

Implementación de un Piloto de Electrodiálisis para la Desalinización del Lactosuero y  
Derivados

Laura Valentina Cedeño González y Luis Carlos Coronado Medrano

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Prof. Carlos Jesús Muvdi Nova

Ingeniero químico, M.Sc., Ph.D.

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Programa Académico  
Bucaramanga

2023

### **Dedicatorias**

*Dedicado a cada integrante de mi familia por el apoyo, la paciencia y el amor hacia este proyecto de vida.*

*A mis profesores, por su orientación y sabiduría impartida. Su compromiso con la formación académica han sido fundamentales para mi crecimiento personal y profesional.*

*Este trabajo de grado es el resultado de años de esfuerzo y sacrificio, y lo dedico a cada persona que ha sido parte de mi camino y que, de una forma u otra, han contribuido a mi desarrollo.*

*Laura Valentina Cedeño González*

*Agradezco a DIOS TODO PODEROSO por a pesar de difíciles circunstancias darme la  
motivación para lograr cada objetivo.*

*A mi querida Nathalia Gamboa por su comprensión y ánimo.*

*A mis padres, Erwin y Luz Marina por confiar en mí y apoyarme.*

*Luis Carlos Coronado Medrano*

### **Agradecimientos**

Expresamos nuestro agradecimiento primero a DIOS por darnos la oportunidad de vivir esta experiencia.

A la Universidad Industrial de Santander por abrirnos sus puertas y darnos las herramientas para formarnos como profesionales.

A la Escuela de Ingeniería Química y a cada uno de sus integrantes, por brindarnos experiencias enriquecedoras para el crecimiento profesional y personal.

Al profesor Carlos Jesús Muvdi Nova por brindarnos la oportunidad de trabajar en este proyecto. Por su paciencia y dedicación en enseñar, guiar y aconsejar íntegramente.

Al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación – MinCiencias, por el apoyo recibido a través del proyecto Código:110285270590.

A la empresa INAL INDUSTRIAS ACUÑA LTDA, por su disposición, apoyo y aporte significativo para la ejecución de este proyecto.

Finalmente, al grupo de investigación CICTA UIS por apoyarnos y guiarnos durante nuestro proceso de investigación.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos .....	13
1.1. Objetivo general.....	13
1.2. Objetivos específicos .....	13
2. Marco teórico .....	14
3. Estado del arte .....	16
4. Metodología .....	17
4.1. Construcción e implementación del piloto de electrodiálisis. ....	17
4.2. Definición de las condiciones de operación con soluciones ideales.....	19
4.3. Operación con soluciones reales (lactosuero, hidrolizados de requesón y caldos de fermentación).....	20
5. Resultados .....	22
5.1. Construcción, implementación y pruebas iniciales para la verificación de ensamblado...22	
5.2. Desempeño del piloto de electrodiálisis utilizando soluciones ideales. ....	27
5.3. Desempeño del piloto de electrodiálisis utilizando soluciones reales. ....	34
6. Conclusiones .....	44
7. Recomendaciones .....	46
Referencias bibliográficas.....	47

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Inconvenientes presentados en las pruebas de funcionamiento del piloto a las siguientes condiciones de operación: $T_i=25^{\circ}\text{C}$ y $Q=25\text{ L/h}$ . .....	25
<b>Tabla 2</b> Corriente eléctrica en función del potencial eléctrico aplicado al módulo membranario para una solución de agua desmineralizada con NaCl a 2,5 g/L en los circuitos CC y CD.....	28
<b>Tabla 3</b> Flux de membrana para los ciclos 1, 2 y 3 de la solución ideal presentada en la Figura 5, a concentraciones de 71 g/L de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ para el circuito CL, 1g/L para el circuito CC al inicio de cada ciclo, y 7 g/L para el circuito CD ciclo 1.....	33
<b>Tabla 4</b> Resultados de la caracterización de las soluciones reales en el circuito CD. a) lactosuero, b) hidrolizados de requesón, c) caldos de fermentación. Las soluciones se trabajaron a concentraciones iniciales de 71 g/L de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ para el circuito CL. 1g/L para el circuito CC en el lactosuero e hidrolizados; y los caldos de fermentación a concentración de 4 g/L para el circuito CC. ....	41

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Piloto de electrodiálisis ensamblado. ....	23
<b>Figura 2</b> Comportamiento de la temperatura sin conectar el módulo vs tiempo, usando agua desmineralizada, $Q=25$ L/h y a) Baño con agua como refrigerante a $T_i = 0^\circ\text{C}$ , b) Baño con agua y monoetilenglicol como refrigerante a $T_i = -5^\circ\text{C}$ . ....	27
<b>Figura 3</b> Curva de calibración. ....	29
<b>Figura 4</b> Comportamiento de la conductividad empleando un potencial eléctrico de 30V, caudal de 30 L/h para los circuitos CD y CD y a concentraciones iniciales de 71 g/L de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ para el circuito CL en ambas gráficas y, a) 5,3g/L de NaCl para los circuitos CC y CD, b) 1g/L para el circuito CC y 7g/L para el circuito CD de NaCl. ....	30
<b>Figura 5</b> Evolución de la conductividad en función del tiempo durante la desalinización por ciclos a concentraciones de 71 g/L de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ para el circuito CL, 1g/L para el circuito CC al inicio de cada ciclo, y 7 g/L para el circuito CD ciclo 1. ....	32
<b>Figura 6</b> Desalinización del lactosuero a concentraciones de 71 g/L de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ para el circuito CL y 1g/L para el circuito CC. a) Original, b) Duplicado. ....	35
<b>Figura 7</b> Desalinización de hidrolizados de requesón a concentraciones de 71 g/L de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ para el circuito CL y 1g/L para el circuito CC. a) Original, b) Duplicado. ....	37
<b>Figura 8</b> Desalinización por ciclos de caldos de fermentación a concentraciones de 71 g/L de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ para el circuito CL y 4 g/L para el circuito CC. ....	39

### **Lista de Apéndices**

**Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS**

**Apéndice A.** Manual de operación del piloto de electrodiálisis.



### Resumen

**Título:** Implementación de un piloto de electrodiálisis para la desalinización del lactosuero y derivados\*

**Autores:** Laura Valentina Cedeño González, Luis Carlos Coronado Medrano\*\*

**Palabras clave:** Electrodiálisis, Desalinización, Transferencia de iones, Soluciones salinas.

**Descripción:** Este trabajo consistió en construir e implementar un equipo de electrodiálisis a escala piloto laboratorio para la recuperación de componentes del lactosuero a través de procesos que involucran membranas para la transferencia de iones, como lo es la electrodiálisis. Se logra construir un piloto de electrodiálisis para desalar soluciones como lactosuero, hidrolizados de requesón y caldos de fermentación. Durante la implementación del piloto de electrodiálisis, se presentaron algunos inconvenientes respecto al incremento de la temperatura, pero este se soluciona con la inclusión de un sistema de enfriamiento provisional en los tanques de alimentación. Se definieron las condiciones de operación con soluciones ideales y se realizaron pruebas con soluciones reales. Se logró desalar las soluciones y se caracterizaron en términos de ceniza, iones monovalentes, proteínas, lactato, lactosa y ácido láctico. Los resultados mostraron una reducción del 92,1% en la concentración de NaCl en soluciones ideales y una disminución del 65% en el flux de permeado del ciclo 1 al ciclo 3. A través de la implementación del piloto de electrodiálisis se logró desalar soluciones como lactosuero, hidrolizados de requesón y caldos de fermentación, lo que indica que la electrodiálisis puede ser una técnica efectiva para la recuperación de componentes y la desalación de soluciones en la industria láctea.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Carlos Jesús Muvdi Nova

**Abstrac**

**Title:** Implementation of an Electrodialysis Pilot Plant for Desalination of Whey and Derivatives\*

**Authors:** Laura Valentina Cedeño González, Luis Carlos Coronado Medrano\*\*

**Keywords:** Electrodialysis, Desalination, Ion Transfer, Saline Solutions

**Description:** This work consisted of building and implementing electrodialysis equipment on a pilot laboratory scale for the recovery of whey components through processes that involve membranes for ion transfer, such as electrodialysis. It is possible to build an electrodialysis pilot to desalt solutions such as whey, cottage cheese hydrolysates and fermentation broths. During the implementation of the electrodialysis pilot, some inconveniences regarding the increase in temperature arose, but this is solved with the inclusion of a provisional cooling system in the feeding tanks. The operating conditions were defined with ideal solutions and tests were carried out with real solutions. The solutions were desalted and characterized in terms of ash, monovalent ions, proteins, lactate, lactose and lactic acid. The results showed a 92.1% reduction in the NaCl concentration in ideal solutions and a 65% decrease in the permeate flux from cycle I to cycle 3. Through the implementation of the electrodialysis pilot, it was possible to desalinate solutions such as whey, cottage cheese hydrolysates and fermentation broths, indicating that electrodialysis can be an effective technique for the recovery of components and desalination of solutions in the dairy industry.

---

\*Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director Carlos Jesús Muvdi Nova

## Introducción

Uno de los procesos que involucra membranas con el fin de separar y purificar soluciones acuosas es la llamada electrodiálisis. Esta tecnología es importante en el desarrollo y optimización de procesos industriales para el tratamiento de efluentes (Solis et al. , 2017). Por lo anterior, se propuso implementar un equipo de electrodiálisis a escala piloto para la recuperación de componentes del lactosuero. Este subproducto de la industria láctea es considerado, en la mayoría de casos, como residuo y al no ser tratado adecuadamente pierde valor comercial y termina siendo un agente contaminante.

