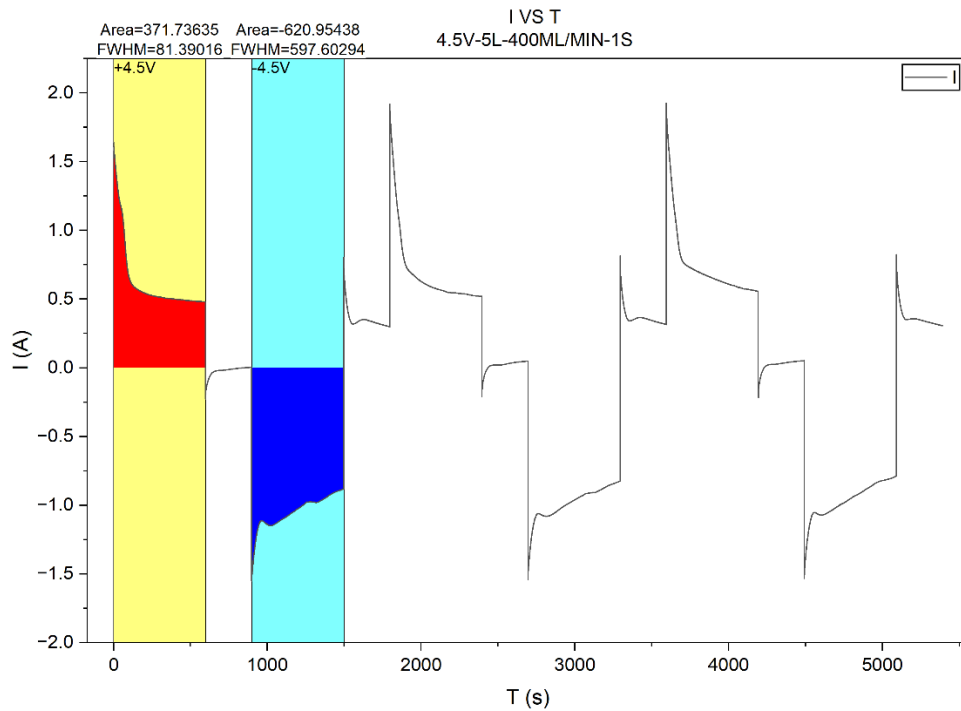
**Tabla 3: Resultados de la caracterización in situ de los puntos de muestreo.**

Punto	pH	Conductividad (mS/cm)	Turbiedad (NTU)	Temperatura (°C)
PC1	7.5	10.5	>999	26.5
PC2	7.36	10.53	1.91	26.3

#### 3.1.2 Simulación del primer stack.

Como se puede ver en la figura 10, se pudo notar cómo varía la corriente en el tiempo al momento de aplicar 4.5 voltios en el sistema. Al inicio de cada fase, la corriente se disparaba y a medida que pasaba el tiempo tendía a estabilizarse. Luego, en la fase de descarga se daba un pico, que se debía al efecto de carga/descarga de los electrodos y la corriente tendía a estabilizarse alrededor de los 0 amperios. Después, se dio otro pico con amperaje negativo que significaba cambio de polaridad. Una observación, que se puede realizar viendo la descarga entre ciclos, es que no se estabilizó la corriente cerca de 0. Esto generó que el segundo y tercer ciclo tengan un pico en la corriente casi 0.5 A mayor a la del primer ciclo. Para próximos experimentos se debería aumentar más tiempo de descarga para estabilizar la corriente entre ciclos si se mantiene el mismo potenciómetro.

**Figura 10: Variación de corriente eléctrica vs Tiempo (4.5 V-400ml/min)**



En base a la figura 11 y comparándola con la figura 10, se pudo evidenciar que a medida que se fueron realizando los cambios de polaridad los canales intercambian su naturaleza. Es decir, el que era el concentrado pasaba a ser el permeado y el otro de forma contraria. Por ejemplo, cuando el equipo estaba en fase de carga el canal B era concentrado y el canal A era permeado. Luego, cuando se hizo el cambio de polaridad se intercambiaron. Sin embargo, los dos canales tuvieron diferentes eficiencias de remoción que dependían si estaban en fase carga o de inversión de polaridad.

Finalmente, recordando que el área bajo la curva de la curva IvsT es directamente proporcional a la energía específica, se pudo notar que un mayor consumo energético representa una mayor remoción de conductividad y por ende de SDT.

**Figura 11: Variación de CE vs Tiempo (4.5 V-400ml/min)**



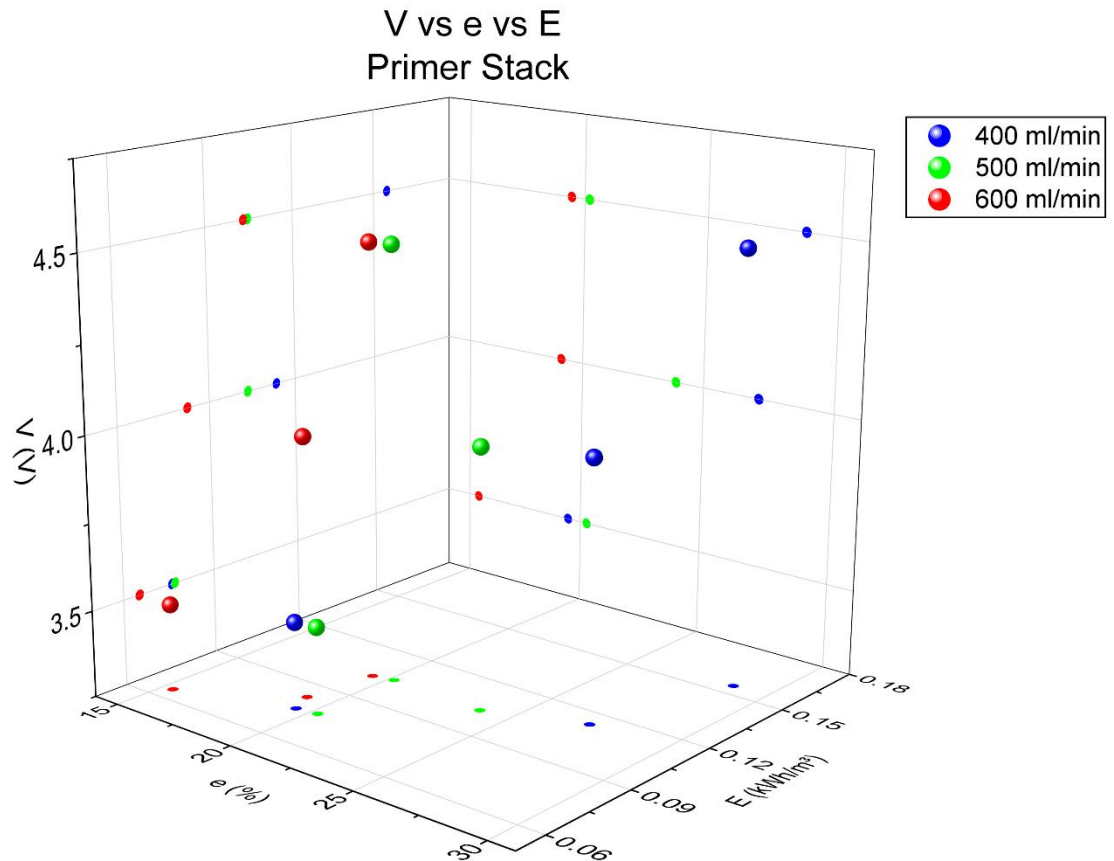
La figura 12 es el resumen de los resultados de la experimentación simulando el primer stack, reportando las variables como: voltaje (V), energía específica (E), caudal de alimentación (Q) y eficiencia de remoción (e). Este indicó que el punto óptimo fue utilizar un caudal de 400 ml/min con un voltaje de 4.5 voltios, dado que con estos parámetros se alcanzó una energía específica de 0.15 kWh/m<sup>3</sup> y la mayor remoción de 28.96%, que en términos de SDT se pasa de 5.95 g/l a 4.22 g/l, como se ve en la figura 16. Cabe destacar que no se pudo probar mayores voltajes, dado que se sobrepasaba los 2 amperios que tiene como máximo el equipo. Además, el estudio se pudo mejorar variando el porcentaje de recirculación, ya que esta es una variable que pudo modificar el rendimiento del sistema. Sin embargo, el análisis de esta variable no es objeto de este estudio.

Continuando con el análisis de la figura 12, en esta se pudo ver las relaciones que hay entre las variables. Por ejemplo, se pudo notar que el experimento con 500 ml/min no tiene una tendencia clara a comparación de las gráficas a caudales de 400 ml/min y 600 ml/min, esto debido a que el experimento 4.5 V-500 ml tuvo un comportamiento decreciente tanto en los planos V-e, V-E y E-e. Esto se pudo deber a una mala toma de datos o que el stack tuvo un problema interno.

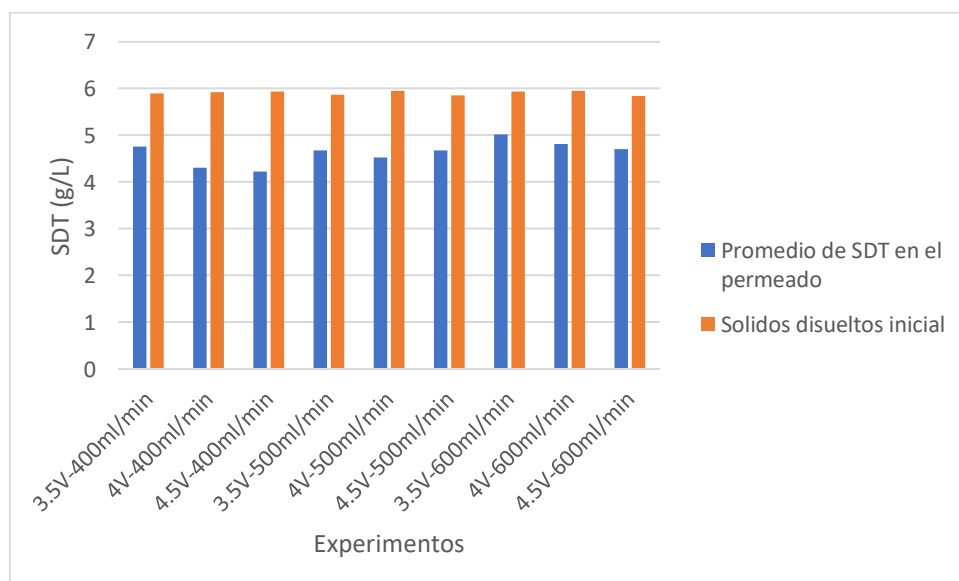
Además, se pudo notar el comportamiento exponencial que tuvieron las curvas (400 ml y 600 ml) donde se pudo apreciar que a un mayor voltaje se alcanza una mayor eficiencia de remoción (plano V-e), pero al mismo tiempo un mayor consumo energético (plano V-E). Así mismo, se pudo notar que a un menor caudal las pequeñas variaciones de voltaje pueden representar una mayor variación de eficiencia (plano e-V) pero que en cierto

punto esta variación ya se disminuye por su comportamiento exponencial. Finalmente, la figura 13 demostró que las condiciones iniciales de los experimentos, las cuales fueron muy similares entre ellos, lo que fue un indicativo de las buenas condiciones iniciales que se pudieron mantener para la primera simulación.

