

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Diseño de un sistema de decoloración primaria para mejorar el rendimiento del ciclo de salmuera de la planta cloro-soda mediante simulación

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Juan Andrés Díaz-Granados Pinchevsky

Santiago Daniel Subía García

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2022

# DEDICATORIA

A mi familia, mi novia y mis amigos,  
que me apoyaron incondicionalmente  
durante toda la carrera y estuvieron en las  
buenas y en las malas.

Dedico este trabajo a mi familia,  
porque nunca dejaron de apoyarme durante  
toda la carrera. A mis amigos del primer  
semestre, por todas las risas, reuniones y  
horas de estudio. Finalmente, a todos los  
profesores que conforman la carrera de  
Ingeniería química, por todo el conocimiento  
que pudimos adquirir estos cinco años.

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, amigos y compañeros por acompañarme y apoyarme en este trayecto. También a mis profesores de la carrera, por formarme como profesional y como persona a lo largo de estos 5 años.

Agradezco especialmente a mis padres y abuelos, por su apoyo incondicional y todas las oportunidades que me han dado hasta ahora. Le agradezco a Juan y Fernando por siempre apoyarme durante la carrera, aún en los momentos más difíciles.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (*nombre de los participantes*) y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Juan Andrés Díaz-  
Granados Pinchevsky



Santiago Daniel Subía  
García

# EVALUADORES

---

**MS. Nadia Flores**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**PhD. Christopher Varela**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

La decoloración del anolito en el proceso de producción cloro-soda es una etapa crucial del ciclo de tratamiento de salmuera. El objetivo de este trabajo es mejorar la etapa de decoloración primaria de salmuera para mejorar su aprovechamiento en el proceso, además de evitar la recirculación de salmuera clorada. Se utilizó la herramienta Aspen Plus® para el diseño de una columna empacada que mejoró la remoción de cloro respecto al sistema actual. Al finalizar el proyecto, se obtuvieron las especificaciones para el diseño de la columna empacada con un rendimiento del 85% superior respecto al sistema actual. Se realizaron los respectivos balances de materia para la reducción de la purga de salmuera, además del consumo de metabisulfito de sodio y soda cáustica. Finalmente, se realizó un análisis económico para justificar la inversión que requiere la construcción e implementación del equipo en la planta, el cual es de aproximadamente \$113,000.00. En síntesis, en este proyecto se realiza la simulación del proceso de decoloración de la planta cloro-soda utilizando datos de operación reales y se diseña una columna empacada con mayor eficiencia de decoloración que el proceso actual, con lo cual se consiguen ahorros económicos.

**Palabras Clave:** Decoloración, Simulación, Eficiencia, Anolito, Columna

## **ABSTRACT**

*Anolyte dechlorination in the chlor-alkali production process is a crucial stage in the brine treatment cycle. The objective of this work is to improve the primary brine dechlorination stage to improve its utilization in the process, in addition to avoiding the recirculation of chlorinated brine. The Aspen Plus® tool was used to design a packed column that improved chlorine removal concerning the current system. At the end of the project, specifications were obtained for the design of the packed column with a performance 85% higher than the current system. The respective mass balances were carried out for the reduction of the brine purge, in addition to the consumption of sodium metabisulfite and caustic soda. Finally, an economic analysis was carried out to justify the investment required for the construction and implementation of the equipment in the plant. In summary, this project simulates the dechlorination process of the chlor-alkali plant using real operating data and designs a packed column with higher dechlorination efficiency than the current process, thus achieving economic savings.*

*Keywords: Dechlorination, Simulation, Efficiency, Anolyte, Column*

# ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES .....	5
RESUMEN .....	1
<i>ABSTRACT</i> .....	2
ÍNDICE GENERAL.....	3
ABREVIATURAS .....	6
SIMBOLOGÍA.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	10
CAPÍTULO 1 .....	11
1. Introducción.....	11
1.1 Descripción del problema.....	12
1.2 Justificación del problema.....	13
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo General.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos .....	15
1.4 Marco teórico.....	15
1.4.1 Trasfondo de las plantas cloro-soda en Ecuador .....	15
1.4.2 Descripción del proceso de electrólisis .....	16