A raíz de esta problemática se están investigando estrategias de valorización a través del proyecto dirigido por los grupos CICTA-UIS y GIQTA-UPTC; titulado: “Diseño de un proceso de producción y recuperación de lactato obtenido de la fermentación láctica de lactosuero procesado a escala piloto laboratorio” en el marco de la Convocatoria 852 de Minciencias Conectando Conocimiento. Con la implementación de este proyecto, se buscó principalmente establecer un esquema de transformación para el lactosuero en la producción de ácidos orgánicos y sus sales, como lo son, el ácido láctico y el lactato, que tiene una alta demanda en el mercado. Es así como un grupo de estudiantes UIS del programa de Ingeniería Química diseñaron previamente una unidad de electrodiálisis (Peña y Roa, 2022). Para ello, se consideró el uso de componentes de la industria colombiana (a excepción del módulo membranario); esto con el fin de reducir costos y aprovechar las capacidades de la región, favoreciendo el conocimiento y la infraestructura en procesos de escalamiento en esta tecnología.

Con la construcción y puesta en marcha de este equipo será posible brindarle a la región una herramienta con la cual pueda profundizar en la investigación de esta operación de

separación por membranas, y, dar así respuesta a la siguiente pregunta: ¿Qué condiciones deben cumplirse para construir e implementar un equipo de electrodiálisis a escala de laboratorio con insumos colombianos y capacidades locales, que permita procesar soluciones salinas como el lactosuero y algunos de sus derivados?

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo general**

Implementar un equipo a escala piloto de electrodiálisis en la Universidad Industrial de Santander para la desalinización del lactosuero y algunos de sus derivados.

### **1.2. Objetivos específicos**

Construir la unidad de electrodiálisis de acuerdo a los lineamientos establecidos en el proyecto titulado: “Diseño de un sistema de electrodiálisis a escala piloto laboratorio para el desalado de soluciones”.

Establecer las condiciones de operación que permitan la implementación del piloto para el tratamiento de soluciones salinas como el lactosuero y algunos de sus derivados.

Ajustar los manuales de operación propuestos en la fase del diseño del piloto de electrodiálisis, donde se especifiquen las características del equipo, así como el correcto manejo y control del mismo.

## 2. Marco teórico

La electrodiálisis se ha convertido en un proceso industrial con un impacto técnico y comercial significativo para la desalinización de soluciones electrolíticas. Éste es un proceso de separación electroquímica que involucra membranas para la transferencia de iones. Esta transferencia se da desde disoluciones de menor a mayor concentración por medio de un potencial eléctrico inducido (Strathmann, 2004).

El componente clave para llevar a cabo procesos de desalinización por electrodiálisis son las membranas de intercambio iónico. Estos procesos de separación por membranas son útiles en diversas aplicaciones industriales, principalmente, en la desalinización del agua de mar y en el tratamiento de efluentes. Pues, algunos efluentes suponen impactos no solo ambientales sino económicos por el no aprovechamiento de los mismos (Tongwen, 2005). Para su valorización, es indispensable separar varios de sus componentes, y es allí, donde el uso de membranas tiene participación.

Las membranas utilizadas en la electrodiálisis convencional se clasifican en dos tipos; en membranas de intercambio catiónico que contienen grupos cargados negativamente unidos a la matriz polimérica. Generalmente, las membranas de intercambio catiónico contienen grupos muy ácidos como  $-\text{SO}_3^-$ ,  $-\text{COO}^-$ , etc., permitiendo así la migración de los cationes hacia el cátodo e impidiendo el paso de iones cargados positivamente. Por otro lado, se involucran membranas de intercambio aniónico que cumplen la función de ceder el paso de iones cargados positivamente y rechazar los iones negativos. Estas membranas habitualmente contienen grupos básicos como el amonio, amonio cuaternario, etc., fijados a la columna vertebral de la membrana para permitir la liberación de iones negativos (Moura et al. , 2014). De acuerdo con lo mencionado por los autores Moura et al. (2014), los grupos iónicos más influyentes en la

comercialización de membranas de intercambio iónico son el grupo del ácido sulfónico para membranas catiónicas y el grupo cuaternario de amonio para membranas aniónicas; la selección de estos iones se debe principalmente a que se disocian completamente en todo el rango de pH, teniendo así, efectos significativos en la selectividad y resistencia eléctrica de la membrana misma.

Los módulos de electrodiálisis también se componen por espaciadores y electrodos, los cuales posibilitan su funcionamiento. Los primeros son separadores de plástico hechos generalmente de polipropileno o polietileno de baja densidad; éstos se ubican alternamente entre las membranas para crear trayectorias de flujos de diluido y concentrado. Mientras que los electrodos son componentes metálicos ubicados en cada extremo de la unidad de membrana para conducir corriente continua al sistema. Generalmente, se hacen de titanio y chapados en platino para prolongar su vida útil debido a que presentan problemas severos de corrosión (Moura et al. , 2014).

Para el presente trabajo de grado, la solución a desalinizar en el equipo de electrodiálisis fue el lactosuero y algunos de sus derivados. De acuerdo a la industria quesera, el 90% de la leche utilizada para tal fin, es eliminada como lactosuero, llevando consigo una buena cantidad de lactosa, proteínas solubles, lípidos y sales minerales (Aider et al. 2009). Además, debido a que contiene una demanda biológica de oxígeno que varía entre 30 y 45 kg/m<sup>3</sup>, no se puede descargar directamente como agua residual y su contenido de sal es considerable, alrededor del 10% de los sólidos del suero consisten en sales (principalmente KCl).

Entre los derivados, se tienen los caldos de fermentación que son mayormente cultivados para la producción de ácido láctico por vía biotecnológica, utilizando cepas homofermentativas de *Lactobacillus delbrueckii ssp. bulgaricus*, y *Lactobacillus casei*. (Ghasemi et al. , 2009). Por otra parte, se tienen los hidrolizados de requesón que poseen

proteínas como la lactoglobulina y la lactoalbúmina, que son de gran valor biológico e incluso de mayor calidad nutricional que las de otros lácteos como la caseína.

### 3. Estado del arte

En Colombia, la electrodiálisis no ha sido lo suficientemente aplicada a procesos industriales, de hecho, el enfoque ha sido para estudios a escala piloto; un claro ejemplo, es la propuesta realizada por Miño (2005) en la Universidad de los Andes, Bogotá; en donde el uso de este método se orienta hacia la recuperación de metales pesados en la industria galvánica. Para este proceso, se empleó una unidad de electrodiálisis con membranas iónicas suministradas por *Amerida, Division of Eurodia Industrie* de tipo *NEOSEPTA CM-1* y *AM-1* para membranas catiónicas y membranas aniónicas, respectivamente. Según Miño (2005), del proceso se obtuvo un porcentaje de remoción de Níquel del 50% para la primera hora y después de 5 h se alcanza un máximo de remoción del 99%; pasada estas horas, su tasa tiende a disminuir paulatinamente (Miño, 2005). En este caso, se evidencia que se pueden separar especies iónicas como el  $Ni^{2+}$ , a través de membranas de intercambio iónico para aplicación en aguas residuales.

En otro estudio realizado en las islas de Gran Canaria al suroeste de España, se planteó el diseño de un equipo de electrodiálisis con membranas permselectivas de transferencia iónica para el tratamiento de aguas salobres. En el estudio fue utilizada una pila de 4 etapas y se obtuvo una tasa de remoción del 50% de sales por etapa. Para dicho estudio, se implementaron membranas catiónicas *AZL 183* y aniónicas *BZL 183* de la marca *Ionics Inc*; cada una con un espesor de 0,06 cm (Sadhvani, 2009).



Ahora bien, estudios de electrodiálisis aplicados al lactosuero y algunos de sus derivados como material a desalar son pocos, es por ello, que la Universidad Industrial de Santander, junto con del grupo CICTA, han desarrollado avances en el diseño de un piloto para el tratamiento de este residuo (Peña y Roa, 2022). El diseño propone la implementación de un módulo membranario modelo *EDM-Z/4x10-0.8\_19* producido por la empresa *MemBrain Ltd.* Este módulo cuenta con membranas de intercambio aniónico y catiónico heterogéneo de tipo *EDR-Z RALEX* con un espesor de 0,653 mm para CM y 0,614 mm para AM. Además, la unidad de electrodiálisis consta de 6 circuitos independientes; estos son destinados para los flujos de lavado de electrodos, de diluido y de concentrado.

Finalmente, con la implementación del piloto de electrodiálisis se dará continuidad al estudio de separación por membranas para el desarrollo de nuevas alternativas en el tratamiento de soluciones salinas. Además, con este tipo de tecnologías se promueve en la industria el uso de diversos métodos para el tratamiento de efluentes, pues ésta es una operación de gran aplicabilidad a escala industrial.

## **4. Metodología**

### **4.1. Construcción e implementación del piloto de electrodiálisis.**

Para la primera fase del proyecto se hizo un reconocimiento a cada pieza y accesorio que conforma la unidad de electrodiálisis. Entre ellas, el módulo membranario, tanques de alimentación, bombas, sensores, tuberías, fuente de poder y otras. Para ello, se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos del Trabajo de grado realizado por Peña y Roa (2022), en el que se consideraron aspectos sobre el dimensionamiento de cada pieza, las condiciones de

operación, la propuesta de protocolos de limpieza y mantenimiento, entre otras características del equipo.

Posteriormente, partiendo del diseño conceptual, se enviaron los planos de la estructura a la empresa INAL LTDA que fue la encargada de manufacturar dicho soporte. Así mismo, se verificó la disponibilidad de las piezas y sus componentes para el ensamblaje del equipo en su totalidad. Por lo anterior, fue necesario acompañar a la empresa encargada de suministrar los elementos que se fabricaron localmente o que se importaron, como el módulo de membranas, el cual fue traído de República Checa; y finalmente, verificar que cumplieran con las especificaciones dadas.

Con el total de las piezas y accesorios a disposición, se realizó el montaje de cada componente. Además, se dispuso del acompañamiento y asesoría del personal técnico de la sede UIS Guatiguará, en especial, para las conexiones eléctricas. Con sus recomendaciones y la de los fabricantes, se realizó el ensamblaje y encendido del piloto de electrodiálisis.