**Figura 12: Variación de voltaje- eficiencia de remoción- energía específica.**



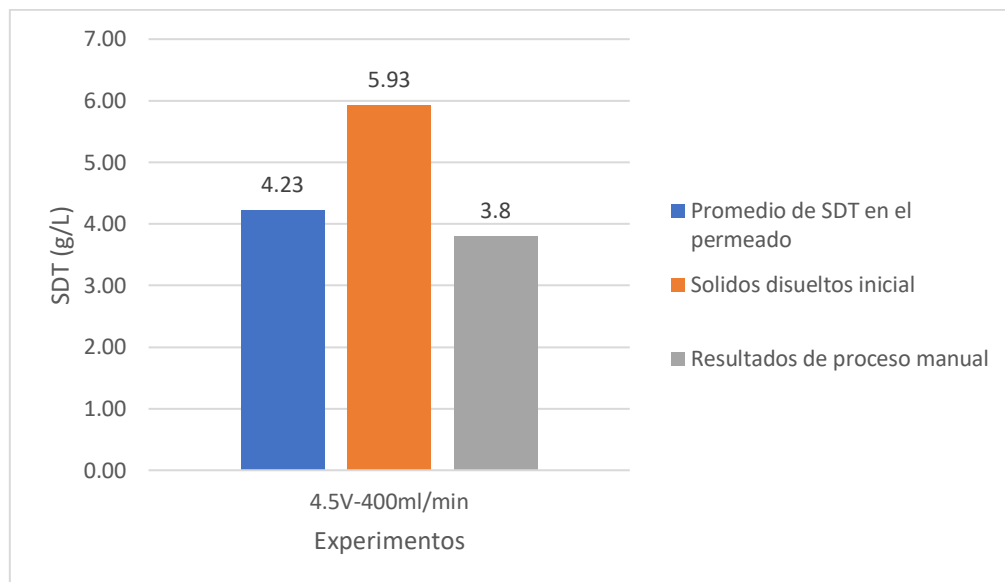
**Figura 13: Resultados del primer stack en disminución de SDT.**



### 3.1.3 Simulación del primer stack con parámetros optimizados.

Este proceso fue manual, ya que se tenía que parar la bomba peristáltica al inicio de cada fase y se obtuvo un permeado con una concentración de SDT de 3.8 g/l. En base a la figura 14, se lo comparó con los resultados del primer stack, donde se esperaba que llegará a alrededor de 4.22 g/l, y se obtuvo 0.42 g/l de diferencia (equivalente a un 10% de lo esperado). Esto se pudo deber a que lo estimado fue obtenido de muestras puntuales en medio de la fase, sea de carga o de cambio de polaridad, mientras que la simulación de la primera pasada fue la captación de la mayor parte del batch del permeado.

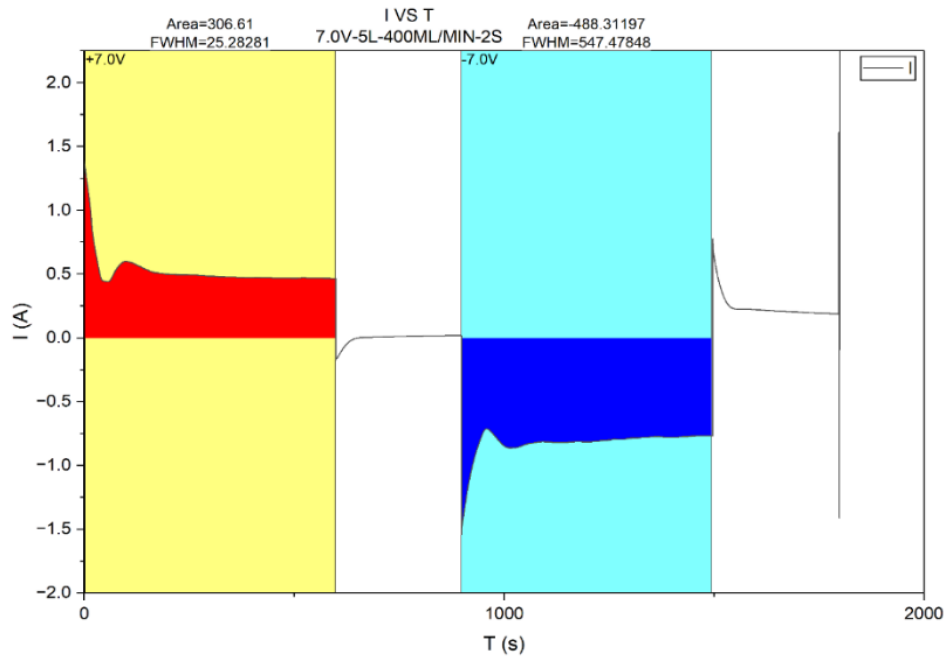
**Figura 14: Comparación de los resultados experimentales con el piloto de pasar agua por el primer stack con las condiciones de 4.5 V-400 ml/min.**



### 3.1.4 Simulación del segundo stack.

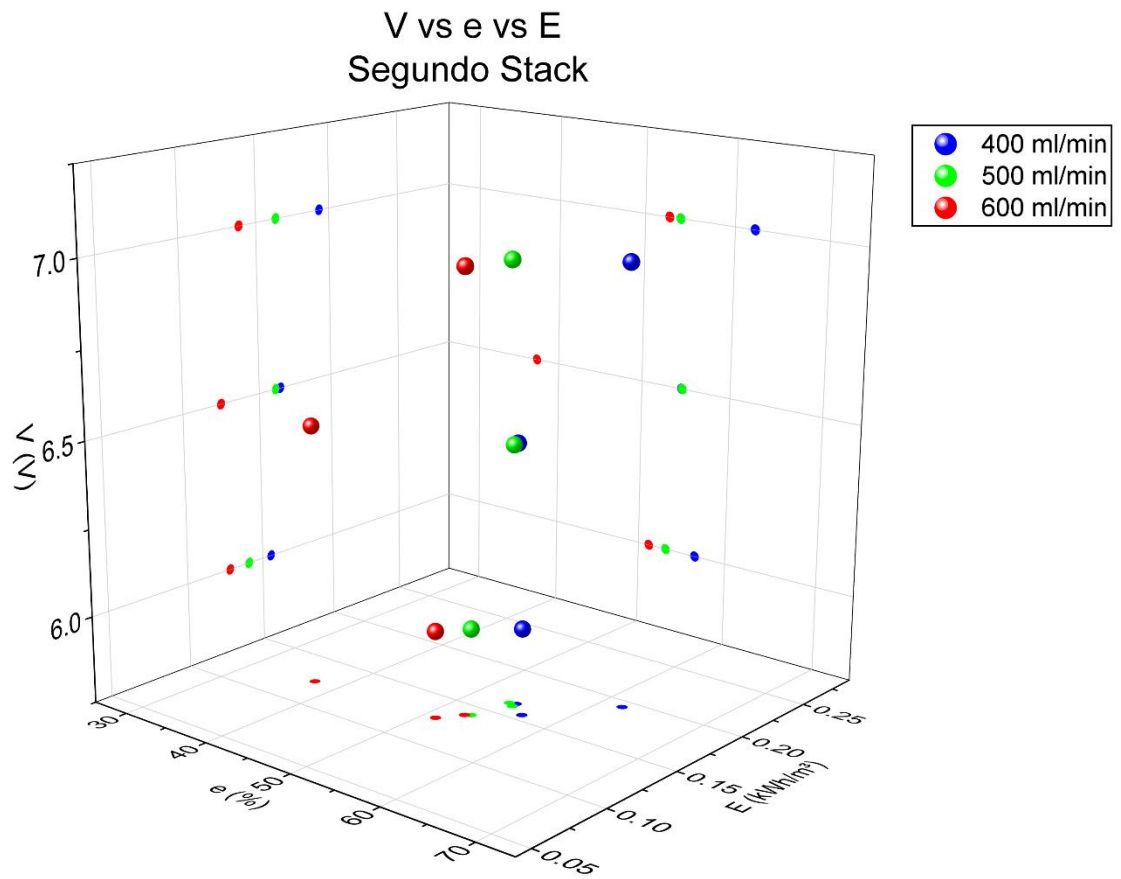
El segundo stack fue evaluado con los mismos caudales que en el primer stack pero con 6, 6.5 y 7 voltios. Sin embargo, se tuvo sobre corriente (>2 A) por lo que el potenciómetro marcaba error al iniciar el experimento o en el segundo o tercer ciclo, como se ve en la figura 15, que solo se pudo realizar el primer ciclo. A pesar de esto, se pudo recopilar información de los experimentos algunos solo con el primer ciclo, otros con el segundo y unos con la experimentación completa.

**Figura 15 Experimento 7V-400ml/min.**

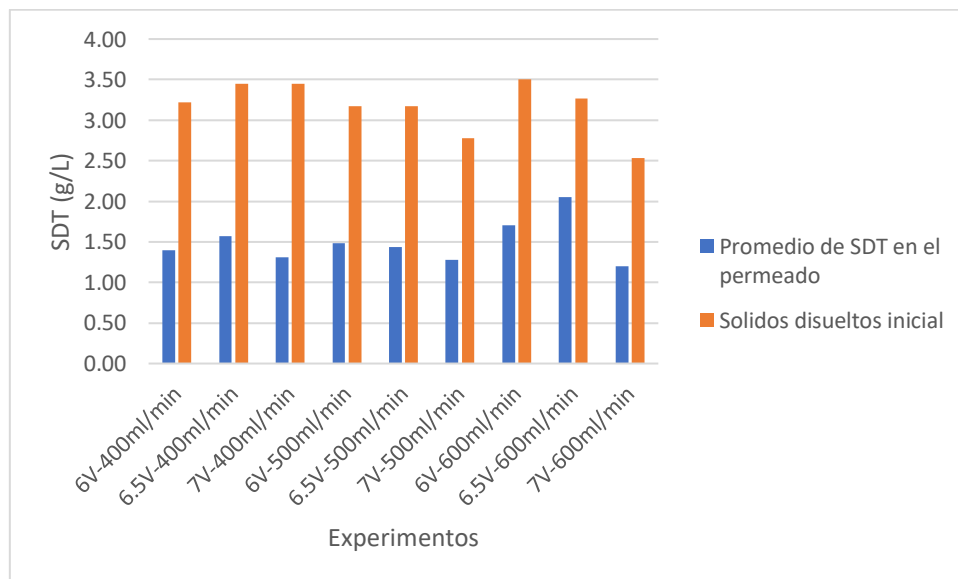


Como se puede ver en la figura 16, los resultados no tuvieron una tendencia clara en los planos eficiencia de remoción contra energía específica (e-E) y voltaje contra eficiencia de remoción (V-e). Esto se pudo deber a la variabilidad de la conductividad inicial (figura 17), y porque hubo una mayor complicación para poder obtener los datos, por la limitante que se tuvo del potencióstato. Aun así, a pesar de que se aplicó el mayor voltaje que permitió el potencióstato (7 V) solo se pudo disminuir los SDT del permeado alrededor de 1.3 g/l, se asumió que en la práctica hay un 10% de error por el método de muestreo (como en el apartado anterior) se puede asumir que puede llegar hasta 1.17 g/l. Esto indicaba que el caudal de 400 ml/min era el adecuado para el segundo stack, pero se necesitaba más voltaje para alcanzar la meta de <1 g/l.