1.4.3	Ciclo de salmuera y su importancia .....	19
1.4.4	Declaración primaria.....	22
1.4.5	Contactores gas – líquido.....	25
CAPÍTULO 2 .....		29
2.	Metodología .....	29
2.1	Alternativas para el diseño del sistema de declaración .....	29
2.2	Columna empacada como mejor alternativa de diseño .....	30
2.3	Diseño conceptual y algoritmo de resolución de problemas.....	31
2.4	Datos y análisis de laboratorio.....	32
2.5	Criterios de diseño para la columna empacada .....	35
2.6	Diseño de la columna en el simulador Aspen Plus® .....	37
2.7	Balance de materia .....	44
CAPÍTULO 3 .....		46
3.	Resultados y análisis .....	46
3.1	Análisis estadístico de datos para la validación del modelado .....	46
3.2	Resultados del diseño de la columna en Aspen Plus®.....	50
3.2.1	Validación de resultados: simulación del sistema actual.....	50
3.2.2	Diseño de la columna empacada.....	50
3.3	Efectos de la columna en la declaración secundaria y purga de salmuera...	61
3.4	Estimación de costos de construcción de la columna.....	66

3.5	Análisis de rentabilidad del proyecto .....	69
CAPÍTULO 4 .....		71
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	71
4.1	Importancia del proyecto.....	71
4.2	Conclusiones.....	72
4.3	Aspen Plus® en el diseño de equipos y sus limitaciones .....	73
4.4	Recomendaciones y futuro del proyecto .....	75
BIBLIOGRAFÍA.....		77
5.	Bibliografía .....	77
APÉNDICES .....		81

## **ABREVIATURAS**

SS	Corriente de salmuera pobre saliente del electrolizador
HCL	Corriente de ácido clorhídrico al 32% en peso
AIRE	Corriente de aire comprimido hacia decloración
GAS	Corriente de gas cloro con aire
LIQ	Corriente de salmuera declorada
CPVC	Policloruro de vinilo clorado

## SIMBOLOGÍA

mg/L	Miligramo por Litro
g/L	Gramo por Litro
pH	Potencial de Hidrógeno
Ca <sup>2+</sup>	Ión de Calcio
Mg <sup>2+</sup>	Ión de Magnesio
ppb	Partes por Billón
ppm	Partes por Millón
kA	Kilo Amperios
Cl <sub>2</sub>	Cloro Molecular
HOCl	Ácido Hipocloroso
ClO <sup>-</sup>	Ión Hipoclorito
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 .....	18
Figura 1.2 .....	20
Figura 1.3 .....	21
Figura 1.4 .....	22
Figura 1.1.5 .....	24
Figura 1.1.6 .....	28
Figura 2.1 .....	32
Figura 2.2 .....	37
Figura 2.3 .....	39
Figura 2.4 .....	39
Figura 2.5 .....	40
Figura 2.6 .....	42
Figura 2.7 .....	43
Figura 2.8 .....	44
Figura 3.1 .....	46
Figura 3.2 .....	47
Figura 3.3 .....	47

Figura 3.4 .....	48
Figura 3.5 .....	51
Figura 3.6 .....	55
Figura 3.7 .....	56
Figura 3.8 .....	57
Figura 3.9 .....	58
Figura 3.10 .....	60
Figura 3.11 .....	64
Figura 3.12 .....	69
Figura 5.1 .....	81
Figura 5.2 .....	81
Figura 5.3 .....	82
Figura 5.4 .....	83
Figura 5.5 .....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 .....	34
Tabla 3.1 .....	49
Tabla 3.3 .....	52
Tabla 3.2 .....	53
Tabla 3.4 .....	62
Tabla 3.5 .....	63
Tabla 3.6 .....	66

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo se encuentra en una transformación tecnológica, en donde las herramientas digitales son cada vez más frecuentes en la resolución de problemas en distintos campos de la ciencia y de igual forma en la ingeniería. Su implementación en el diseño e innovación de procesos industriales ha permitido desarrollar soluciones alternativas y seguras, sin comprometer equipos ni infraestructura.

De acuerdo con la agenda de la ONU (Organización de las naciones Unidas), se han establecido 17 objetivos de desarrollo sostenible para el 2030. Uno de esos objetivos, en el cual se va a centrar este proyecto integrador, es el noveno (Industria, innovación e infraestructura). Dicho objetivo tiene como finalidad el crecimiento responsable de las industrias de manera que se puedan ofrecer nuevos empleos y garantizar un buen desarrollo económico sin causar grandes impactos en el medio ambiente.