Una vez terminada la construcción del piloto se iniciaron algunas pruebas de verificación del funcionamiento del equipo. Para esta última actividad de la fase se requirió ajustar los protocolos generales de operación, limpieza y mantenimiento del piloto, realizados por Peña y Roa (2022). En las primeras pruebas se utilizó agua desmineralizada en todos los circuitos, a temperatura inicial de 25°C y caudal de 25 L/h, con el fin de evaluar posibles fugas y verificar que los instrumentos de medición (rotámetro, manómetro) relacionen sus respectivos parámetros en los rangos teóricamente establecidos. También, de estas primeras pruebas se evaluó el comportamiento de los parámetros y variables de operación (temperatura, presión, caudal) para determinar la necesidad de hacer ajustes.

#### 4.2. Definición de las condiciones de operación con soluciones ideales.

Para establecer las condiciones de operación del piloto, se realizaron pruebas experimentales utilizando soluciones ideales. El propósito de estas pruebas fue establecer a qué condiciones se estudiarán las soluciones reales (lactosuero, hidrolizados de requesón y caldos de fermentación). Inicialmente, se prepararon dos soluciones ideales de agua desmineralizada con un volumen de 4 L por tanque y una concentración de NaCl a 2,5 g/L para el circuito de concentrado y diluido. En cuanto al circuito de lavado se trabajó con una concentración de 71 g/L de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  según información de Peña y Roa (2022). A partir de dichas pruebas, se analizó el funcionamiento del prototipo y la influencia de la concentración sobre el porcentaje de remoción de sales.

Con el objetivo de simular una solución real, se procedió en primera medida a realizar una curva de calibración con sal de grado analítico, para un intervalo de 0 a 6 g/L. Las soluciones de lectura de la curva se prepararon añadiendo a un 1L de agua desmineralizada los gramos de NaCl correspondientes a cada lectura. Con dicha curva se alcanzaron conductividades de aproximadamente 9610 mS/cm, cercana a la del lactosuero. Una conductividad cercana a las soluciones reales, permite realizar un análisis previo del comportamiento de las mismas respecto al cambio en el amperaje y a su vez, a los niveles de desalación o remoción de sales.

Posteriormente, se realizaron pruebas a una concentración de 5,3 g/L para el circuito de concentrado y diluido, simulando la concentración salina del lactosuero. El circuito de lavado se trabajó con la misma concentración de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  de las pruebas preliminares. Para estas pruebas se realizó seguimiento a la temperatura, tomando valores a la salida del módulo de membranas cada 5 min, así como también, se registró el comportamiento del amperaje a 30 V.

Además, se tomaron muestras de solución para cada circuito, con el objetivo de analizar el comportamiento de la conductividad.

Para el final de la fase se cambió nuevamente la proporción de las concentraciones, tomando la siguiente relación de NaCl y agua desmineralizada: 1 g/L para el circuito de concentrado y 7 g/L para el de diluido. El circuito de lavado se mantuvo a una concentración de 71 g/L de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Con el fin de reducir la cantidad de sales en el circuito de dilución, se empleó un desalado por ciclos. En este caso se inicia el nuevo ciclo utilizando la solución a tratar con la que se finalizó el ciclo anterior. En todos los casos, en un tiempo de operación de 30 min. Se debe tener en cuenta que cada vez que se utilice el piloto, es necesario seguir el protocolo de lavado.

#### **4.3. Operación con soluciones reales (lactosuero, hidrolizados de requesón y caldos de fermentación).**

Se decidió empezar las pruebas con soluciones de lactosuero, seguido de los hidrolizados de requesón, y finalmente, los caldos de fermentación debido a la cantidad disponible en el momento de la desalación. En todos los casos, se trabajó a un FCV de 1. Cada solución fue previamente procesada por filtración con membranas para disminuir insolubles y asegurar una turbidez menor a 5 NTU.

En primera medida se realizó el lavado del equipo con agua desmineralizada. Seguidamente, se dispuso de un volumen de 4 L para cada tanque de la siguiente manera: para el circuito de lavado (CL) una concentración de 71 g/L de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  como se había estado empleando en las fases anteriores. Para el circuito de concentrado (CC) 1 g/L de NaCl y para el circuito de dilución (CD) la solución de lactosuero. Las pruebas se realizaron con duplicado,

y cada prueba fue de un solo ciclo, ya que su concentración de sal era baja. Para el análisis y caracterización del lactosuero se tomaron muestras cada 7 min. La caracterización se dio en términos de conductividad, pH y turbidez. También, se registró el comportamiento de la temperatura y corriente eléctrica de la solución. Todas las pruebas finalizan con el respectivo lavado al equipo con agua desmineralizada hasta alcanzar la conductividad inicial del agua utilizada 10 mS/cm.

La siguiente sustancia a desalar fueron los hidrolizados de requesón, los cuales se diluyeron desde un FCV de 6,4 hasta alcanzar un FCV de 1. Las concentraciones en los tanques de los circuitos CC y CL fueron 1 g/L NaCl y 71 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, respectivamente. Antes de iniciar la prueba y al finalizar, se realizó el lavado del equipo con agua desmineralizada para descartar alguna impureza. Para esta solución, al igual que con el lactosuero, se tomaron 5 muestras para caracterizar y registrar sus respectivos valores de conductividad, pH, turbidez, temperatura y corriente eléctrica. Las pruebas se realizaron con duplicado.

La última solución utilizada en el piloto de electrodiálisis fueron los caldos de fermentación. Fue necesario realizar una prueba previa con una solución ideal de NaCl como las realizadas en la Fase 2. Esto, con el fin de evaluar el funcionamiento de las membranas al compararla con pruebas preliminares a estas mismas condiciones de operación. En esta sección se optó por realizar pruebas de tres ciclos de 30 min cada uno, con el fin de desalar la mayor cantidad posible. Se decidió entonces, trabajar a concentraciones de 4 g/L de NaCl en el circuito de concentrado (CC) y los mismos 71 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en el circuito de lavado (CL). Y para el circuito de diluido, inicialmente se trabajó con una concentración de 37,3 g/L. En los siguientes ciclos, se utilizaron los caldos de fermentación desalados en el ciclo inmediatamente anterior; a diferencia de las soluciones de los circuitos CC y CL, que fueron cargados con

solución a la misma concentración del primer ciclo. Para el duplicado, se realizaron 5 ciclos con las mismas características ya descritas. Este cambio en el número de ciclos se realizó debido a que en la primera sección de pruebas no se alcanzó el 50% de desalado de la solución. Para la prueba original y el duplicado se tomaron muestras en los tres circuitos cada 7 min, para un total de 21 muestras a las que se le analizó conductividad, turbidez y pH. Finalmente, se lavó el equipo de acuerdo a los protocolos de limpieza.

Terminado el proceso de desalación de las tres soluciones reales descritas en la Fase 3, una parte de las muestras obtenidas fueron caracterizadas en términos de ceniza, iones monovalentes, proteínas, lactato, lactosa y ácido láctico (en el laboratorio de servicios del grupo CICTA).

## **5. Resultados**

### **5.1. Construcción, implementación y pruebas iniciales para la verificación de ensamblado.**

En la Figura 1 se muestra el piloto de electrodiálisis, el cual está diseñado para que las soluciones a tratar sean impulsadas por las bombas desde los tanques de almacenamiento hacia el módulo membranario.

**Figura 1**

*Piloto de electrodiálisis ensamblado.*



La unidad de electrodiálisis se conforma principalmente por tres tanques de almacenamiento (1) conectados a tres bombas centrífugas (2), las cuales envían las soluciones hacia el módulo membranario, pasando por los rotámetros (3) para medir el flujo y controlarlo por medio de válvulas; a través de los manómetros (4) ubicados en las tuberías se realiza un seguimiento a la presión del sistema. Posteriormente, el fluido ingresa al módulo membranario (5) integrado por tres circuitos independientes. Un circuito de concentrado (CC) por el que circula parte de la solución que irá enriqueciéndose de iones, un circuito de diluido (CD) en el que la solución se irá empobreciendo de iones, y un circuito de lavado (CL) para minimizar la presencia de reacciones en el área de los electrodos (Ochoa et al., 2003). Adicionalmente, la unidad de electrodiálisis cuenta con una fuente de poder (6) conectada al módulo, la cual es la

encargada de suministrar el potencial eléctrico para inducir el flujo de iones a través de las membranas de intercambio iónico. Finalmente, el fluido se recircula desde el módulo hacia los tanques.

Durante la construcción del piloto de electrodiálisis se realizaron algunos ajustes sobre el diseño conceptual, con el fin de facilitar la construcción y manipulación del equipo. Por ello, se realizó un acompañamiento durante este proceso a la empresa Industrias Acuña INAL, seleccionada para la construcción de piezas y soporte general del módulo.

Uno de los ajustes se realizó en la estructura del piloto, puesto que el dimensionamiento en el largo de la misma se disminuyó para que el piloto abarcara estrictamente el espacio disponible en el laboratorio. Además, con dicho acortamiento se reubicó la fuente de poder, mejorando aspectos de seguridad durante la operación del piloto. Otro de los ajustes a nivel estructural fueron los tanques de almacenamiento, aquí se determinó trabajar con tanques plásticos para mayor seguridad, puesto que al usar como material el acero inoxidable, se incrementa el riesgo eléctrico y la posible presencia de corrientes parásitas.

En la Tabla 1 se presentan los inconvenientes que surgieron durante las pruebas de verificación. Para el trabajo es importante presentarlos considerando que estos hallazgos hacen parte de situaciones rutinarias para este tipo de proyectos. Para el caso del piloto, se realizaron 7 pruebas sin conectar el módulo membranario a los rotámetros y 4 pruebas incluyendo el módulo. Las primeras pruebas se realizaron con la finalidad de eliminar la suciedad presente al interior de los conductos (ej. partes de teflón y algunos residuos de pegamento PVC), evaluar conexiones ante posibles fugas de líquido en los 3 circuitos de circulación del piloto laboratorio, y finalmente, realizar seguimiento al comportamiento de la temperatura.