**Figura 16: Variación de voltaje- eficiencia de remoción- energía específica- segundo stack.**

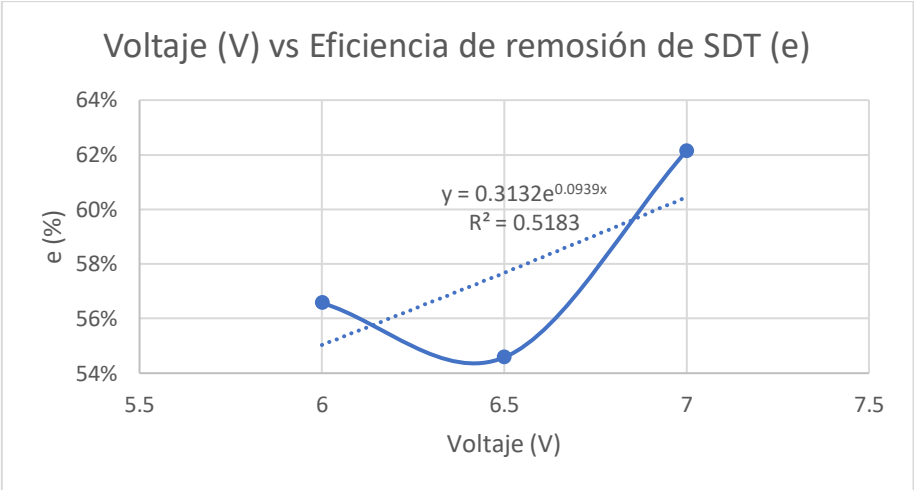


**Figura 17 Resultados de experimentación del segundo stack.**

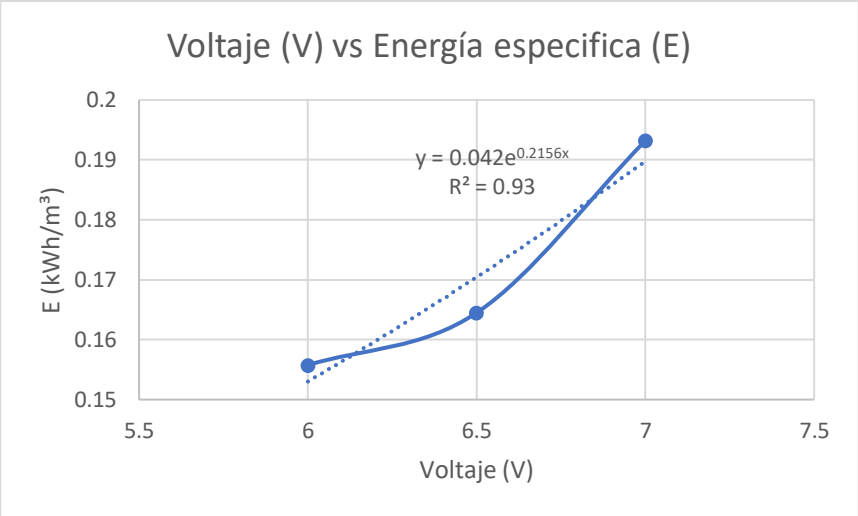


Se estimó aproximadamente cuántos voltios debería de recibir el segundo stack para el diseño propuesto para la camaronera por medio de analizar los resultados del experimento bajo el caudal de 400 ml/min. La tendencia al comparar el voltaje con la eficiencia de remoción es exponencial y el valor de  $R^2$  no se acercó a 1 por el valor de correspondiente de 6.5 V (figura 18). Por otro lado, en el análisis de voltaje contra la energía específica, la tendencia fue exponencial y presentó un valor de  $R^2$  cercano a 1 (figura 19), por lo que las ecuaciones presentes en las gráficas podían ser usadas para extrapolar los resultados al aumentar el voltaje en el segundo stack, aunque la de la gráfica V-e puede ser afinada al tener más datos.

**Figura 18 Grafica Voltaje vs Eficiencia de remoción.**



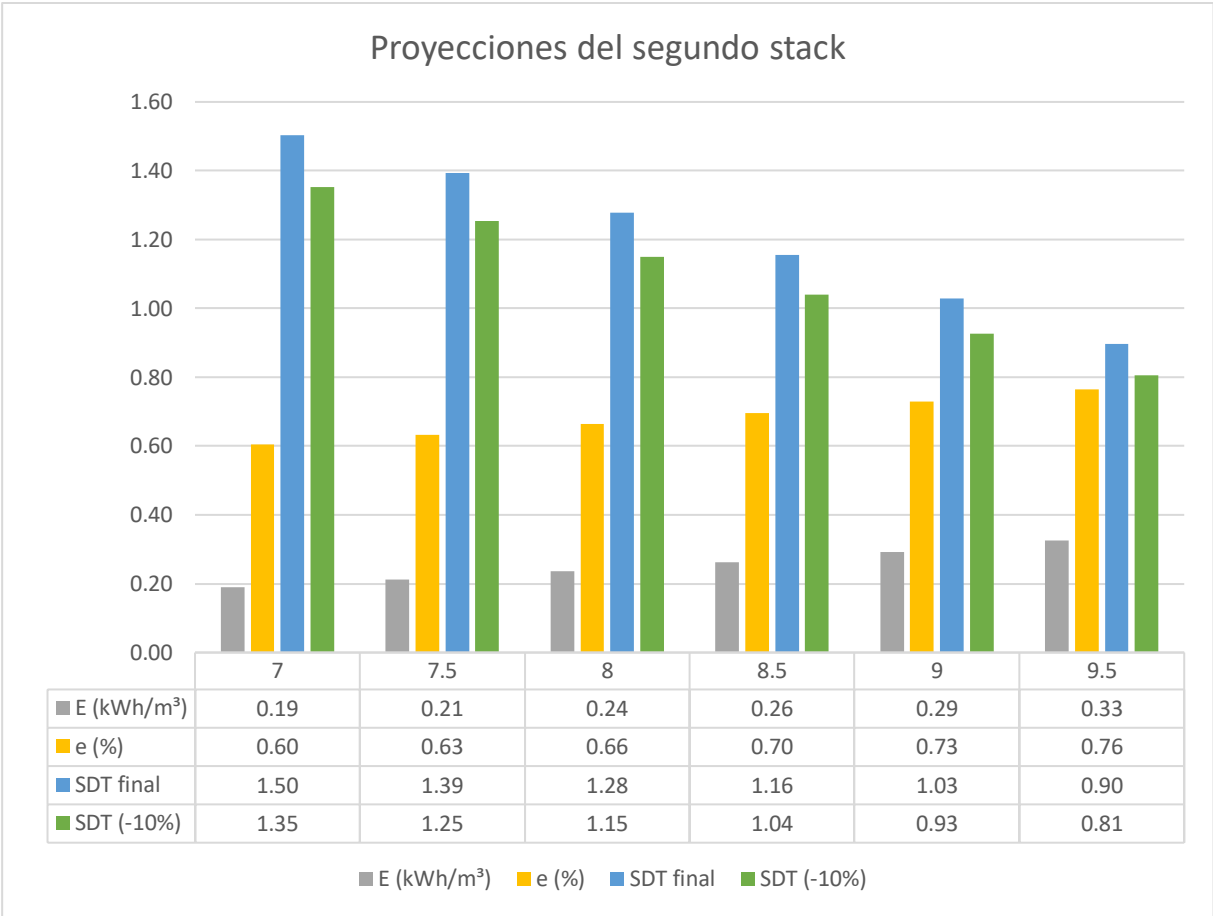
**Figura 19 Grafica voltaje vs Energía específica.**



Como se mencionó en el apartado anterior los SDT de entrada al segundo stack estaban alrededor de los 3.8 g/l y para llegar a una salida <1g/l se necesitaba una eficiencia de remoción de aproximadamente de 74%.

Aplicando las ecuaciones de las figuras 18 y 19 se obtuvo la figura 20. En esta se observó que el diseño para el segundo stack tiene que trabajar entre 9 a 9.5 voltios para conseguir el objetivo de disminuir los SDT a menos de 1 g/l. Además, la energía específica no fue considerablemente alta por lo que fue válido este rango operativo para considerarlo en el diseño.

**Figura 20 Resultados proyectados para el segundo stack.**



Finalmente, los parámetros optimizados para el modelo en laboratorio quedan reportados en la tabla 4. Cabe destacar que los resultados del segundo stack fueron estimados en base a la experimentación, se debe comprobar en futuras investigaciones que se alcancen resultados similares utilizando un potencióstato que tenga la capacidad de soportar más de 2 A.

**Tabla 4 Parámetros optimizados para cada stack a escala de laboratorio.**

1er Stack				2do Stack				Sistema
Voltaje aplicado (V)	Q (ml/min)	E (kWh/m <sup>3</sup> )	e (%)	Voltaje aplicado (V)	Q (ml/min)	E (kWh/m <sup>3</sup> )	e (%)	E (kWh/m <sup>3</sup> )
4.5	400	0.15	29	9-9.5	400	0.29-0.33	73-76	0.44-0.48

### 3.2 Extrapolación módulo de tratamiento.

Para extrapolar los resultados obtenidos se tuvo en consideración las propiedades físicas del módulo de electrodiálisis capacitiva, como se ve en la tabla 5.

**Tabla 5 Dimensiones del stack.**

Ancho (cm)	10
Largo (cm)	40
Área (cm <sup>2</sup> )	400
Espesor del spacer (cm)	0.027
Pares de membranas canal A	25
Pares de membranas canal B	10

Además, el caudal de alimentación que dio los mejores resultados en la experimentación fue 400 ml/min tanto para el stack 1 como para el stack 2. Sin embargo, a pesar de que el caudal medido fue 400 ml/min, al stack ingresaba 800 ml/min, por la recuperación del 50%.

En base a las dimensiones físicas y al caudal de alimentación se tuvieron las siguientes velocidades de tangenciales y tiempo de retención hidráulica, como se ve en la tabla 6.

**Tabla 6 Velocidades del stack bajo los 400 ml/min.**

Canal	Pares de membranas	Velocidad tangencial	TRH
		(cm/s)-spacer	(s)
a	25	0.99	40.5
b	10	2.47	16.2

Otro punto importante para el escalado del diseño fue tener en claro los caudales de alimentación. Dado que hubo un 50% de recuperación y se necesitaba producir 216 m<sup>3</sup>/hr, fue evidente que el caudal de alimentación de la primera estación de tratamiento en total debe ser 864 m<sup>3</sup>/hr y de la segunda estación de tratamiento 432 m<sup>3</sup>/hr.

Dado los caudales de alimentación se propuso hacer un diseño de módulos en paralelo para disminuir el caudal y además modificar las dimensiones de los stacks para que tengan tiempos de retención hidráulicas similares a los que se obtuvieron en la fase experimental.

### 3.2.1 Propuestas de diseño

La primera propuesta de diseño se enfocó en tener un resultado similar a lo obtenido en laboratorio. Para esto el caudal de 864 m<sup>3</sup>/hr iba a pasar por 12 stacks en paralelo en la primera etapa de tratamiento, trabajando a 4.5 V, y luego los 432 m<sup>3</sup>/hr pasarían a 6 stacks trabajando de 9 a 9.5 V. Cada stack tendría las dimensiones reportadas en la tabla 12, con tiempos de retención iguales a los reportados en la tabla 11 y con eficiencias resultados similares a los esperados en la tabla 7.

**Tabla 7 Dimensiones del stack propuesta 1.**

Ancho (cm)	200
Largo (cm)	100
Área (cm <sup>2</sup> )	20000
Espesor del spacer (cm)	0.027
Pares de membranas canal A	750
Pares de membranas canal B	300

Para la segunda propuesta se planteó obtener una menor energía específica para obtener la misma eficiencia de remoción. Para esto en base a las figuras 12 y 16, se pudo concluir que a un menor caudal de alimentación, que implica un mayor tiempo de retención, se necesitaba menos voltaje para obtener la misma eficiencia de remoción de SDT. Sin embargo, los caudales de alimentación para el diseño final fueron fijos, lo que implicó tener que aumentar el número de stacks por etapa de tratamiento. Además, se decidió no aumentar las dimensiones de los stacks por un tema de espacios y facilidad de instalación de los stacks. Por lo anteriormente descrito, la segunda propuesta contó con 16 stacks en paralelo en la primera etapa de tratamiento y 8 stacks en la segunda.

Cada stack tuvo las dimensiones en la tabla 8 con las velocidades tangenciales de la tabla 9.

**Tabla 8 Dimensiones del stack propuesta 2.**

Ancho (cm)	200
Largo (cm)	100
Área (cm <sup>2</sup> )	20000
Espesor del spacer (cm)	0.027
Pares de membranas canal A	1250
Pares de membranas canal B	500

**Tabla 9 Velocidades del stack propuesta 2.**

Canal	Pares de membranas	Velocidad tangencial	TRH
		(cm/s)-spacer	(s)
a	1250	1.11	90
b	500	2.78	36

Con los valores obtenidos de la tabla 9, se hizo ingeniería inversa para determinar que a nivel de laboratorio el caudal de alimentación total de 360 ml/min puede dar las mismas velocidades que en la propuesta 2. Con este valor de caudal (180 ml/min para los cálculos) se extrapoló el voltaje que se requeriría para obtener la misma eficiencia de remoción y la energía específica que se obtendría. Como se puede ver en la tabla 10, se obtuvieron eficiencias similares a las reportadas en la tabla 4 pero con casi mitad de la energía específica. Por lo que implicaría en un menor consumo energético para tratar el agua salobre.

**Tabla 10 Resultados de la propuesta 2.**

E (kWh/m <sup>3</sup> )	e1 (%)	e2 (%)
0.268	29	76

### 3.3 Análisis costo beneficio.

Para el análisis costo beneficio y poder determinar cuál es una mejor propuesta se tomó en consideración las siguientes asunciones:

- El Capex está mayormente dado por el precio de las membranas.