Teniendo en cuenta lo mencionado, el presente proyecto propone el uso de herramientas informáticas, alternativas a métodos de diseño de equipos que utilizan únicamente ingeniería tradicional, para la mejora del proceso actual de una planta cloro-soda. De esta manera, se busca generar beneficios económicos en su proceso actual de producción con la facilidad de los resulta. Para ello, se van a emplear principios de ingeniería química dentro del software Aspen Plus®, el cual simulará el proceso teniendo en cuenta distintos parámetros y condiciones de operación. Esto implica que los modelos generados en Aspen Plus® pueden servir de ayuda para la optimización de procesos e inclusive su implementación en planta. Al ser un simulador muy preciso, se evitan gastos innecesarios ya que cada modelo puede compararse y elegir el de mejores resultados.

Generar modelos del proceso previos a su implementación en la empresa permite realizar análisis de eficiencias, seguridad, medioambientales y económicos. Partiendo de la recolección de datos, se realizará la selección y validación del modelo termodinámico, simulación y diseño que se ajuste al proceso. Mediante los resultados obtenidos de la simulación, un análisis tecno-económico se dará como base para su futura implementación.

## **1.1 Descripción del problema**

La planta cloro-soda de estudio tiene un problema relacionado con el proceso actual para la eliminación del cloro disuelto en la salmuera de salida del electrolizador. La remoción del cloro disuelto en la salmuera es importante para evitar dañar e inutilizar las resinas de intercambio iónico en el ciclo de recirculación. Debido a la sensibilidad de estas resinas a agentes oxidantes como el cloro, la acción efectiva de los decloradores es parte esencial del proceso. Sin embargo, el proceso de decloración primaria de salmuera actual no remueve el 100% del cloro disuelto.

El inconveniente proviene en la adición de metabisulfito de sodio para remover el cloro remanente, como un agente reductor en una etapa de decloración secundaria. Esto provoca que se generen subproductos (específicamente sulfatos) que deben ser eliminados mediante purgas del sistema. No obstante, estas purgas desechan salmuera que aún podría reutilizarse en el proceso, lo cual representa pérdidas económicas para la empresa.

Por ello, es requerido mejorar el sistema de decoloración primaria, para así evitar el uso de compuestos ajenos al proceso, reduciendo el porcentaje de cloro disuelto en la salmuera decolorada. La eficacia del diseño propuesto se establecería mediante el incremento en el porcentaje de reducción de cloro disuelto respecto al actual, considerando las restricciones técnicas y de seguridad del caso. Esto se justificará mediante un análisis de gastos de capital (implementación del diseño en el caso de estudio) y gastos operacionales (materias primas y químicos de interés).

## **1.2 Justificación del problema**

La planta cloro-soda del caso de estudio opera las 24 horas del día, durante los 365 días del año, a excepción de ciertos días que debe parar por mantenimiento. El proceso consiste en la transformación de cloruro de sodio (sal marina) y agua en cloro gas, soda cáustica e hidrógeno mediante celdas de electrólisis. Con esto, se producen otros productos como el hipoclorito de sodio, mezclando soda cáustica con cloro gas; ácido clorhídrico, reaccionando hidrógeno y cloro; y cloro gas licuado, posterior a su secado. El ciclo de tratamiento de salmuera es indudablemente uno de los procesos más importantes de este tipo de procesos químicos.

La decoloración de la salmuera de salida del electrolizador (anolito) se realiza para aprovechar el NaCl residual luego de la reacción de electrólisis, cuya cantidad es significativa. A lo largo del desarrollo de las industrias cloro-soda, la tecnología y procesos involucrados para producir los varios productos de electrólisis han ido cambiando, llegando al proceso actual que utiliza membranas especiales. Estas membranas, a diferencia de diseños anteriores como diafragma o los electrodos de

mercurio, requieren de condiciones de operación especialmente estrictas para su mantenimiento y correcto funcionamiento.

El tratamiento de la salmuera consiste en remover su dureza proveniente de la sal hasta los niveles de ppb (partes por billón) mediante el uso de varios procesos, terminando en las resinas de intercambio iónico. Para procesos de electrólisis anteriores como diafragma o mercurio, el tratamiento de salmuera no necesitaba ser tan riguroso y no había la necesidad de cumplir con estos parámetros. Sin embargo, al tener un electrolizador con membranas es necesario remover todo el cloro de la salmuera que se va a recircular, para no oxidar las resinas. De esta manera, la presencia del cloro impide disminuir la dureza en las resinas, lo que finalmente terminará dañando el electrolizador.

El proyecto busca el diseño de un sistema más adecuado para la remoción del cloro disuelto en la salmuera de salida del electrolizador, empleando conocimientos de ingeniería química. Con ello, se evaluaría la factibilidad de reemplazar el sistema actual con resultados de un porcentaje de remoción de cloro que justifique la inversión.