**Tabla 1**

*Inconvenientes presentados en las pruebas de funcionamiento del piloto a las siguientes condiciones de operación:  $T_i=25^{\circ}\text{C}$  y  $Q=25\text{ L/h}$ .*

<b>Problema evidenciado</b>	<b>Solución implementada</b>
Se presentaron fugas en los rotámetros, en algunas uniones tubería - tanque y tubería - bomba.	Para las uniones sencillas se dispuso de teflón (politetrafluoroetileno). Para las uniones tubería-tanque fue necesario emplear un empaque y teflón.
El líquido incrementaba su temperatura en un tiempo de operación muy corto. Esto podría ocasionar un daño permanente en las membranas debido a que soportan temperaturas entre los 10-35 °C. Además, trabajar en periodos muy cortos influye en que el proceso de desalación no sea eficiente.	Se incluyó un sistema de enfriamiento en los tanques, usando un serpentín con manguera reforzada (provisional) en el que circula una mezcla de agua y monoetilenglicol a una temperatura de -5 °C. Adicional a esto, y de manera temporal, después de 5 min de operación se agregan envases con contenido de agua congelada para lograr que el piloto opere hasta los 30 min, sin superar la temperatura límite de operación, siendo éste un rango de tiempo aceptable. Es necesario considerar la inclusión de un serpentín en acero inoxidable en futuras mejoras del prototipo.
Fugas de líquido de los tres circuitos al interior del módulo membranario.	Fue necesario desmontar el módulo y ordenar las membranas una a una para asegurar el paso del líquido a través de ellas. Se sugiere ajustar periódicamente (cada 5 veces que se opere) las tuercas que aseguran el sello del módulo y verificar que las membranas estén alineadas.

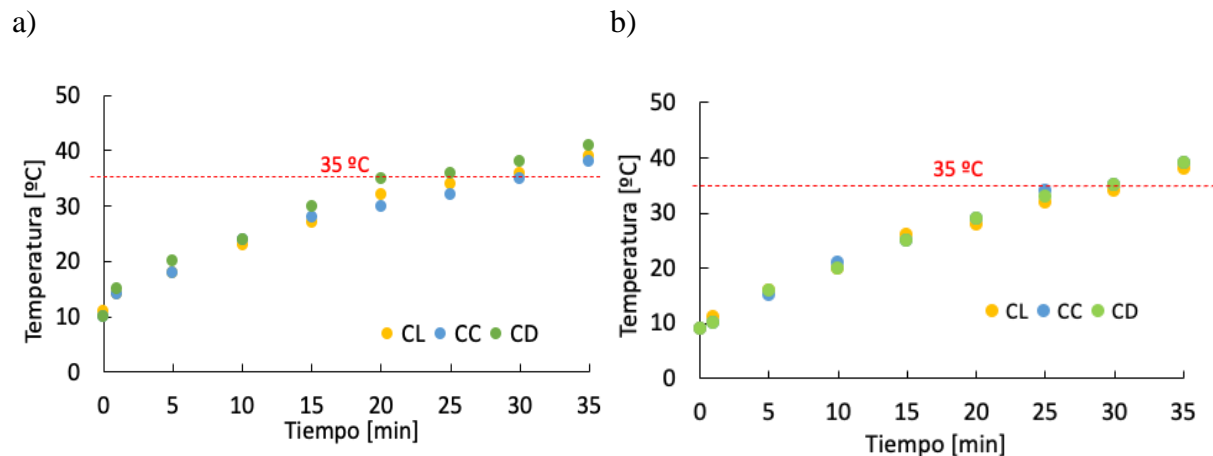
Para la implementación y pruebas de verificación se tuvieron que realizar cálculos y revisar diferentes estrategias de enfriamiento de las soluciones, ya que ésta en tan sólo los primeros 10 min de operación alcanzan los 37°C, superando así la temperatura máxima

permitida para el módulo membranario. Este aumento progresivo de la temperatura se debe a las bombas centrífugas utilizadas en cada circuito y al poco volumen de solución utilizado (4 L para cada circuito).

Por lo mencionado anteriormente, se adecuó un baño refrigerante y un serpentín (en manguera plástica reforzada, de forma temporal) como estrategia para disminuir la velocidad de calentamiento de las soluciones dentro del sistema. Esta adecuación permitió aumentar el tiempo de operación del piloto. Sin embargo, en la Figura 2a se observa que el piloto podría operar hasta un máximo de 20 min, lo que significa que es un tiempo de operación corto. En esta primera propuesta se trabajó con agua como líquido refrigerante, por lo que su temperatura inicial fue de 0°C. Mientras que en la Figura 2b se trabajó con una mezcla de agua y monoetilenglicol como líquido refrigerante, obteniendo como resultado un tiempo de operación de 30 min. Esta estrategia se implementó porque permite trabajar a temperaturas iniciales del baño de -5°C, lográndose iniciar a temperaturas más bajas en los tanques de almacenamiento. Adicionalmente, el tiempo de operación también se prolongó gracias a la implementación del uso de recipientes con agua congelada. Sin embargo, en búsqueda de mayor tiempo de operación en el prototipo y mejores resultados en el proceso de desalación, en futuras mejoras del equipo se recomienda la elaboración de un serpentín en acero inoxidable para el sistema de enfriamiento; y así aumentar la velocidad de transferencia de energía. En este sentido, la estrategia actualmente implementada en el trabajo de grado se considera como una medida transitoria (indicada en la Tabla 1).

**Figura 2**

*Comportamiento de la temperatura sin conectar el módulo vs tiempo, usando agua desmineralizada,  $Q=25$  L/h y a) Baño con agua como refrigerante a  $T_i = 0^\circ\text{C}$ , b) Baño con agua y monoetilenglicol como refrigerante a  $T_i = -5^\circ\text{C}$ .*



*Nota.* (CL) circuito de lavado, (CD) circuito de diluido y (CC) circuito de concentrado.

Finalmente, en esta sección de implementación y en el ámbito local, es importante destacar que sí existen empresas con la capacidad de manufacturar implementos y equipos que complementan la formación y el desarrollo de proyectos en diversas áreas, incluyendo la investigación y desarrollo de productos y procesos. Aunque es cierto que pueden surgir dificultades y desafíos en este proceso, es fundamental reconocer que es posible contar con recursos y soluciones dentro del país.

## 5.2. Desempeño del piloto de electrodiálisis utilizando soluciones ideales.

En la Tabla 2 se muestra el comportamiento de la corriente eléctrica en relación al potencial eléctrico. Como se aprecia en la tabla, el amperaje aumenta a medida que se

incrementa el voltaje, pero sin alcanzar la corriente límite; debido a que esta se encuentra cuando el amperaje no varía con el aumento del voltaje. Teniendo en cuenta lo anterior, se decide trabajar con el máximo de 30V dado por la fuente de poder utilizada, y de acuerdo a las especificaciones del módulo membranario, este permite trabajar en un rango entre 20-30V.

**Tabla 2**

*Corriente eléctrica en función del potencial eléctrico aplicado al módulo membranario para una solución de agua desmineralizada con NaCl a 2,5 g/L en los circuitos CC y CD.*

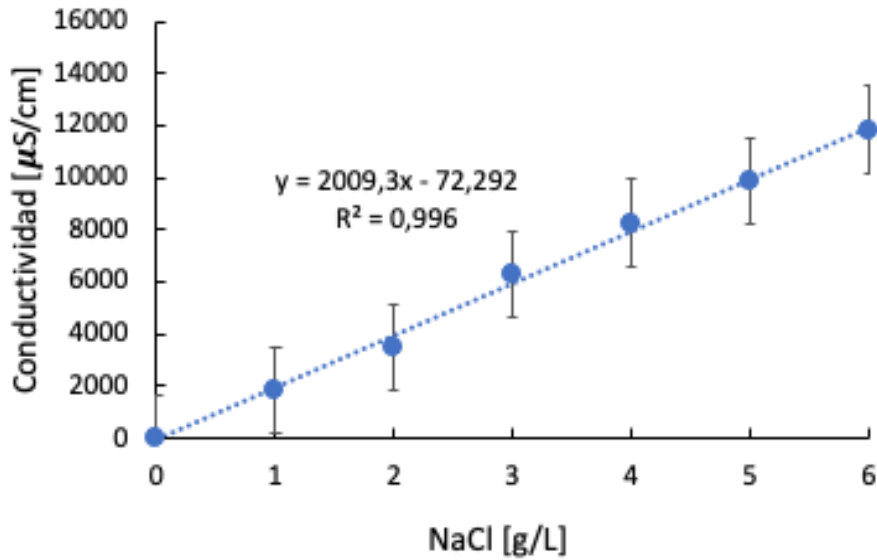
Parámetro	Punto					
	1	2	3	4	5	6
Potencial eléctrico (V)	9	15	19	22	25	29
Corriente eléctrica (A)	0,16	0,26	0,32	0,37	0,42	0,47

Adicionalmente, se decide trabajar en la condición mencionada anteriormente porque, de acuerdo con Zuta et al. (2018), trabajar debajo de las condiciones de corriente límite permite el proceso de eliminación de sales en soluciones acuosas, en ausencia de polarización por concentración (fenómeno que reduce el flux de permeado).

En la Figura 3 se presenta la curva de calibración usada para relacionar la conductividad con la concentración de NaCl. Esta curva muestra una relación lineal en todo el intervalo de interés permitiendo relacionar la conductividad de la solución con la concentración de NaCl.

**Figura 3**

Curva de calibración.