- El tiempo de vida útil de una membrana es de 5 años.
- El Opex está mayormente dado por el consumo energético.
- Al ser un sector que productivo que trabaja doble jornada consume agua todo el día.
- La tarifa de luz eléctrica en el sector camaronero es de 0.065 \$/kWh (Salazar, Delfini, & Delfini, 2019).
- El costo del agua potable proporcionada por la empresa pública es de 3.5 \$/ m<sup>3</sup>.
- Se diluye el agua de la potabilizadora con agua potable para disminuir los SDT. Esto quiere decir que por cada 1 m<sup>3</sup> de agua tratada, pero con SDT, se necesita usar 4.95 m<sup>3</sup> de agua potable para alcanzar el objetivo de 1g/l.
- El costo por m<sup>2</sup> de membrana es de 42\$.
- Se considera que el consumo de agua potable anual es el mismo que el del caudal de diseño de la planta.

### 3.3.1 Escenario base.

El escenario base se desarrolló considerando que se diluye el agua de la potabilizadora con agua potable dado para convertirla en potable. Como se puede ver en la tabla 11.

**Tabla 11 Resultados del escenario base.**

Caudal de diseño (m <sup>3</sup> /hr)	216
Consumo anual (m <sup>3</sup> /año)	1 892 160
Consumo de agua potable de la red (m <sup>3</sup> /año)	1 574 150
Costo por m <sup>3</sup> (\$)	3.5
Costo anual	\$5,509,524.71

### 3.3.2 Escenario de tratamiento.

#### 3.3.2.1 Capex

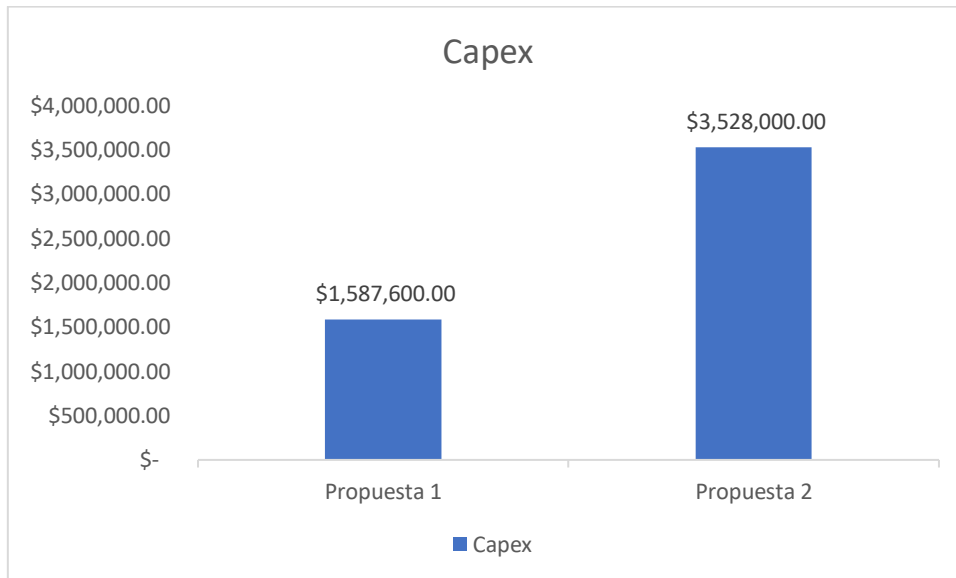
Como se mencionó al inicio del apartado se analizó el capex considerando que la cantidad de membranas que tenga los stacks es la variable predominante, por lo que este dependerá del diseño geométrico. Recapitulando, las propuestas se presentan en la tabla 12.

Como se puede esperar, en base a la figura 21, la propuesta 2 es más cara que la propuesta 1 por la cantidad de membranas. Al menos por capex se pudo considerar que la propuesta 1 era más viable que la propuesta 2.

**Tabla 12 Capex de las 2 propuestas.**

Propuesta 1		Propuesta 2	
Cantidad	18	Cantidad	24
Ancho (cm)	200	Ancho (cm)	200
Largo (cm)	100	Largo (cm)	100
Área (cm <sup>2</sup> )	20000	Área (cm <sup>2</sup> )	20000
Espesor del spacer (cm)	0.027	Espesor del spacer (cm)	0.027
Pares de membranas canal A	750	Pares de membranas canal A	1250
Pares de membranas canal B	300	Pares de membranas canal B	500

**Figura 21 Capex por los m<sup>2</sup> de membrana.**

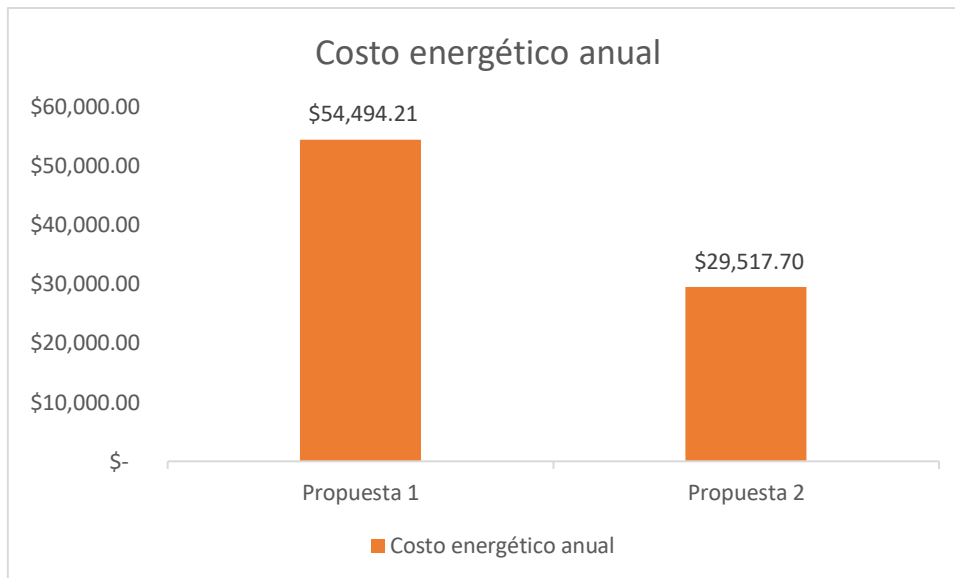


### 3.3.2.2 Opex

Recapitulando los resultados del consumo energético, la propuesta 1 consumía 0.48 kWh/m<sup>3</sup> y la propuesta 2 0.27 kWh/m<sup>3</sup>; además se consideró el consumo anual que tiene la industria según la tabla 11. De esta forma se reporta el costo anual de energía eléctrica en la figura 22.

Como se ve en la figura 22, anualmente la propuesta 1 consumía más energía que la propuesta 2, esto se debe principalmente a que la propuesta número 2 según proyecciones necesitaba menos voltaje que la propuesta 1.

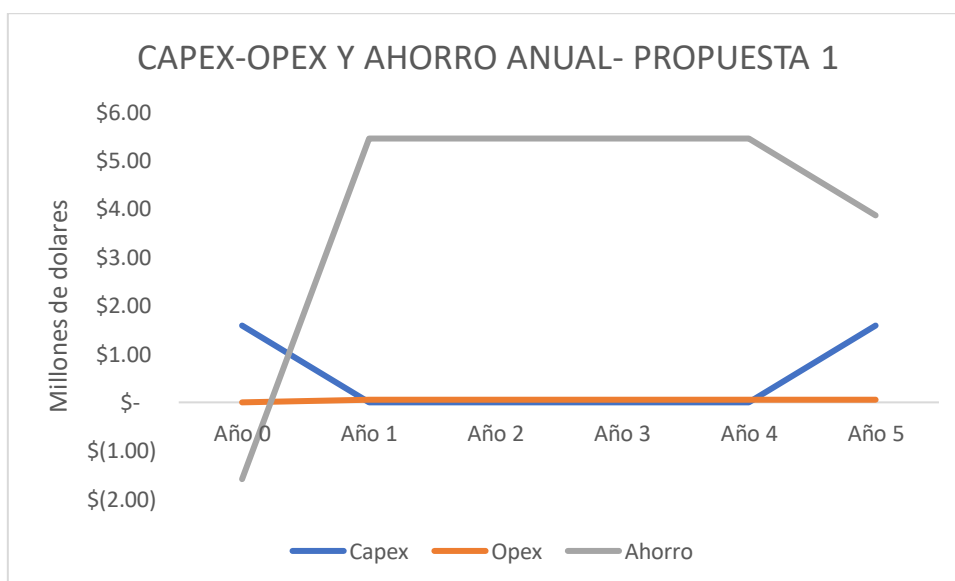
**Figura 22 Opex por consumo energético.**



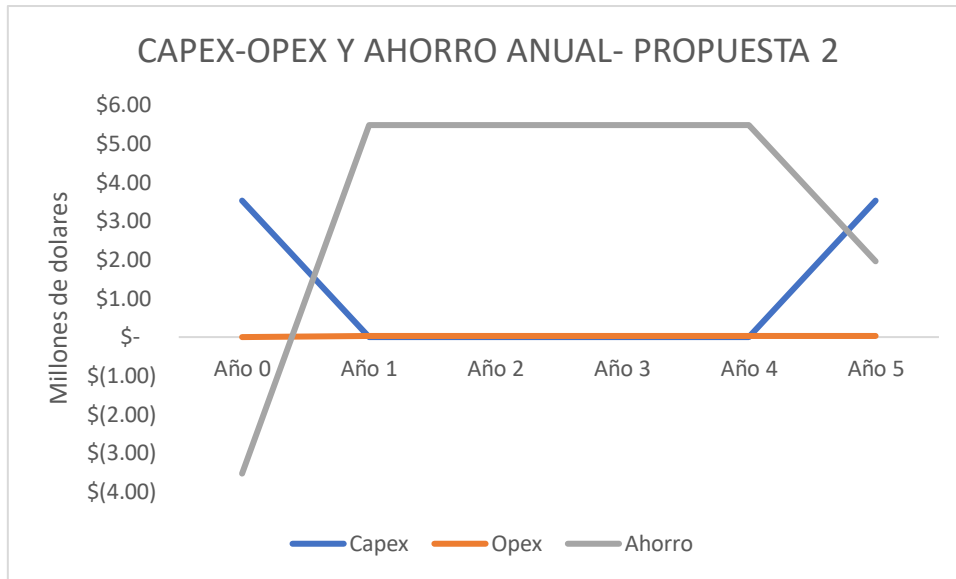
### 3.3.3 Escenario de tratamiento.

Como se ve en las figuras de costo-beneficio (figura 23 y 24), en las propuestas la inversión del año inicial (año 0) se recuperaba con el ahorro obtenido para en el primer año de implementación de la tecnología de electrodiálisis capacitiva en vez de usar las redes de agua potable públicas. Sin embargo, al comparar el año 5, entre las 2 propuestas, se puede notar que en ese año el capex era mayor al ahorro que este pueda significar para la empacadora en la propuesta 2. Mientras que, la propuesta 1 para el año 5 tenía un margen de ahorro más grande que el de los costos.