La mejora del proceso de decloración tendría un impacto positivo en varios aspectos del ciclo de recirculación de salmuera en planta, ya que mejoraría el rendimiento del proceso, al evitar gran parte de la purga. También puede presentar mejoras en los costos operacionales de planta, eliminando consumo de metabisulfito necesario para eliminar el cloro residual y la cantidad de sal requerida para mantener el proceso funcionando.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema de decoloración primaria de la planta cloro-soda para la mejora de la recirculación de la salmuera.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Modelar el sistema actual de decoloración en la empresa, para la comparación de su eficiencia de remoción de cloro con la de una columna empacada.
- Estimar los balances de masa del proceso de decoloración secundaria mediante los resultados del software Aspen Plus®.
- Evaluar la remoción de cloro y el flujo de caja del diseño propuesto de decoloración, para el análisis de rentabilidad del proyecto.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Trasfondo de las plantas cloro-soda en Ecuador**

Las plantas cloro-soda alrededor del mundo producen casi el 100% del cloro y la soda cáustica, partiendo del cloruro de sodio y cloruro de potasio, en menor proporción, como materias primas. Además, también se obtienen otros subproductos a partir del cloro y la soda cáustica como el ácido clorhídrico, hipoclorito de sodio, o clorato de sodio. El cloro gas está presente principalmente en la industria papelera y tratamiento de aguas, para blanquear la pulpa de papel y desinfectar el agua previo a su potabilización. También se usa para producción de compuestos orgánicos como el PVC (O'Brien et al., 2005). La soda también tiene relevancia en la industria, teniendo un rol principal en la producción de jabón y detergente, la industria de papel, petróleo y alúmina (O'Brien et al., 2005).

En Ecuador, el principal sector productivo es el agropecuario y agrícola, ya que aproximadamente el 54% de la población del país se enfoca principalmente en actividades de índole agrícola (Chuncho Juca et al., 2021). Además, un análisis de la canasta de exportación indica que la industria química del país tiene la menor relevancia en términos de exportación, si se compara con el petróleo, agricultura y ganadería (Hausmann y Klinger, 2010).

Durante muchos años Ecuador importó cloro gaseoso de otros países para la desinfección de aguas en plantas potabilizadoras por la ausencia de la industria cloro soda en el país (Paz, 1998). Actualmente, la producción local cubre la totalidad de estos productos de interés y satisface la demanda. Estos productos forman parte intrínseca del tratamiento de aguas e industria química del país.

#### **1.4.2 Descripción del proceso de electrólisis**

El corazón del proceso se encuentra en el electrolizador, donde se realiza la reacción de electrólisis de salmuera para formar estos productos. A lo largo de los años, se ha innovado la tecnología del proceso y se pasó de utilizar electrodos de mercurio o celdas con diafragmas a las membranas selectivas que se utilizan en la mayoría de las plantas actuales, debido a su alta eficiencia energética (O'Brien et al., 2005). La reacción general de electrólisis que describe la materia prima y los productos es (Karlsson y Cornell, 2016):



Los electrodos utilizados con celdas de membrana son cátodos de níquel activados/recubiertos y ánodos de titanio recubiertos con una capa de óxido de rutenio y