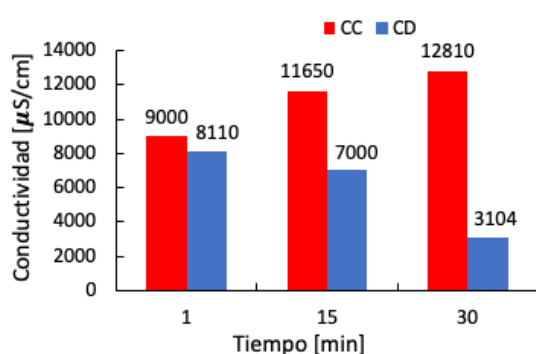


Con la finalidad de analizar el comportamiento durante el proceso y la variación de la conductividad a concentraciones similares a las soluciones reales, se realizaron dos (2) pruebas las cuales están representadas en la Figura 4. Para la primera prueba (Figura 4a) se tomaron concentraciones iniciales cercanas a las soluciones de lactosuero reales; tanto en el circuito de diluido como en el de concentrado; mientras que para la Figura 4b se tomaron concentraciones iniciales diferentes en los dos circuitos.

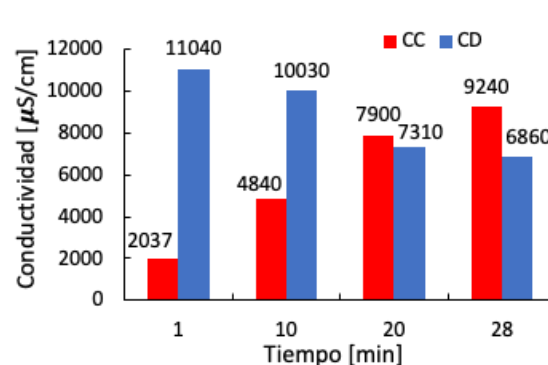
**Figura 4**

*Comportamiento de la conductividad empleando un potencial eléctrico de 30V, caudal de 30 L/h para los circuitos CD y CD y a concentraciones iniciales de 71 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para el circuito CL en ambas gráficas y, a) 5,3g/L de NaCl para los circuitos CC y CD, b) 1g/L para el circuito CC y 7g/L para el circuito CD de NaCl.*

a)



b)



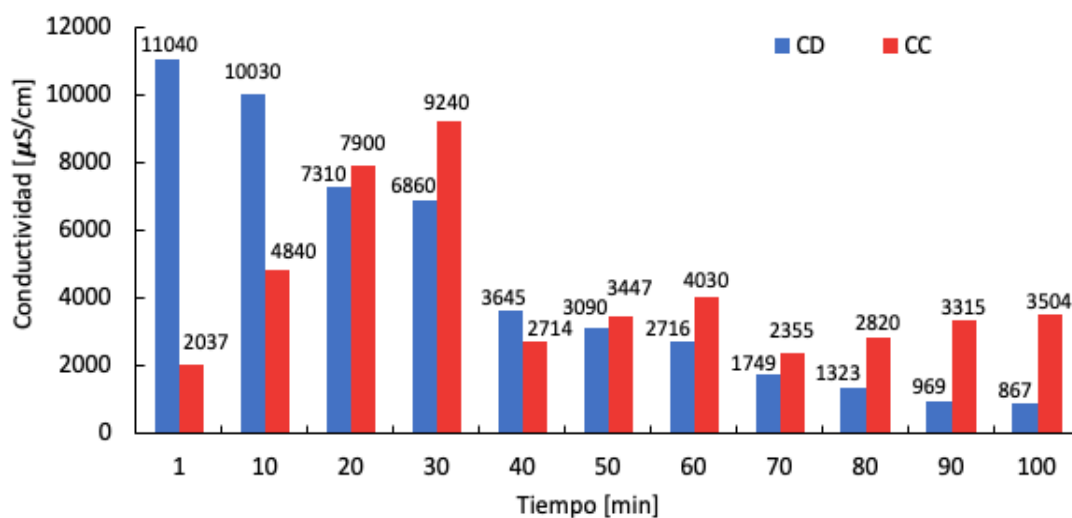
Las dos pruebas presentadas dan como resultado una disminución de iones en el circuito de diluido y un aumento en el circuito de concentrado, evidenciando la transferencia de iones desde el circuito CD hacia el circuito CC. Así mismo, de la Figura 4a y 4b, se percibe que la variación de la conductividad favorece el proceso de electrodiálisis cuando la concentración inicial en el circuito de concentrado es menor a la del circuito de diluido. Pues, como lo explica Shi et al. (2022), el gradiente de concentración que se genera entre estas corrientes es esencial para impulsar el movimiento de los iones de una región de alta a una de baja concentración, permitiendo mayor velocidad de difusión y por consiguiente, un aumento en la transferencia de iones. En ese sentido, la corriente de concentrado en la Figura 4a ganó 1,89 g/L de NaCl, mientras que en la Figura 4b se obtuvo 3,58 g/L de NaCl para el concentrado en un menor tiempo de operación.

Por otra parte, al analizar el comportamiento de la conductividad a través del balance de masa, se obtuvo que para las Figuras 4a y 4b hay una diferencia entre los circuitos de 0,59 y 1,50 g/L, respectivamente. De acuerdo con Gurreri et al. (2020), al trabajar en las condiciones de operación adecuadas, se espera que la cantidad de iones eliminados en el circuito de diluido sea igual a la cantidad de iones agregados en el circuito de concentrado. Sin embargo, en la práctica, puede haber desviaciones en el equilibrio de iones debido a factores como la concentración e impurezas de la solución, la corriente aplicada, las características de la membrana y la toma de muestras para caracterización al retirar parte de solución para cada circuito.

Ahora bien, para lograr reducir aún más la concentración de NaCl presente en el circuito de dilución, una alternativa fue trabajar por ciclos de 30 min (en este caso 3 ciclos); los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5. Es importante mencionar que para cada ciclo se reemplaza la solución del circuito de concentrado por una nueva solución a la misma concentración inicial. El circuito de diluido mantiene la misma solución del ciclo anterior.

**Figura 5**

*Evolución de la conductividad en función del tiempo durante la desalinización por ciclos a concentraciones de 71 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para el circuito CL, 1g/L para el circuito CC al inicio de cada ciclo, y 7 g/L para el circuito CD ciclo 1.*



El comportamiento de los datos muestra que el ciclo 1 (los primeros 30 min) es muy similar al comportamiento de la prueba con solución ideal presentada en la Figura 4b. En esta, al iniciar el ciclo, la conductividad del circuito CC representa el 18,5% de la conductividad del circuito CD (se recuerda que, al comenzar la prueba, la concentración del circuito CD es mayor que la del circuito CC). Para los siguientes ciclos esta proporción varía, ya que uno de los circuitos se concentra mientras el otro se diluye. Se llega a un ciclo 3 donde la conductividad final del circuito CD es el 24,7% de la conductividad del circuito CC.

Ahora, en términos de concentración se logró un mayor porcentaje de desalado, pasando de 11.040 a 867 mS/cm, para un tiempo total de 100 min. De acuerdo a la curva de calibración esta conductividad representa pasar de una concentración de 6,075 a 0,475 g/L de NaCl; es decir, una reducción promedio de 1,6 g/L por ciclo, alcanzando un porcentaje de



reducción total del 92,1% (ciclo 1 - 37,9%, ciclo 2 - 37,5%, ciclo 3 - 16,7%). Para el circuito de concentrado se evidencia que en cada ciclo se aumenta la conductividad, siendo el ciclo 1 (los primeros 30 min) donde mayor concentración de sal se presenta en este circuito, resultado de la sal que se retira del circuito CD.

En la Tabla 3 se presenta el comportamiento del flux de permeado, el cual está dado por el delta de concentración respecto al tiempo y al área efectiva de membrana. Para calcular este parámetro se utilizó la (Ec.1):

$$flux = \left( \frac{\Delta C}{\Delta t} \right) * V \quad (Ec.1)$$

Donde;  $\Delta C$  es la variación de la concentración en g/L,  $\Delta t$  es la variación del tiempo en s,  $A_m$  es el área de transferencia de membrana en  $m^2$  y  $V$  el volumen de solución a tratar en L. En este caso, la constante del área de transferencia es  $0,064 m^2$  y el volumen de solución a tratar es de 4 L.

**Tabla 3**

*Flux de membrana para los ciclos 1, 2 y 3 de la solución ideal presentada en la Figura 5, a concentraciones de 71 g/L de  $Na_2SO_4$  para el circuito CL, 1g/L para el circuito CC al inicio de cada ciclo, y 7 g/L para el circuito CD ciclo 1.*

	CICLO 1				CICLO 2			CICLO 3			
Tiempo [s]	60	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000
Conductividad [μs/cm]	11040	10030	7310	6860	3645	3090	2716	1749	1323	969	867
Concentración [g/L]	6,022	5,646	4,009	3,709	2,096	1,852	1,546	0,927	0,655	0,535	0,475
Delta concentración	-	0,377	1,637	0,299	1,613	0,244	0,307	0,619	0,273	0,120	0,060
Flux [g/m <sup>2</sup> s]	-	0,039	0,170	0,031	0,168	0,025	0,032	0,064	0,028	0,012	0,006
Flux ciclo [g/m <sup>2</sup> s]	0,080				0,075			0,028			

Al realizar los cálculos y presentar los resultados en la Tabla 3, se observa que la sustancia difundida se desplaza de una región de alta concentración a una de menor concentración a medida que pasa el tiempo. Se puede notar que, del ciclo 1 al ciclo 3, el flux de permeado disminuye un 65% debido a la disminución de la velocidad de difusión de las moléculas a través de las membranas.