**Figura 23 Costo beneficio de la propuesta 1.**

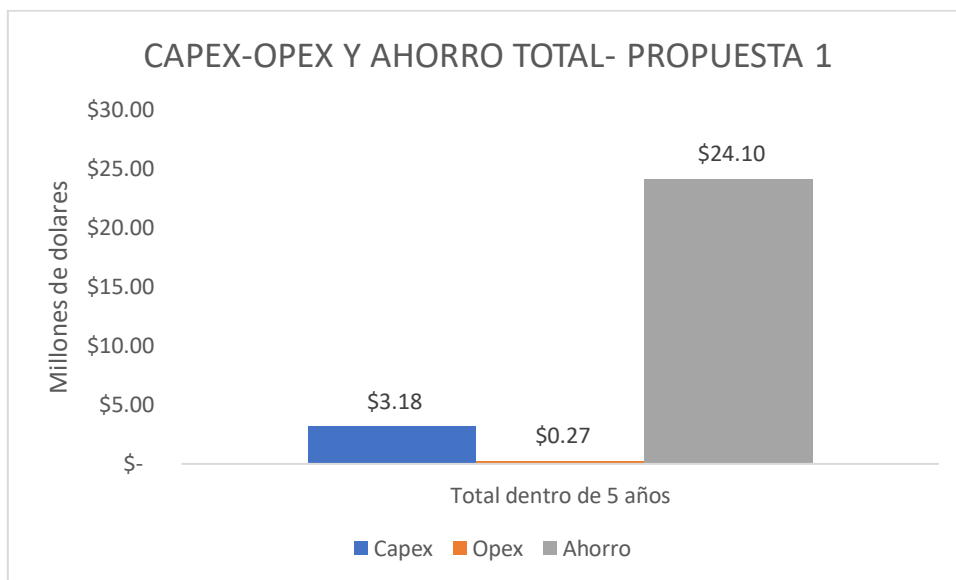


**Figura 24 Costo beneficio de la propuesta 2.**

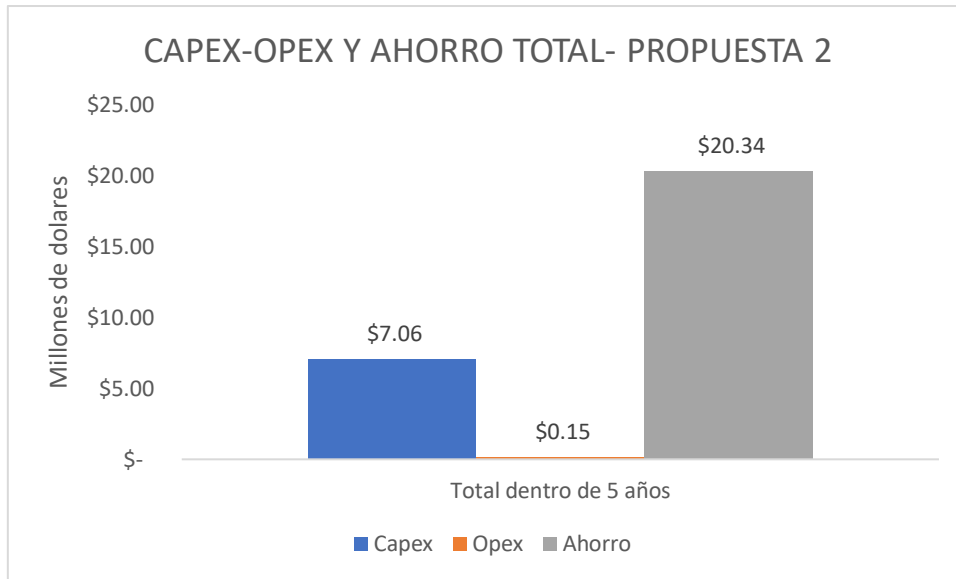


En base a la figura 25 y 26, al hacer la acumulación de los costos y del beneficio dentro del periodo de 5 años, se ve puede ver que la propuesta 1 tiene un ahorro acumulado 3.76 millones de dólares más que en la propuesta 2, haciéndolo la propuesta más económicamente viable.

**Figura 25 Costos y beneficios acumulados en 5 años- Propuesta 1.**



**Figura 26 Costos y beneficios acumulados en 5 años- Propuesta 2.**



### 3.4 Especificaciones técnicas

En relación con el diseño de estructuras hidráulicas, las medidas de las tuberías y equipos secundarios han sido planificadas considerando un flujo de diseño de 216 m<sup>3</sup>/h, necesario para asegurar el funcionamiento ininterrumpido de la empacadora. El sistema central de tratamiento estará formado por un módulo de electrodiálisis capacitiva, cuyas celdas y stacks fueron dimensionadas teniendo en cuenta parámetros operativos antes descritos. Con el objetivo de lograr un consumo energético específico cercano a 1 kWh/m<sup>3</sup> y una salinidad final inferior a 1 g/L de sólidos disueltos totales.

Los equipos adicionales comprenden bombas centrífugas elegidas según los flujos promedio y máximos de operación, tuberías en PVC para el transporte, válvulas de control y corte. Adicionalmente, se han tomado en cuenta aspectos constructivos conforme a normas internacionales como la ASME B31. 3 para las tuberías bajo presión, y normas ISO/ANSI relevantes para conexiones, bridas y válvulas. La selección de materiales tiene como objetivo asegurar fortaleza mecánica, resistencia a la corrosión y facilidad en el funcionamiento y mantenimiento.

Por último, todos los diseños fueron incorporados en un modelo digital utilizando la metodología BIM (Modelado de Información de Construcción) creado en Revit, lo cual permitió definir las cantidades de materiales, revisar interferencias y generar planos constructivos que estén alineados con las especificaciones mencionadas.

### **3.5 Diseño de la solución**

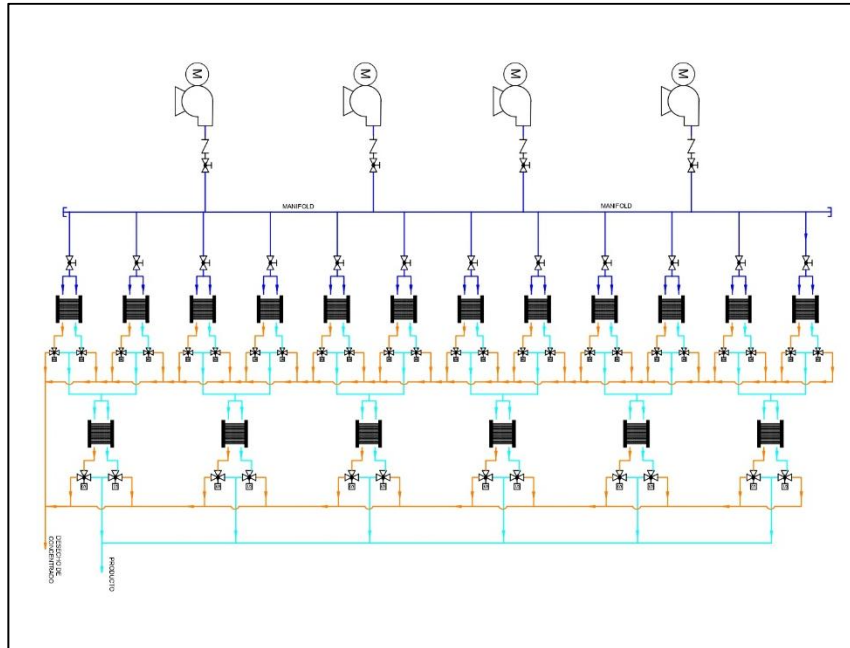
#### **3.5.1 Diagrama de flujo del sistema.**

El sistema inicia con 4 bombas centrífugas configuradas para trabajar en paralelo las cuales se encargarán de impulsar el agua hacia los módulos de electrodiálisis, antes de entrar a cada módulo se utiliza un manifold, para distribuir el caudal de forma equivalente hacia el sistema de tratamiento colocado en serie. Además, después de las bombas se colocan válvulas bolas y válvulas check las cuales sirven para evitar retornos no deseados y permiten cortar el flujo cuando se requiera mantenimiento en las bombas.

De acuerdo a la figura 30 donde se representa el diagrama de flujo de la solución, los módulos de electrodiálisis están representados por color negro, el agua cruda ingresa hacia este módulo y se produce la separación iónica a través de las membranas selectivas dando como resultado el permeado, representado por las líneas de color celeste, y a su vez también se obtiene el concentrado, representado por la línea color naranja, a este sistema se le incorporan válvulas de tipo solenoide de tres canales para que mediante una activación automática se pueda realizar la configuración del respectivo cambio de salidas del producto o permeado cuando la electrodiálisis hace el cambio de polaridad, es decir que el sistema requiere de una operación automática en la cual las válvulas solenoides puedan estar programadas de tal forma que pueda recoger el permeado que va cambiando de lugar de salida con el cambio de polaridad.

El diagrama de la figura 27 muestra cómo los permeados y concentrados deben ser recogidos mediante líneas principales dónde se dispondrá del permeado como el producto obtenido del tratamiento mientras que el concentrado se convierte en un rechazo ya que está enriquecida de iones los cuales fueron removidos del producto. Es así como la disponibilidad en paralelo de varios módulos asegura llegar al caudal de tratamiento y además otorga la escalabilidad del sistema, de tal forma si se requiere a futuro mayor cantidad de agua a tratar se podría instalar un sistema en paralelo adicional, además que el modularidad ayuda al proceso de mantenimiento y operación permitiendo cortar flujos sin que todo el sistema se pare.

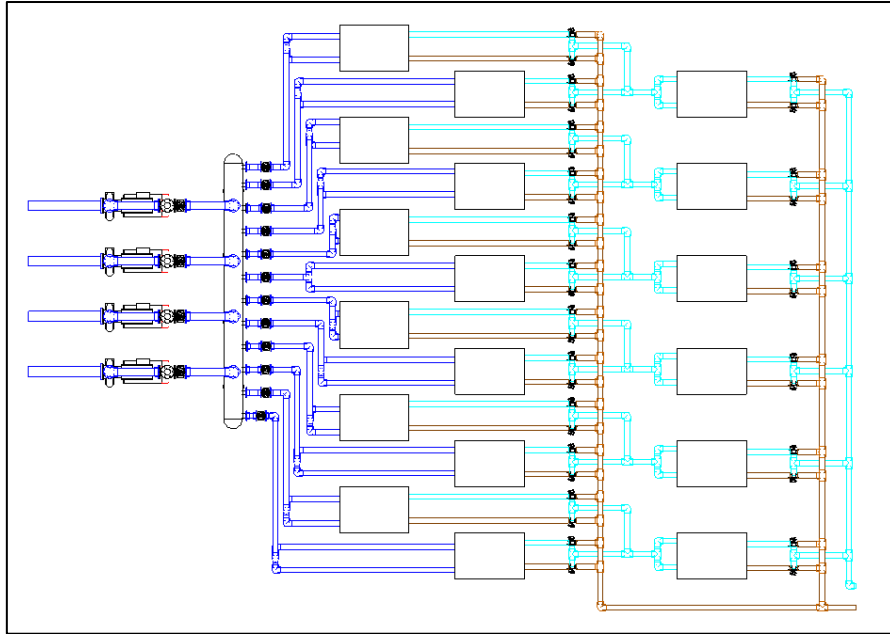
**Figura 27: Diagrama de flujo de la solución.**



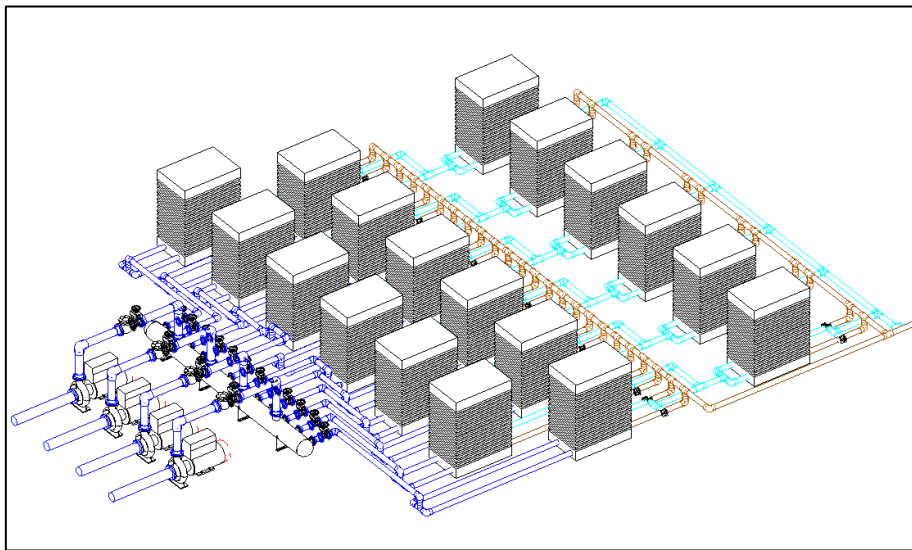
### 3.5.2 Modelo BIM de la solución.