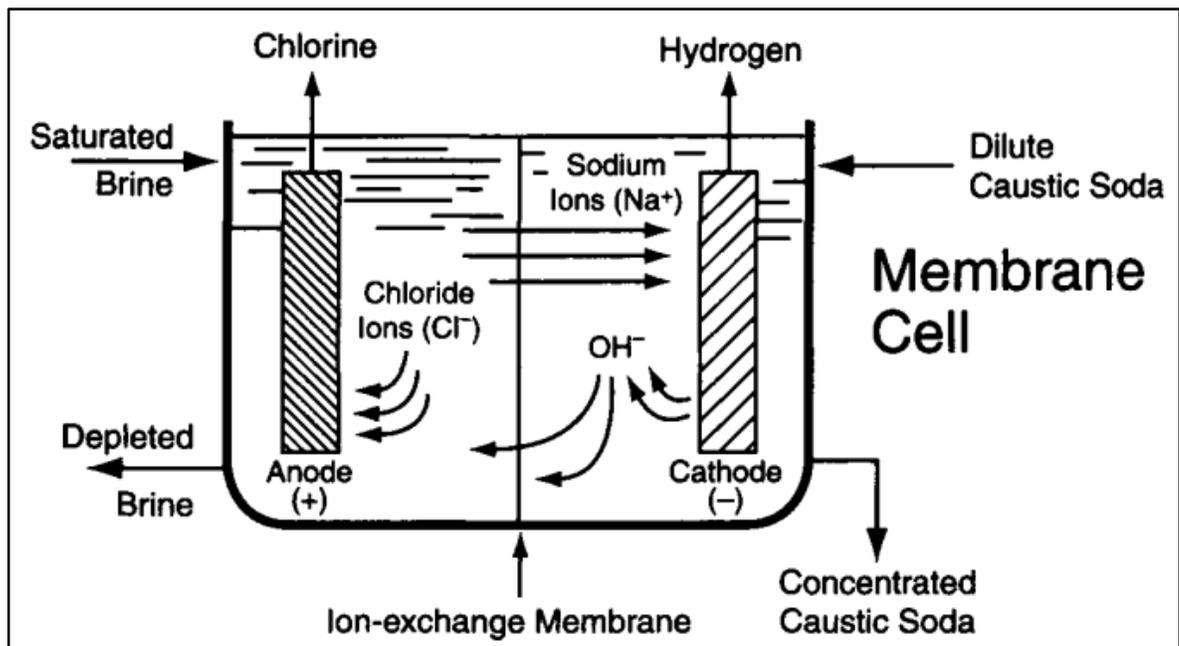
óxido de titanio. Con esta configuración, el ahorro energético es significativo debido a su menor potencial eléctrico a densidades de corriente industriales (Karlsson y Cornell, 2016).

Esta tecnología de membranas en la industria de electrólisis revolucionó la manera de operación y producción desde alrededor de 1950, resolviendo el problema de separación de anolito y catolito sin aumentar significativamente la resistividad eléctrica. Esto se logra mediante la distancia mínima entre los electrodos, reduciendo la caída óhmica que toma lugar en la fase del electrolito. Las membranas utilizadas en plantas cloro-soda están construidas de una capa de polímero de perfluorosulfonato, un polímero de perfluorocarboxilato, y un refuerzo con politetrafluoroetileno (PTFE), unidos entre sí. Esto permite una disminución de la resistividad de la membrana en el lado sulfonado de

la membrana, y una disminución del flujo de iones hidroxilo hacia el ánodo del lado carboxílico (Paidar et al., 2016).

**Figura 1.1**

*Esquemática de la celda de membrana cloro-soda*



Nota. Adaptado de *Handbook of Chlor-Alkali Technology* (p. 38), por (O'Brien et al., 2005), Springer.

Las celdas de mercurio o con diafragmas no requieren de una salmuera de alta pureza (ultrapura), a diferencia de aquellas con membranas. Los iones de dureza  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  precipitan en la superficie de la membrana al reaccionar con los iones hidroxilo presentes en la celda (Madaeni y Kazemi, 2008).

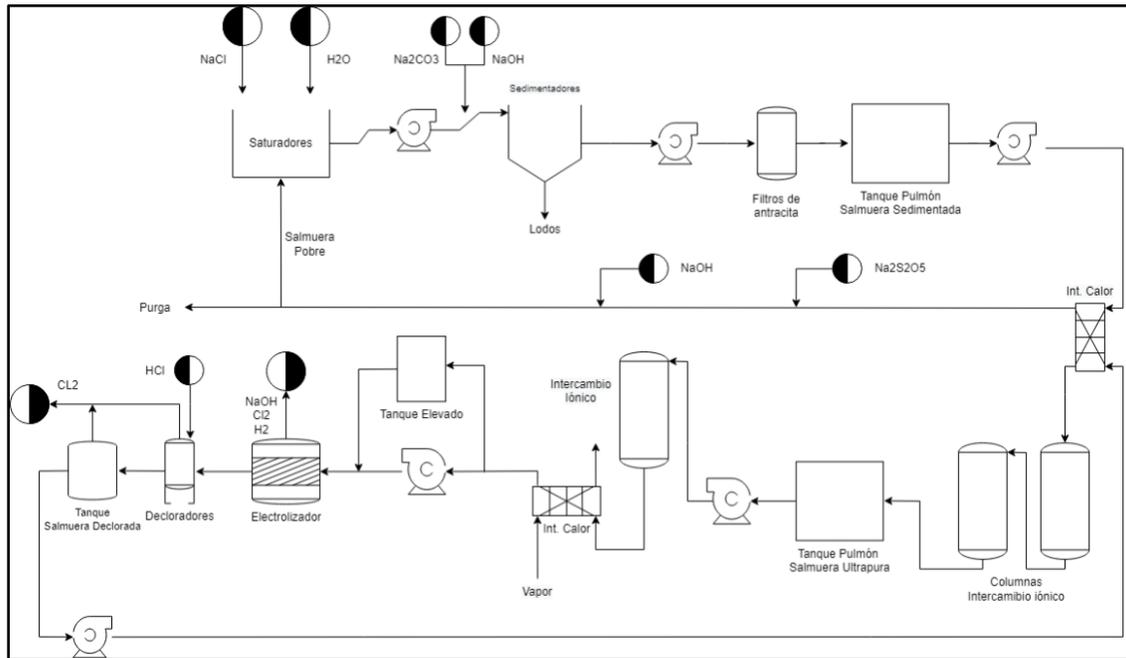
### **1.4.3 Ciclo de salmuera y su importancia**