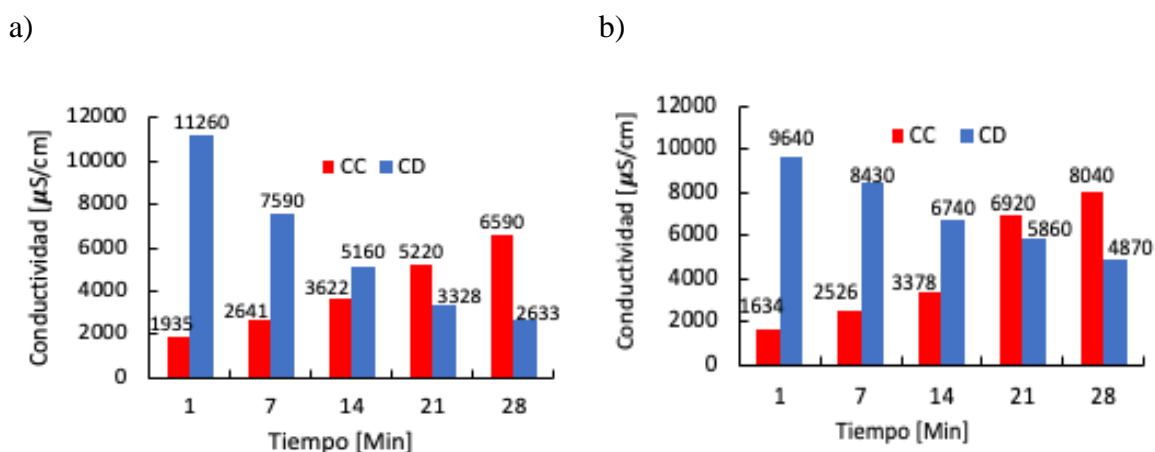
Tras la finalización de las pruebas con la solución ideal, se obtuvieron resultados alentadores que sentaron las bases para continuar con el procesamiento de las soluciones reales. Estos logros positivos fueron el resultado de mejoras y ajustes en las condiciones de operación del piloto de electrodiálisis como se ha evidenciado anteriormente. Dichas mejoras y ajustes en los parámetros de operación garantizan mayores beneficios en el tratamiento de las soluciones, permitiendo un buen volumen de procesamiento y una mayor capacidad de desalado gracias al aumento en el voltaje aplicado. Pues, se realizaron ajustes específicos en función de consideraciones experimentales como la capacidad máxima de voltaje de 15 V a 30 V, el aumento en el flujo en los circuitos, pasando de 25 L/h a 30 L/h para el circuito CC y CD y el cambio en las concentraciones iniciales de los circuitos.

### **5.3. Desempeño del piloto de electrodiálisis utilizando soluciones reales.**

En la Figura 6 se presenta el comportamiento de la solución de lactosuero, que consiste en la prueba original (Figura 6a) y su duplicado (Figura 6b). Esta prueba, realizada a partir de las condiciones experimentales previamente descritas, logró reducir su conductividad en el circuito CD, lo que indica que hubo transferencia de iones durante el proceso, tal como sucedió con las soluciones ideales.

**Figura 6**

*Desalinización del lactosuero a concentraciones de 71 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para el circuito CL y 1g/L para el circuito CC. a) Original, b) Duplicado.*



En las pruebas de la Figura 6 se logró una reducción de la concentración en sales de  $3,3 \pm 0,96$  g/L, indicando que el lactosuero con un FCV de 1 se desala en promedio en un  $63 \pm 14\%$  en un tiempo de operación de 28 min. Es importante considerar que la diferencia en el porcentaje de reducción entre ambas pruebas puede estar influenciada por factores como la estabilización del sistema en los primeros minutos de operación. Autores como Mulder (1996), mencionan que durante el proceso de separación puede haber una etapa de adaptación del sistema debido a la presencia de burbujas de aire al interior del módulo membranario; esto hace que la corriente eléctrica no se distribuya uniformemente en la superficie de la membrana. En este sentido, y en relación a la evolución de la corriente eléctrica en función del voltaje aplicado, se infiere que se presentó un periodo transitorio donde la corriente inicia a un menor valor, luego aumenta hasta que el sistema logra adecuarse a las condiciones empleadas, para entonces, comenzar a disminuir debido al intercambio de sales entre los circuitos. En la prueba

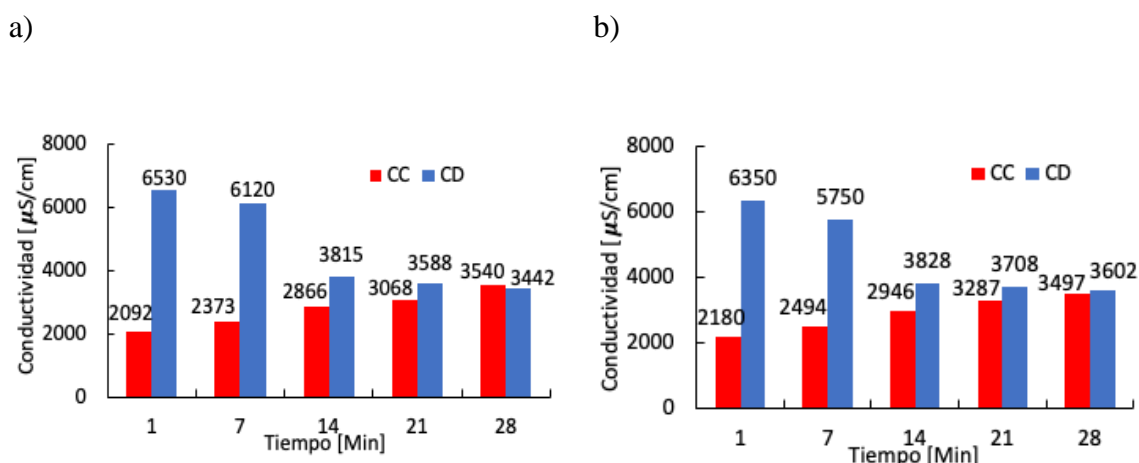
reportada en la Figura 6b (duplicado), el proceso tardó 22 min en alcanzar la corriente más alta (0,59 A) para luego comenzar a descender; mientras que la prueba original (Figura 6a) necesitó solamente 9 min para llegar a su corriente más alta (0,57 A) antes de comenzar a disminuir.

Por otra parte, al comparar la concentración de sales del lactosuero con la solución ideal representada en la Figura 4b, se evidenció una reducción del 38% en la solución ideal, lo que indica una mayor transferencia de iones en la prueba con lactosuero. Este resultado podría explicarse por la presencia de iones adicionales en la solución real. Según lo reportado por Callejas et al. (2012), el lactosuero no solo contiene iones como el NaCl utilizado en el solución ideal, sino también otros iones como el  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$  e iones de fosfato  $PO_4^{3-}$ , entre otros. Además, se infiere que la difusividad de los iones influye directamente en su transferencia, puesto que a mayor difusividad del ion, mayor es la velocidad de migración. Con relación a lo anterior, y lo mencionado por Sirivedhin (2004), los iones monovalentes como el  $Na^+$  y  $K^+$  presentes en el lactosuero se difunden a mayor velocidad comparado con los iones  $Cl^-$ . Por lo tanto, es importante tener en cuenta que la transferencia de sales en la electrodiálisis mejora con la presencia de otros iones y las propiedades de la membrana de intercambio iónico utilizada.

La Figura 7 presenta el desalado de la solución de hidrolizados de requesón, junto con su respectivo duplicado. Esta sección de pruebas inició con una concentración baja comparada con las demás soluciones. Esto se debe a que el proceso de hidrólisis del requesón se realizó con agua desmineralizada, haciendo que los compuestos solubles que contenga el requesón se diluyan en la solución; por lo que el contenido de sales disminuye, y con ello la conductividad inicial de la solución.

**Figura 7**

*Desalinización de hidrolizados de requesón a concentraciones de 71 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para el circuito CL y 1g/L para el circuito CC. a) Original, b) Duplicado.*



De esta figura se observa que después de un tiempo de prueba de 28 min, se logró una reducción en la conductividad en el circuito CD. Se registró una disminución de sales de  $1,45 \pm 0,08$  g/L, equivalente a un porcentaje de reducción del  $45 \pm 2\%$ ; en este caso las dos pruebas realizadas mostraron un comportamiento similar;. Sin embargo, aunque se ha observado una reducción en la concentración de iones, el porcentaje de desalación no supera el 50% en ninguno de los casos. Esta limitación puede atribuirse a la concentración inicial de las soluciones en el circuito de diluido. Puesto que, al comparar los hidrolizados de requesón con la solución de lactosuero, se evidencia que este último presenta un mayor porcentaje de desalado. Esto se debe a que el lactosuero contiene mayor cantidad de sales, generando un delta de concentración mayor que favorece la transferencia de iones en el proceso de electrodiálisis. Como lo explica Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP, 2020) la presencia de una mayor cantidad de iones disueltos hace que la conductividad aumente, y si la presencia de

estos iones se encuentran en una concentración adecuada, pueden mejorar la remoción de los iones y aumentar la velocidad de migración.

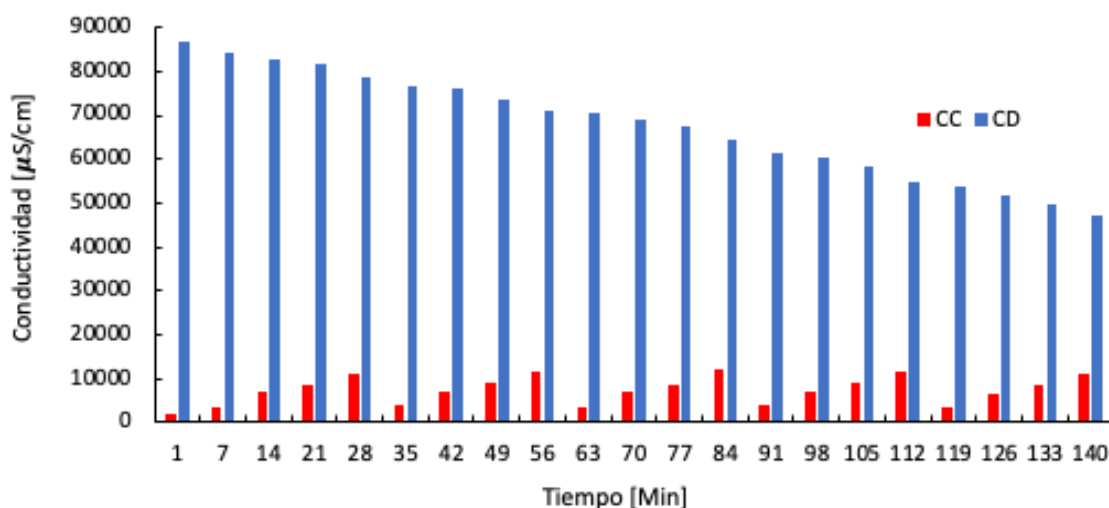
Por otra parte, se infiere que la adsorción de péptidos en las membranas de intercambio iónico también pudo haber afectado el intercambio de iones. Según Persico et al. (2016), una alta concentración de péptidos en los hidrolizados de proteína afecta la interacción de los iones con la membrana, debido al ensuciamiento. Así mismo, estos autores mencionan que la formación de incrustaciones o ensuciamiento en la membrana está relacionada con la carga de aminoácidos que depende del pH, es decir, un pH alto afecta la interacción de los iones. En esta medida, y en comparación con soluciones como el lactosuero (Figura 6), se encontró que ésta solución tiene un pH de aproximadamente 4,4, y los hidrolizados de requesón tienen un pH más alto, de alrededor de 8,6. Por lo tanto, se sugiere un análisis del efecto del pH de las soluciones en el comportamiento del proceso de desalación por electrodiálisis.