El diseño de la propuesta incluye un modelo digital utilizando la metodología Building Information Modeling (BIM), con ayuda del programa Revit se logró representar de manera tridimensional la propuesta de la planta con electrodiálisis capacitiva, esto ayuda a facilitar el entendimiento el sistema de tuberías propuesto mediante una identificación por colores. Para la creación del modelo se emplearon familias de Revit descargadas en línea como también nuevas familias creadas acorde a las propiedades especificadas de los equipos, tal es el caso del manifold y los módulos de electrodiálisis ya que estos no están disponibles en catálogos genéricos, este modelo no sólo permite tener una visualización realista y detallada de la propuesta sino también contribuye optimizar el conteo de materiales, a su vez identificar interferencias constructivas y generar una base precisa para la elaboración de planos. Dentro de las figuras 28, 29, 30 y 31 se puede visualizar el modelo generado.

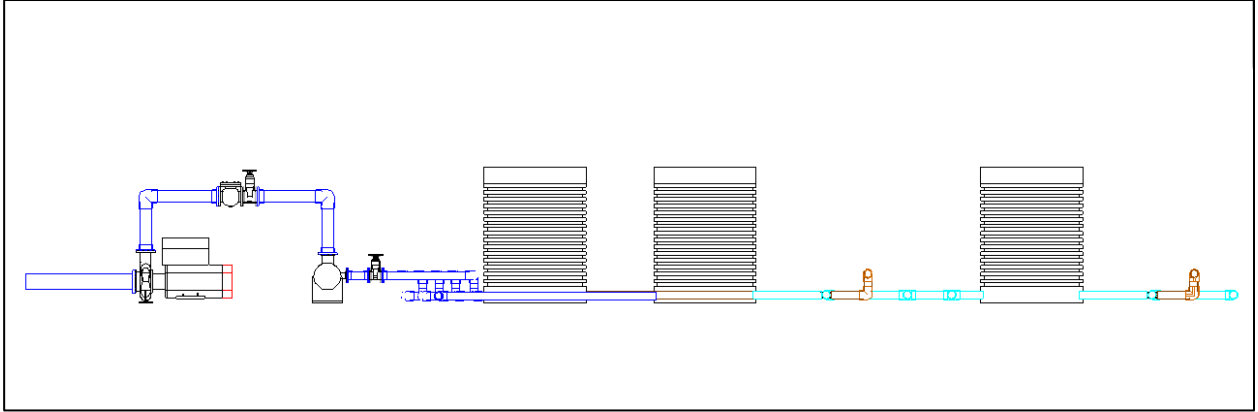
**Figura 28: Implantación de modelo.**



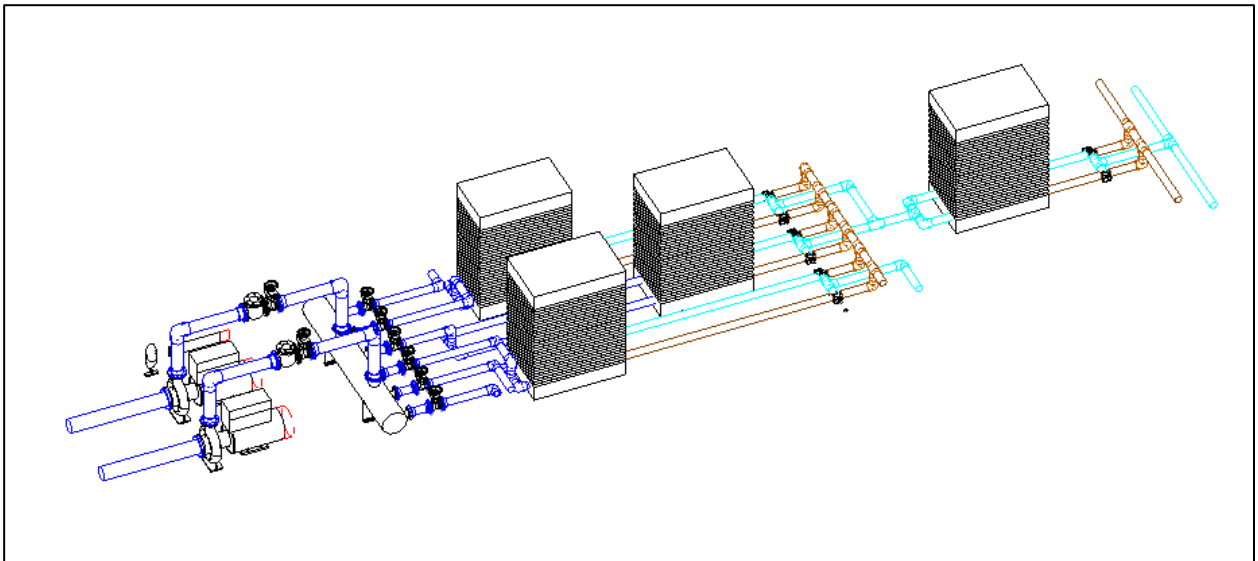
**Figura 29: Vista 3D del modelo.**



**Figura 30: Vista lateral del modelo.**



**Figura 31: Vista 3D de conexión entre módulos.**



En las figuras 28, 29, 30 y 31 se ha utilizado el color azul para representar las tuberías que transportan agua cruda, el color celeste para tuberías que transportan el permeado y naranja para el concentrado. En la figura 31 se observa como el flujo ingresa al primer módulo pasando por una válvula de corte, para después tener agua de tipo permeada y concentrada conectadas a un sistema de válvulas solenoides de tres cales antes de entrar al segundo modulo. A la salida se requiere así mismo de un sistema interconectado de válvulas para que mediante la acción automática estas puedan ir distribuyendo el tipo de agua obtenida en el cambio de polaridad. Los modelos son presentados formalmente en los planos 1,2 y 3 indicando longitudes de tubería y accesorios necesarios para la instalación.

### 3.6 Precios CAPEX de la solución.

Para la evaluación de los gastos relacionados con el suministro e instalación de los dispositivos y accesorios del sistema propuesto, se utilizó un enfoque que se basa en precios de mercado orientativos y tarifas de técnicos especializados en la instalación de sistemas hidráulicos. Primero, se definió un costo por unidad para cada ítem, que abarca tanto la compra del componente (como bombas, válvulas, tuberías, accesorios y paneles de control) como los costos de instalación, que incluyen mano de obra, herramientas y materiales consumibles necesarios para su ensamblaje. Los precios fueron recopilados a través de una revisión de catálogos de proveedores tanto locales como internacionales, de listas de tarifas actualizadas y de la experiencia acumulada en proyectos similares llevados a cabo en la región, se representó estos costos y se visualizan mediante la tabla 13.

**Tabla 13: Costos de implementación.**

ITEM	RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	P. TOTAL
1	Suministro e instalación de bombas centrifugas	u	4,00	\$ 2.940,00	\$ 11.760,00
2	Suministro e instalación de manifold de $\phi 14''$ y L=5.80 m	u	1,00	\$ 2.175,00	\$ 2.175,00
3	Suministro e instalación de Válvulas de corte $\phi 4''$	u	24,00	\$ 261,00	\$ 6.264,00
4	Suministro e instalación de Válvulas de corte $\phi 6''$	u	4,00	\$ 406,00	\$ 1.624,00
5	Suministro e instalación de Válvulas check $\phi 6''$	u	4,00	\$ 507,50	\$ 2.030,00
6	Suministro e instalación de Válvulas solenoides de 3 canales $\phi 4''$	u	36,00	\$ 652,50	\$ 23.490,00
7	Suministro e instalación de Tuberías PVC E/C $\phi 8''$	m	6,4	\$ 130,00	\$ 832,00
8	Suministro e instalación de Tuberías PVC E/C $\phi 4''$	m	247,00	\$ 58,00	\$ 14.326,00
9	Suministro e instalación de Tuberías PVC E/C $\phi 6''$	m	13,50	\$ 94,25	\$ 1.272,38
10	Suministro e instalación de bridas PVC E/C $\phi 6''$	u	16,00	\$ 130,50	\$ 2.088,00
11	Suministro e instalación de bridas PVC E/C $\phi 4''$	u	36,00	\$ 101,50	\$ 3.654,00
12	Suministro e instalación de codos de $90^\circ$ PVC E/C $\phi 4''$	u	116,00	\$ 72,50	\$ 8.410,00
13	Suministro e instalación de codos de $90^\circ$ PVC E/C $\phi 6''$	u	8,00	\$ 130,50	\$ 1.044,00
16	Suministro e instalación de TEE PVC E/C $\phi 4''$	u	72,00	\$ 130,50	\$ 9.396,00
17	Suministro e instalación de Tablero de control.	u	1,00	\$ 3.625,00	\$ 3.625,00

18	Suministro e instalación de módulo de electrodiálisis.	u	18,00	88200,00	\$1.587.600,00
Total					\$1.679.590,38

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

El desarrollo del proyecto permitió demostrar la viabilidad técnica y económica del uso de la electrodiálisis capacitiva como alternativa para el tratamiento de agua salobre destinada a procesos en la industria camaronera. A partir de la caracterización fisicoquímica del agua captada del río Guayas, se evidenció que durante la época de estiaje los niveles de sólidos disueltos totales superan los 5 000 mg/L, valores que imposibilitan su utilización directa en las empacadoras. En este contexto, el sistema propuesto logró reducir la salinidad del agua hasta concentraciones inferiores a 1 g/L, cumpliendo con los límites establecidos en la norma INEN 1108 y el TULSMA Libro VI.

Los resultados de laboratorio confirmaron que el parámetro de voltaje y la velocidad de flujo son determinantes en la eficiencia del proceso, alcanzándose una remoción superior al 80 % de SDT y una energía específica promedio de 0.44–0.48 kWh/m<sup>3</sup>. Esto ratifica el cumplimiento del objetivo general al diseñar un sistema energéticamente eficiente. Asimismo, la extrapolación del modelo a escala industrial, con una capacidad de 216 m<sup>3</sup>/h, demuestra la factibilidad de implementar el proceso mediante un esquema modular adaptable a la demanda.

Desde el punto de vista económico, el análisis CAPEX/OPEX reveló que el costo de las membranas representa el principal componente del proyecto, sin embargo, su vida útil y bajo consumo energético garantizan la recuperación de la inversión en un plazo menor a dos años. En términos ambientales, la tecnología propuesta evita la generación de efluentes químicos, favorece la reutilización de agua y promueve la sostenibilidad del recurso hídrico. En conclusión, el uso de electrodiálisis capacitiva se consolida como una

solución innovadora, eficiente y sostenible para la industria camaronera ecuatoriana, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6, 9 y 12.

## **4.2 Recomendaciones**

Con base en los resultados alcanzados, se recomienda continuar con investigaciones orientadas a optimizar los parámetros de operación de la electrodiálisis capacitiva, especialmente en lo referente al tiempo de adsorción, la polaridad y la configuración de los canales de flujo. En futuras etapas, debería evaluarse el comportamiento del sistema bajo condiciones de mayor salinidad o en operación continua, con el fin de establecer curvas de rendimiento que permitan automatizar el proceso y maximizar la eficiencia energética.

Desde el punto de vista económico, se sugiere comparar el desempeño de la electrodiálisis capacitiva frente a tecnologías tradicionales como la ósmosis inversa o la nanofiltración, incorporando un análisis de ciclo de vida que incluya los gastos de mantenimiento y la disponibilidad de componentes en el mercado nacional. En el ámbito ambiental, sería pertinente cuantificar la reducción de huella de carbono asociada al reemplazo de agua potable por agua tratada mediante electrodiálisis. Finalmente, se recomienda realizar pruebas piloto en campo en colaboración con empresas del sector camaronero, de manera que los resultados obtenidos en laboratorio puedan validarse a escala industrial, consolidando una base técnica sólida para futuras implementaciones en el país.

Se recomienda realizar nuevas pruebas experimentales enfocadas en incrementar el porcentaje de recuperación del sistema mediante la recirculación parcial del flujo concentrado. Esta estrategia permitiría aprovechar la fracción de agua que aún conserva una concentración intermedia de sales, reduciendo así el volumen total de rechazo y mejorando la eficiencia global del proceso. La recirculación del concentrado también podría contribuir a estabilizar la conductividad de alimentación entre ciclos, favoreciendo un desempeño más uniforme de las membranas y una menor variabilidad en la eficiencia de remoción. Para ello, se sugiere evaluar distintos porcentajes de recirculación (por ejemplo, entre 10 % y 30 %) y analizar su impacto sobre el consumo energético, la calidad del permeado y la vida útil de las membranas, con el fin de establecer una configuración óptima que maximice la recuperación sin comprometer la integridad del sistema ni generar incrustaciones en los canales de concentración.

Finalmente, a escala de laboratorio se recomienda tener dos stacks en línea conectados y con válvulas solenoides que permitan simular el proceso. Además, obtener un potencióstato que tenga la capacidad de soportar hasta 5 A para que no haya la limitante de los 2 A que hubo en este estudio.

# BIBLIOGRAFÍA

- Fu, J., Wang, H., Jin, R., Liu, P., Li, Y., Wang, Y., . . . Sun, Z. (8 de Marzo de 2022). *MDPI*. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/app12062874>
- Guleria, T. V. (2024). Water reuse and resource recovery from greenhouse wastewater by capacitive electrodialysis at pilot scale. *Desalination*, 583. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117669>
- Kuhnert, E., Heidinger, M., Sandu, D., Hacker, V., & Bodner, M. (17 de Marzo de 2023). *MDPI*. Obtenido de Analysis of PEM Water Electrolyzer Failure Due to Induced Hydrogen Crossover in Catalyst-Coated PFSA Membranes: <https://doi.org/10.3390/membranes13030348>
- Liang, Y., Song, Y., Sunn, Y., Lou, L., Wang, J., & He, J. (29 de marzo de 2025). *Research on the desalination kinetics of carbon tableting electrodes for capacitive deionization water purification*. Obtenido de Scientific Reports: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95292-4>
- Ma, L. R. (2023). Fate of organic micropollutants during brackish water desalination for drinking water production in decentralized capacitive electrodialysis. *Water Research*, 245. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120625>
- Ma, X., Li, Y., Cao, H., Duan, F., Su, C., Lu, C., . . . Ding, H. (1 de junio de 2019). *Separation and Purification Technology*. Obtenido de High-selectivity membrane absorption process for recovery of ammonia with electrospun hollow fiber membrane: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.025>
- Mendoza, M. (19 de FEBRERO de 2025). *Forbes EC*. Obtenido de <https://www.forbes.com.ec/rankings/estas-son-10-mayores-exportadoras-camaron-ecuatoriano-n67863>
- Ministerio de Energia y Minas. (13 de Julio de 2020). *Ministerio de Energia y Minas Ecuador*. Obtenido de <https://www.rekursyenergia.gob.ec/mas-de-usd-335-millones-se-invertira-en-electrificacion-en-el-sector-camaronero/>
- MPCEIP. (enero-marzo de 2024). *ANÁLISIS TRIMESTRAL*. Obtenido de Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.produccion.gob.ec/wp>

-content/uploads/2024/05/Analisis-trimestral-de-comercio-exterior-ene-mar-2024.pdf

- Piedra, M., & Aguirre, L. (2022). país existen aproximadamente 210 000 hectáreas dedicadas al cultivo de camarón, de las cuales alrededor del 60 % está en la provincia del Guayas. 11.
- Porada, S., Zhao, R., van der Wal, A., Presser, V., & Biesheuvel, P. (Octubre de 2013). *Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization*. Obtenido de Progress in Materials Science: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.03.005>
- Roman, M., Roman, P., Verbeke, R., Gutierrez, L., Vanoppen, M., Dickmann, M., & Egger, W. (9 de Febrero de 2021). *Recent progress in renewable energy based-desalination in the Middle East and North Africa MENA region*. Obtenido de ISCIENCE: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102095>
- Salazar, P., Delfini, E., & Delfini, R. (14 de Enero de 2019). *Global Seafood Alliance*. Obtenido de <https://www.globalseafood.org/advocate/eficiencia-energetica-en-sistemas-de-bombeo-en-granjas-acuicolas/>
- Sayed, E. T., Elsaid, K., Al Radi, M., Alqadi, R., & Abdelkareem, M. A. (2022). *Recent progress in renewable energy based-desalination in the Middle East and North Africa MENA region*. Obtenido de Journal of Advanced Research: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.08.016>
- SeafoodSource. (21 de enero de 2024). *SeafoodSource*. Obtenido de Ecuador sees slight dip in 2024 shrimp exports, optimistic about 2025 growth.: [https://www.seafoodsource.com/news/supply-trade/ecuador-sees-slight-dip-in-2024-shrimp-exports-optimistic-about-2025-growth?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.seafoodsource.com/news/supply-trade/ecuador-sees-slight-dip-in-2024-shrimp-exports-optimistic-about-2025-growth?utm_source=chatgpt.com)
- Shannon, M., Bohn, P., Elimelech, M., Georgiadis, J., Mariñas, B., & Mayes, A. (20 de marzo de 2008). *Nature*. Obtenido de Science and technology for water purification in the coming decades: <https://doi.org/10.1038/nature06599>

# PLANOS Y ANEXOS

**Anexo 1:** Toma de parámetros el agua de captación.



**Anexo 2:** PH en la captación.



**Anexo 3: Turbiedad en captación.**



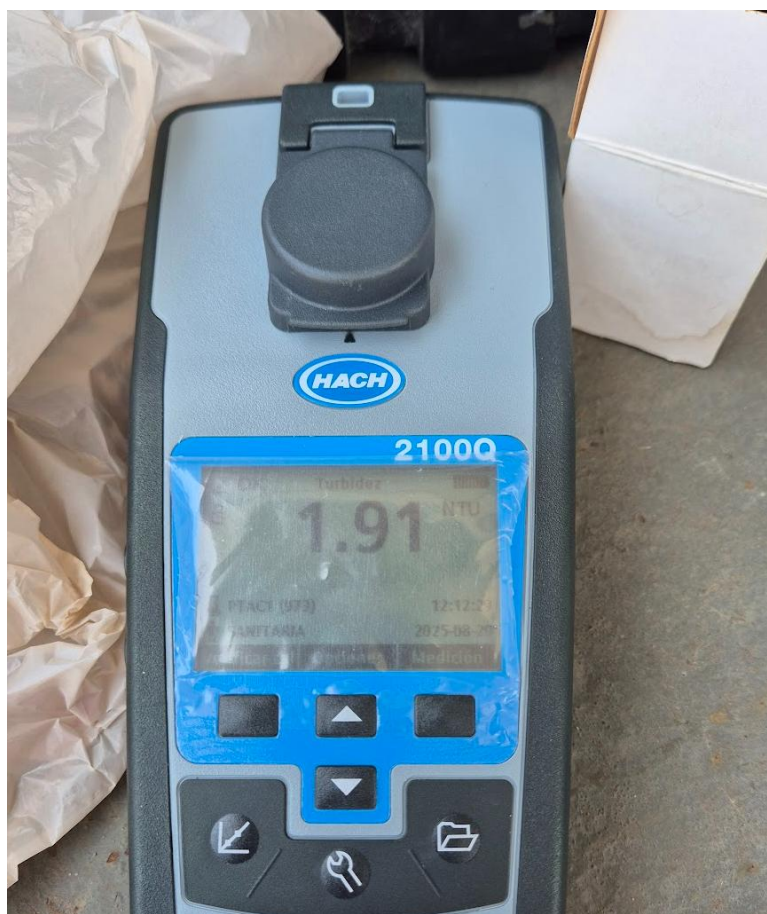
**Anexo 4: Primera toma de parámetros en agua tratada.**



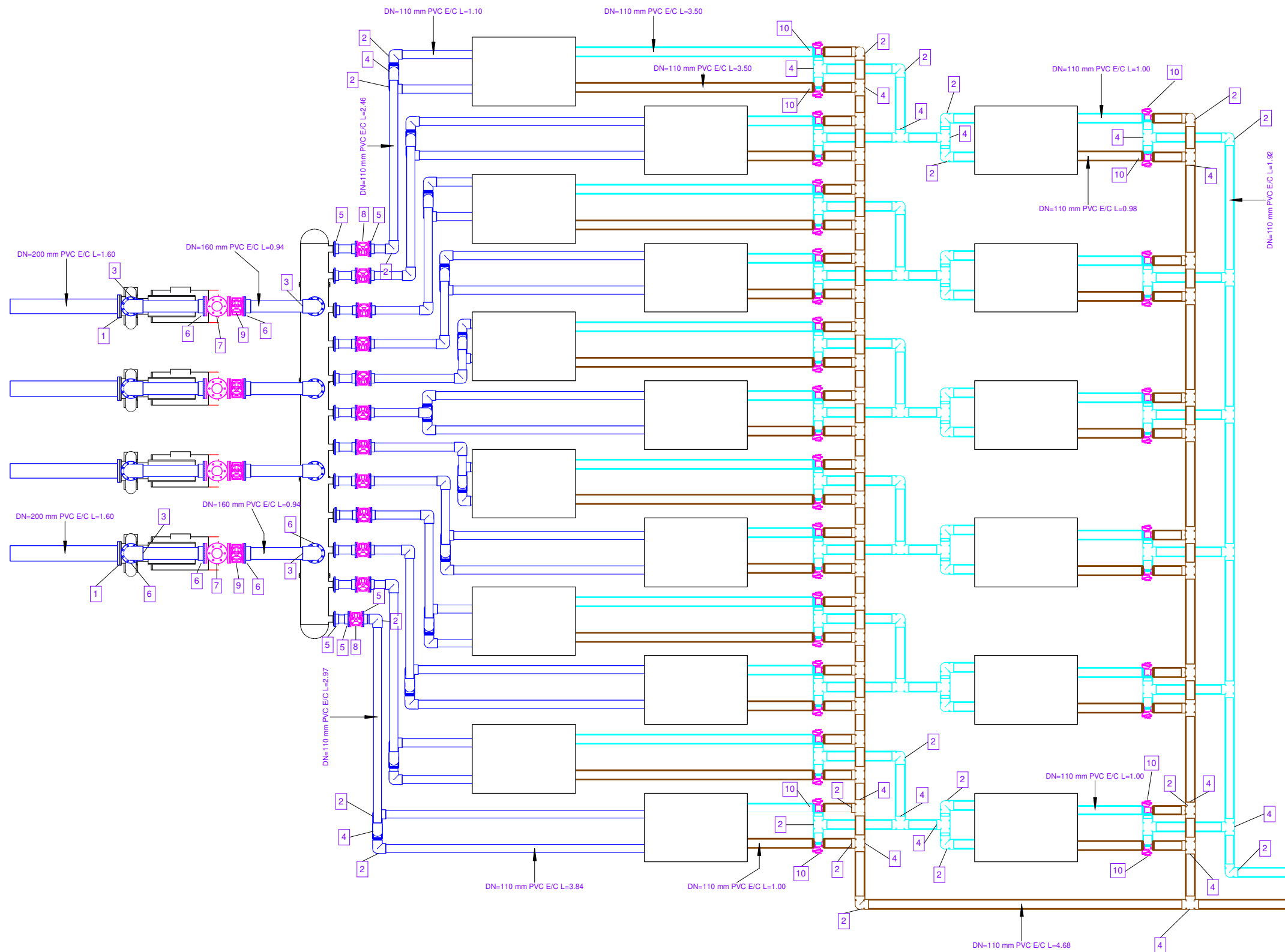
**Anexo 5:** Segunda toma de parámetros en agua tratada.



**Anexo 6:** Turbiedad en agua tratada.



## IMPLANTACION DEL MODULO DE DESALINIZACION



SIMBOLOGÍA	
AGUA SALADA	<span style="color: blue;">—</span>
PERMEADO	<span style="color: cyan;">—</span>
CONCENTRADO	<span style="color: brown;">—</span>
VALVULAS	<span style="color: magenta;">—</span>

UNIONES DE TUBERIA				
#	DESCRIPCION	DN	MATERIAL	CANTIDAD
1	BRIDA INYECTADA	200 mm	PVC E/C	4
2	CODO 90°	110 mm	PVC E/C	116
3	CODO 90°	160 mm	PVC E/C	8
4	TEE	110 mm	PVC E/C	72
5	BRIDA INYECTADA	110 mm	PVC E/C	36
6	BRIDA INYECTADA	160 mm	PVC E/C	16

VALVULAS				
#	DESCRIPCION	DN	MATERIAL	CANTIDAD
7	VALVULA CHECK	160 mm	ACERO	4
8	VALVULA DE CORTE BRIDADA	110 mm	ACERO	12
9	VALVULA DE CORTE BRIDADA	160 mm	ACERO	4
10	VALVULA SELENOIDE DE 3 VIAS	110 mm	---	36

CANTIDADES DE TUBERIA			
DESCRIPCION	DN	MATERIAL	TOTAL (m)
TUBERIA	110 mm	PVC E/C	247.07
TUBERIA	160 mm	PVC E/C	13.53
TUBERIA	200 mm	PVC E/C	6.40

### Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Construcción y Saneamiento

#### TITULO DEL PROYECTO:

Diseño de un módulo de desalinización de agua salobre mediante electrodialísis capacitiva para obtención de agua de uso industrial. Caso de estudio empacadora de camarón ubicada en el Sur de Guayaquil.