En relación a la corriente eléctrica, se evidencia una disminución de  $0,11 \pm 0,01$  A, con respecto al valor inicial de  $0,31 \pm 0,01$  A. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el tiempo de operación de la prueba fue de 28 min, lo que puede considerarse bajo para un proceso de electrodiálisis. Por lo tanto, se sugiere mejorar el diseño del piloto para aumentar el tiempo de operación y con ello remover la mayor cantidad de sales posible.

En la Figura 8 se observa el comportamiento del desalado de los caldos de fermentación realizado en 5 ciclos de 28 min cada uno.

**Figura 8**

*Desalinización por ciclos de caldos de fermentación a concentraciones de 71 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para el circuito CL y 4 g/L para el circuito CC.*



Debido a la alta concentración de la solución a tratar (conductividad de 86.700 mS/cm), se opta por trabajar con 4 g/L en el circuito de concentrado. Por el mismo motivo, se decide trabajar con pruebas por ciclos, con el fin de desalar la mayor cantidad posible de solución y revisar el comportamiento de la solución problema en el tiempo. De los 5 ciclos en total, los caldos de fermentación clarificados pasan de 43,2 g/L a 23,5 g/L equivalentes de NaCl. Entonces, el circuito de dilución disminuyó su concentración de sal en 19,7 g/L con un porcentaje de reducción total del 45,6% (ciclo 1 - 9,5%, ciclo 2 - 8,8%, ciclo 3 - 7,4%, ciclo 4 - 10,9%, ciclo 5 - 9,1%). Hay que mencionar que, a pesar de un porcentaje de remoción por ciclo bajo, las cantidades que en estos se desalan son mayores a comparación de la solución de lactosuero y de los hidrolizados de requesón. El comportamiento de la transferencia de iones en esta solución evidencia que el piloto de electrodiálisis alcanza los resultados deseados al trabajar con soluciones que contienen grandes cantidades de sales. Sin embargo, estas

sustancias al ser tratadas en módulos membranarios como el usado en este proyecto, requieren mayor tiempo de tratamiento para lograr un mejor porcentaje de reducción en su concentración.

En pruebas realizadas por Machado et al. (2007) en el proyecto *Lactic acid separation from fermented whey using electrodialysis*, presenta una desalación para caldos de fermentación con algunas variaciones en las condiciones de operación como, por ejemplo: membranas Asahi Glass Co, 20 celdas y un área efectiva de 0,021 m<sup>2</sup>. En ella se trabaja con los mismos tres circuitos alimentados por bombas Iwaki Pumps, un voltaje máximo de 35 V y corriente eléctrica máxima de 10 A. Estas pruebas presentaron un porcentaje de desalado cercano al 90% para una concentración inicial de 20,3±0,04 g/L (50 días de fermentación) en el circuito de CD. Al comparar las pruebas de Machado con los caldos de fermentación utilizados en el presente trabajo, cuyo porcentaje de remoción de sales fue del 46%, se evidencia que: el área efectiva de las membranas de Machado eran 3 veces mayor que las membranas de la solución problema, y aun así, se desalo la mitad de esta concentración. Además, otra diferencia entre ambas soluciones está dada por el tipo de sustrato fermentado y el volumen empleado del mismo. Esto, ya que en las pruebas de Machado emplearon flujos superiores a 50 L/h, mientras que, en las pruebas realizadas para el presente trabajo, se emplearon flujos inferiores a 40 L/h.

Finalmente, con el objetivo de comprender los efectos del proceso de electrodiálisis en la composición fisicoquímica de las soluciones reales, se realizó la caracterización de las muestras; y los resultados se presentan en la Tabla 4.



**Tabla 4**

*Resultados de la caracterización de las soluciones reales en el circuito CD. a) lactosuero, b) hidrolizados de requesón, c) caldos de fermentación. Las soluciones se trabajaron a concentraciones iniciales de 71 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para el circuito CL. 1g/L para el circuito CC en el lactosuero e hidrolizados; y los caldos de fermentación a concentración de 4 g/L para el circuito CC.*

a)

Parámetros	Punto			Unidad
	Inicial	Medio	Final	
Ceniza	0,43	--	0,13	g/100 g muestra (%)
Lactosa	3,43	--	2,75	g/100 g muestra (%)
Lactato	N.D	N.D	N.D	g/100 g muestra (%)
Ácido láctico	0,47 <sup>+</sup>	0,32 <sup>+</sup>	0,22 <sup>+</sup>	g/100 g muestra (%)
Sodio	40,82	31,35	17,37	mg/100 g muestra
Calcio	40,71	26,1	13,91	mg/100 g muestra
Magnesio	7,41	4,87	2,85	mg/100 g muestra
Potasio	137,69	81,47	32,26	mg/100 g muestra

b)

Parámetros	Punto			Unidad
	Inicial	Medio	Final	
Proteína	1,37	--	1,37	g/100 g muestra (%)
Ceniza	0,27	--	0,2	g/100 g muestra (%)
Sodio	132,21	103,18	112,1	mg/100 g muestra
Calcio	1,01	2,57	1,12	mg/100 g muestra
Magnesio	0,26	0,28	0,28	mg/100 g muestra
Potasio	15,18	13,51	15,29	mg/100 g muestra

c)

Parámetros	Ciclo 1		Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Unidad
Ceniza	4,71	3,88	3,45	3,44	3,19	2,65	g/100 g muestra (%)
Lactato	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	g/100 g muestra (%)
Ácido láctico	8,71	7,36	6,41	6,57	5,88	5,01	g/100 g muestra (%)
Sodio	1545	1563,58	1352,77	1367,4	1089,54	777,95	mg/100 g muestra
Calcio	26,81	28,13	27,11	28,62	31,02	29,42	mg/100 g muestra
Magnesio	12,45	13,06	10,52	12,87	14,8	14,73	mg/100 g muestra
Potasio	237	230,17	339,97	158,36	154,41	109,63	mg/100 g muestra

*Nota.* Valor < LOQ; N.D= No detectado.

El análisis realizado para el lactosuero (Tabla 4a), muestra una disminución en la concentración de sales individuales en comparación a la muestra de solución sin tratar (punto inicial). Además, para esta solución se encontró una reducción en la concentración de lactosa y ácido láctico, lo que indica una posible separación de estos componentes (pérdida) durante el proceso de electrodiálisis. La pérdida o separación de componentes como la lactosa o el ácido láctico en procesos de electrodiálisis puede atribuirse a factores como la difusión a través de las membranas, la selectividad de las mismas y la interacción química entre los componentes y las membranas. Gurreri (2020) explica que las membranas desempeñan un papel importante al permitir o restringir el paso de iones y moléculas a través de ellas. Este intercambio de una corriente a otra depende de la composición química de las membranas y su estructura, quienes pueden permitir el paso de moléculas pequeñas y cargadas. Por lo anterior, se infiere que la pérdida de lactosa y ácido láctico está relacionada tanto con la selectividad como con el tamaño y la carga del ion. Otro aspecto a tener en cuenta y al que se puede atribuir la pérdida del ácido láctico es a la interacción con las membranas, pues este compuesto puede ser absorbido o adherido a la superficie de éstas; debido a la interacción química entre el ácido láctico y los materiales de la membrana, lo que resulta en una disminución de la concentración de ácido láctico en la solución diluida.

En relación a los hidrolizados de requesón (Tabla 4b), los resultados obtenidos en términos de proteínas, iones monovalentes y cenizas revelaron ciertas características. En primer lugar, se observó que no se produjo transferencia de proteínas desde el circuito de desalación (CD) hacia el circuito de concentración (CC) durante el proceso de electrodiálisis. En cuanto a los iones monovalentes, como el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ , no se observó una tendencia clara en sus concentraciones a lo largo del proceso. Por lo que, para futuras pruebas se recomienda tomar un mayor número de muestras que permitan un análisis más detallado del comportamiento de estos componentes. Esta práctica mejorará la comprensión del comportamiento de los iones monovalentes en las soluciones durante el proceso de electrodiálisis.