REALIZADO POR:  
Ing. Amílcar Valdívieso Toledo  
Ing. Oswaldo Vélez Villacis

APROBADO POR:  
Ph.D Leonardo Gutierrez Garces  
Ph.D Priscila Valverde Armas  
MSc. Samantha Jimenez Oyola

FECHA DE EMISIÓN:  
14/11/2025  
LÁMINA:  
1/2  
ESCALA:  
AJUSTADA

UNIONES DE TUBERIA

#	DESCRIPCION	DN	MATERIAL	CANTIDAD
1	BRIDA INYECTADA	200 mm	PVC E/C	4
2	CODO 90°	110 mm	PVC E/C	116
3	CODO 90°	160 mm	PVC E/C	8
4	TEE	110 mm	PVC E/C	72
5	BRIDA INYECTADA	110 mm	PVC E/C	36
6	BRIDA INYECTADA	160 mm	PVC E/C	16

VALVULAS

#	DESCRIPCION	DN	MATERIAL	CANTIDAD
7	VALVULA CHECK	160 mm	ACERO	4
8	VALVULA DE CORTE BRIDADA	110 mm	ACERO	12
9	VALVULA DE CORTE BRIDADA	160 mm	ACERO	4
10	VALVULA SELENOIDE DE 3 VIAS	110 mm	---	36

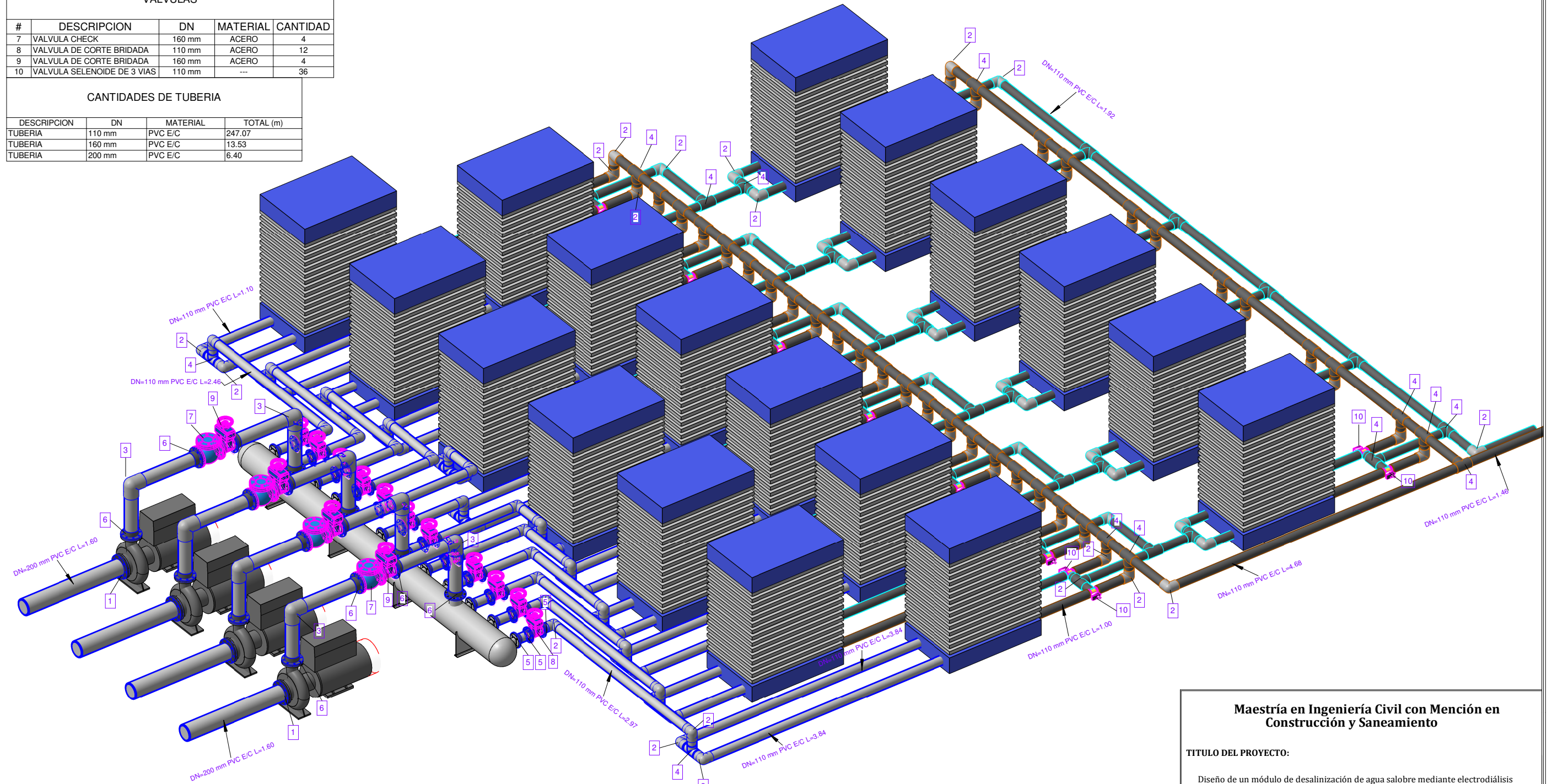
CANTIDADES DE TUBERIA

DESCRIPCION	DN	MATERIAL	TOTAL (m)
TUBERIA	110 mm	PVC E/C	247.07
TUBERIA	160 mm	PVC E/C	13.53
TUBERIA	200 mm	PVC E/C	6.40

SIMBOLOGÍA

AGUA SALADA	
PERMEADO	
CONCENTRADO	
VALVULAS	

VISTA 3D DEL MODULO DE DESALINIZACION



Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Construcción y Saneamiento

TITULO DEL PROYECTO:

Diseño de un módulo de desalinización de agua salobre mediante electrodiálisis capacitiva para obtención de agua de uso industrial: Caso de estudio empacadora de camarón ubicada en el Sur de Guayaquil.

**espol** Escuela Superior Politécnica del Litoral

REALIZADO POR:

Ing. Amílcar Valdivieso Toledo  
Ing. Oswaldo Vélez Villacis

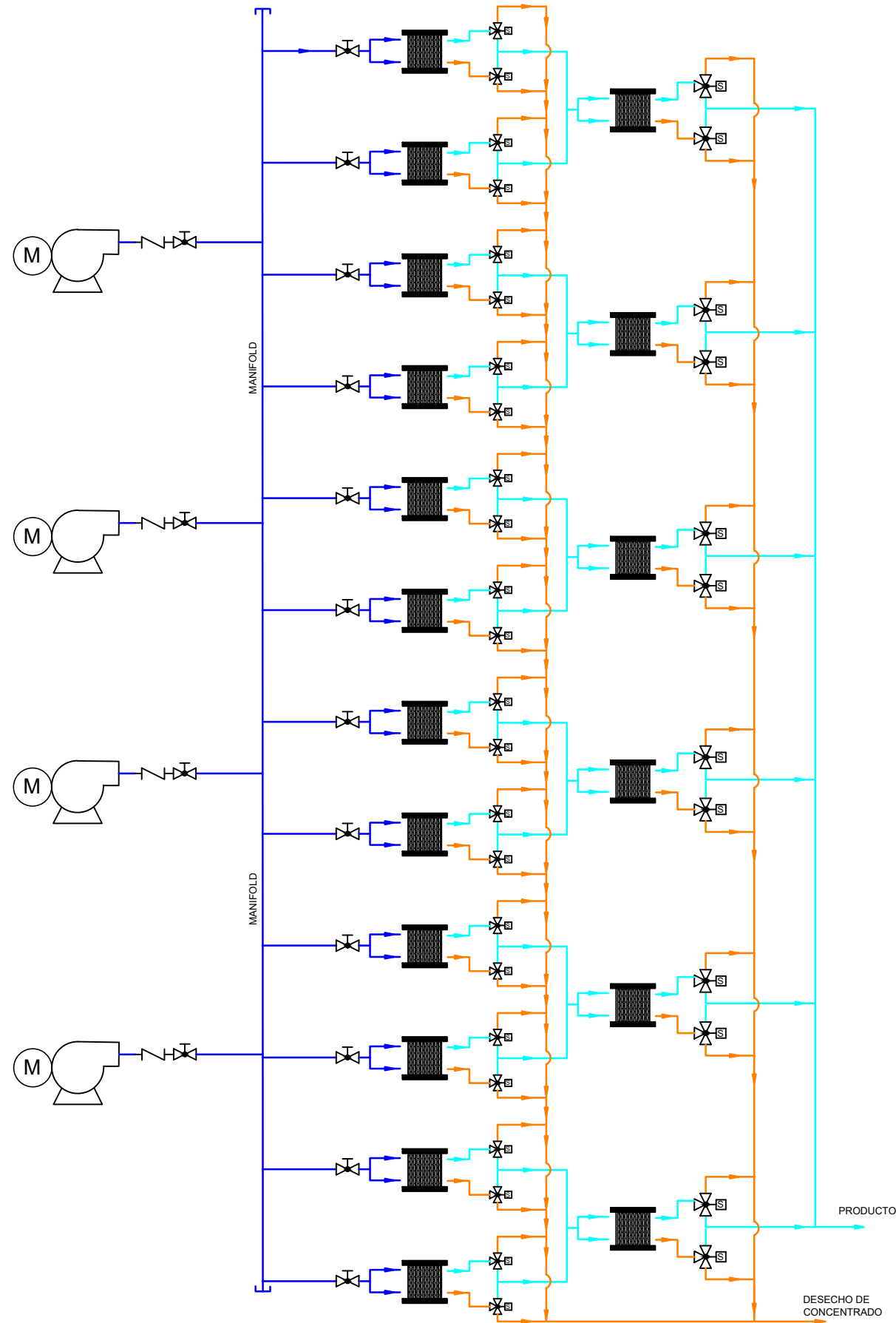
APROBADO POR:

Ph.D Leonardo Gutierrez Garces  
Ph.D Priscila Valverde Armas  
MSc. Samantha Jimenez Oyola

FECHA DE EMISIÓN:  
14/11/2025

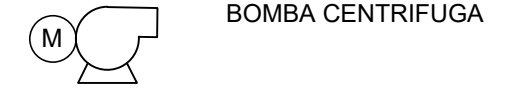
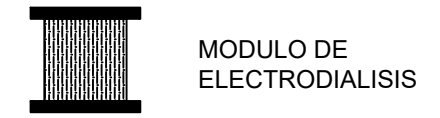
LÁMINA:  
1/2

ESCALA:  
AJUSTADA



## SIMBOLOGÍA

### EQUIPOS



### ACCESORIOS



### REDES

AGUA CRUDA —————

PERMEADO —————

CONCENTRADO —————

## Maestría en Ingeniería Civil con Mención a Construcción y Saneamiento

### TITULO DEL PROYECTO:

Diseño de un módulo de desalinización de agua salobre mediante electrodiálisis capacitiva para obtención de agua de uso industrial: Caso de estudio empaquera de camarón ubicada en el Sur de Guayaquil.

**espol** Escuela Superior Politécnica del Litoral

REALIZADO POR:  
Ing. Amílcar Valdivieso Toledo  
Ing. Oswaldo Vélez Villacís

APROBADO POR:  
Ph.D Leonardo Gutierrez Garces  
Ph.D Priscila Valverde Armas  
MSc. Samantha Jimenez Oyola

FECHA DE EMISIÓN:  
9/11/2025

LÁMINA: 1/1

ESCALA: AJUSTADA