En cuanto a los caldos de fermentación, la solución con mayor presencia de sales según su conductividad, presenta una reducción en cenizas y ácido láctico de aproximadamente 44 % y 42%, respectivamente. La pérdida de ácido láctico en esta solución al igual que como se explica para los lactosueros, se puede relacionar con la difusión del componente a través de las membranas hacia el circuito contrario, la selectividad membranaria y con la interacción química entre el compuesto y los materiales de la membrana. Por otra parte, iones monovalentes, como el  $\text{Na}^+$  uno de los principales a analizar, presenta una reducción del 50%, entre tanto, otros iones como el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  aumentaron su concentración en 0,1%. Lo que significa que se debe seguir estudiando y profundizando en procesos de electrodiálisis con la finalidad de buscar factores que mejoren los porcentajes de desalación. Algunos factores a tener en cuenta, como la duración y la frecuencia de las pruebas, ya que un mayor tiempo de operación puede permitir una mayor remoción de iones y, en consecuencia, un mejor desalado de la solución. Así mismo, es importante controlar y ajustar adecuadamente los parámetros de operación, como el voltaje aplicado y el flujo de solución, para garantizar una transferencia óptima de iones y maximizar la eliminación de sales. Además, realizar un monitoreo regular y

análisis detallados de los iones presentes en la solución tratada permitirá identificar posibles mejoras en el proceso y ajustar las condiciones de operación en función de los resultados obtenidos.

Por último y en base a los resultados presentados en esta fase, se resalta que el piloto de electrodiálisis ha demostrado un buen desempeño en el procesamiento de soluciones reales, cumpliendo su función de desalado y remoción de iones; estableciéndose como una herramienta funcional y prometedora. Sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente aún existen retos y áreas de mejora que se pueden abordar en futuras investigaciones. Por ello, es fundamental seguir explorando nuevas oportunidades de mejora y optimización para impulsar su eficacia y aplicabilidad en futuros proyectos y aplicaciones industriales.

## 6. Conclusiones

- Se logró implementar un piloto de electrodiálisis en los laboratorios del grupo CICTA-UIS en el Parque Tecnológico de Guatiguará, de acuerdo a los lineamientos conceptuales y de diseño establecidos en el proyecto titulado: “Diseño de un sistema de electrodiálisis a escala piloto laboratorio para el desalado de soluciones” por Peña y Roa (2022). El piloto es un equipo funcional en el cual se utiliza para su implementación materiales y recursos humanos disponibles en la región. El piloto, con un costo aproximado de 32 millones de pesos, tiene una capacidad de procesamiento de 4 L, lo cual es notable en comparación con la alternativa de adquirir un equipo del extranjero, que habría costado alrededor de 120 millones de pesos por una capacidad de procesamiento de tan sólo 500 mL.
- Se analizaron las condiciones de operación para la implementación del piloto y se establecieron: caudales de 30 L/h para los circuitos CD y CC y 40 L/h para el circuito CL; una

temperatura menor de operación de 35°C; Turbidez no mayor a 5 NTU. Esto, para el tratamiento de soluciones salinas como el lactosuero, hidrolizados de requesón y caldos de fermentación. El piloto opera a un volumen máximo de 4 L para cada circuito (circuito de concentrado, circuito de diluido y circuito de lavado).

- Se realizó un ajuste en el manual de operación del piloto de electrodiálisis, incorporando protocolos actualizados para el apagado, encendido y lavado. Estos protocolos detallan la características del equipo, así como las pautas para su correcto manejo y control. Estas mejoras se basaron en el trabajo de diseño conceptual realizado por Peña y Roa (2022). Las modificaciones permitieron el ajuste a las condiciones reales de operación, mejorando los resultados obtenidos durante el proceso. Sin embargo, como ya se ha mencionado en la ejecución de este proyecto es importante seguir estudiando y evaluando diferentes posibilidades de mejora.

- Esta iniciativa muestra las ventajas de la manufactura y uso de la industria local, ya que no solo minimiza costos, sino que también fomenta el crecimiento y la consolidación de conocimientos en el ámbito de la electrodiálisis. Igualmente, muestra la viabilidad económica y técnica de construir equipos locales que satisfagan las necesidades de investigación y desarrollo. La implementación de este piloto resalta la importancia de promover y fortalecer la industria local, que puede satisfacer las necesidades tecnológicas a un costo accesible. Por tanto, es importante continuar apoyando y reforzando estas áreas, fomentando la colaboración entre empresas, instituciones académicas y entidades gubernamentales, con el objetivo de promover la innovación y el crecimiento de la industria local.

## 7. Recomendaciones

- Se recomienda adaptar al piloto de electrodiálisis un sistema de intercambiador de calor en serpentín, de material preferiblemente en acero inoxidable, teniendo en cuenta que se trabaja con soluciones salinas. Esto permitirá mayor transferencia de calor entre la solución de refrigeración, con las de los tanques (soluciones de los circuitos de diluido, concentrado y lavado). Y así, tener un tiempo de operación mayor a 30 min.
- Se sugiere realizar un análisis detallado de cómo varía el pH de la solución y su efecto en la transferencia de iones durante el proceso de electrodiálisis. Esto puede involucrar el estudio de diferentes valores de pH y su impacto en la conductividad, la difusividad y la selectividad de los componentes. Además, es importante investigar cómo el pH puede influir en el ensuciamiento de las membranas, ya que esto puede afectar la eficiencia y vida útil del módulo.
- Se recomienda llevar a cabo un mayor muestreo durante la operación del equipo en el procesamiento de soluciones reales como el lactosuero, hidrolizados de requesón y caldos de fermentación. Esto implica tomar muestras en momentos adicionales, no limitándose únicamente a las pruebas de inicio y fin. Este enfoque permite una mejor caracterización de las soluciones y un análisis más detallado de su comportamiento en cuanto a remoción de lactato, iones monovalentes, proteínas, cenizas y otros componentes relevantes a lo largo del proceso de electrodiálisis. Esta práctica proporciona una visión más completa de la tendencia y evolución de las soluciones, permitiendo una evaluación más precisa de su desalado y composición final.

**Referencias bibliográficas**

- A. Moura Bernardes et al. (eds.). (2014) *Electrodialysis and Water Reuse*, 1 Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-40249-4\_1.
- Aider, M.; Halleux, D. and Melnikova, I. (2009). *Skim acidic milk whey cryoconcentration and assessment of its functional properties: Impact of processing conditions*. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 10(3):334-341.
- Benemérita universidad autónoma de puebla (2020) *Folleto Informativo Conductividad Eléctrica/Salinidad*. [https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130sp.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130sp.pdf)
- Callejas Hernández, J., Prieto García, F., Reyes Cruz, V. E., Marmolejo Santillán, Y., & Méndez Marzo, M. A. (2012). Caracterización fisicoquímica de un lactosuero: potencialidad de recuperación de fósforo. *Acta Universitaria*, 22(1), 11-18.
- Foegeding, E. and Luck, P. (2002). *Whey protein products*. New York.
- Ghasemi, M., G. Najafpour, M. Rahimnejad, P. Aeineh, M. Sedighi and B. Hashemiyeh. (2009) *Effect of different media on production of lactic acid from whey by Lactobacillus bulgaricus*. *African Journal of Biotechnology* 8(1): 081-084.
- Gurreri L, Tamburini A, Cipollina A, Micale G. (2020). *Electrodialysis Applications in Wastewater Treatment for Environmental Protection and Resources Recovery: A Systematic Review on Progress and Perspectives*. *Membranes* (Basel). DOI: 10.3390/membranes10070146.

- Jelen, P. (2003). *Whey processing. Utilization and Products*. 2739-2745. In: H. Roginski, J.W. Fuquay and P.F. Fox (eds.). *Encyclopedia of Dairy Sciences*. Academic Press, London, UK.
- Machado, Ana, Gorrochotegui, Leopoldo, & Cárdenas, Antonio. (2007). *Recuperación del ácido láctico de suero lácteo fermentado utilizando la técnica de electrodiálisis*. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 30(1), 56-63. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702007000100007&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702007000100007&lng=es&tlng=es).
- Mulder Marcel. (1996). *Basic Principles of Membrane Technology*, Springer Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1766-8>
- Persico Mathieu, Mikhaylin Sergey, Doyen Alain, Firdaus Loubna, Hammami Riadh, Bazinet Laurent. (2016). *How peptide physicochemical and structural characteristics affect anion-exchange membranes fouling by a tryptic whey protein hydrolysate*, *Journal of Membrane Science*, Volume 520, Pages 914-923, ISSN 0376-7388, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.08.030>.
- Miño Quintero, S. (2005). *Evaluación preliminar del proceso de electrodiálisis como alternativa para la recuperación de metales pesados en la industria galvánica - estudio para Níquel*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Peña, N.; Roa, D.A. (2022). *Diseño de un sistema de electrodiálisis a escala piloto laboratorio para el desalado de soluciones*. Santander, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Sadhwani Sanjana, H. (2009). *Diseño de una planta de electrodiálisis, Tecnología de Membranas*.



- Sirivedhin, T. & McCue, J. & Dallbauman, L.. (2004). Reclaiming Produced Water for Beneficial Use: Salt Removal by Electrodialysis. *Journal of Membrane Science - J MEMBRANE SCI.* 243. 335-343. 10.1016/j.memsci.2004.06.038.
- Shi, J.; Gong, L.; Zhang, T.; Sun, S. (2022). Study of the Seawater Desalination Performance by Electrodialysis. *Membranes.* 12,767. <https://doi.org/10.3390/membranes12080767>
- Solis, C.A.; Velez, C.A. and Ramírez-Navas, J.S. (2017). *Tecnología de membranas: Ultrafiltración.* Entre Ciencia e Ingeniería. Vol.11. p. 26-36. ISSN 1909-8367.
- Strathmann H. (2004). *Chapter 1 - Overview of Ion-Exchange Membrane Processes.* En: *Ion-Exchange membrane separation processes.* Germany: Membrane Science and Technology. Vol. 9. p. 1-22. ISSN 0927-5193.
- Tongwen Xu. (2005). *Ion exchange membranes: State of their development and perspective.* *Journal of Membrane Science.* Vol 263.p. 1-29. ISSN 0376-7388.
- Zuta, Leví, & Pilco, Alex. (2018). Determinación de las propiedades de transporte de iones cobre y níquel en una membrana de intercambio catiónico. *Revista de la Sociedad Química del Perú,* 84(3), 291-302. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2018000300003&lng=es&tlng=es.](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2018000300003&lng=es&tlng=es)