El proceso general de tratamiento de salmuera previo a la electrólisis consiste en un tratamiento químico, sedimentación, filtración e intercambio iónico. Aquí, se busca eliminar la dureza proveniente de la sal a menos de 20 ppb, que en caso de que llegue en niveles mayores a las membranas del electrolizador puede obstruirlas y ocasionar su ruptura. Todas las etapas del tratamiento se enfocan en conseguir este objetivo: remover la dureza e impurezas de la salmuera. Sin embargo, la más importante es el intercambio iónico, que consigue reducir la dureza a menos de 20 ppb utilizando resinas de intercambio iónico (O'Brien et al., 2005).

El ciclo de salmuera del caso de estudio comprende todas estas etapas, teniendo aproximadamente 11 m<sup>3</sup> de salmuera ultrapura ingresando al electrolizador a carga máxima (operación normal). Se comprende de varios equipos que se resumen en el siguiente diagrama:

**Figura 1.2**

*DFP del ciclo de salmuera del caso de estudio*



*Nota.* Diagrama simplificado del ciclo de tratamiento de salmuera, se omitieron equipos redundantes.

Estas resinas tienen retienen los iones de calcio y magnesio, liberando dos iones de sodio por cada ion de dureza adsorbido. Cuando el lecho de resina se satura, es necesario regenerarla para que vuelva a tener la forma de iones de sodio utilizando soluciones de HCl y NaOH (Flodman y Dvorak, 2012). El uso del intercambio iónico resulta barato ya que no requieren energía para funcionar y su tiempo de vida útil suele ser largo si se mantienen de manera correcta.

Algunas de las limitaciones a su tiempo de vida, de manera general, son:  
Ensuciamiento por sulfato de calcio, incrustación de hierro, contaminación orgánica,

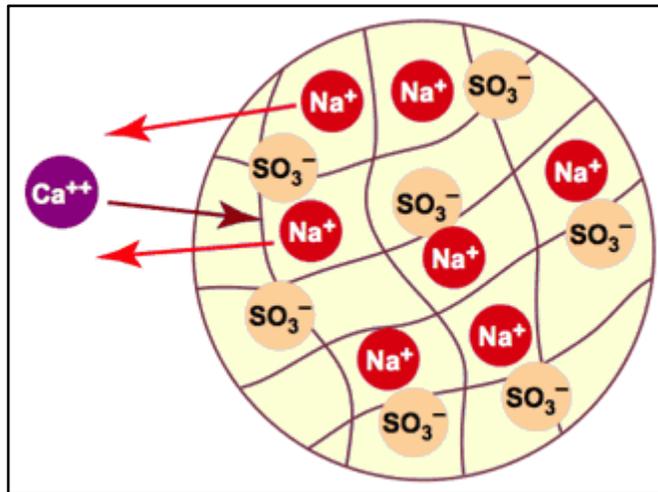
contaminación bacteriana y contaminación por cloro (Kansara et al., 2016). Para el caso de estudio, se considerará especialmente la contaminación por cloro, que oxida y daña las resinas reduciendo su efectividad.

Debido a procesos anteriores de tratamiento, se tiene una salmuera con niveles de dureza e impurezas relativamente bajos, por lo que la selectividad de la resina es alta hacia los iones divalentes de calcio y magnesio. La reacción de estos iones de dureza con la resina es la siguiente (Ramasmamy et al., 2013):



Figura 1.3

*Ablandamiento de agua con resinas*



*Nota. Adaptado de El Intercambio iónico, Principios Básicos, (Dardel, n.d.).*

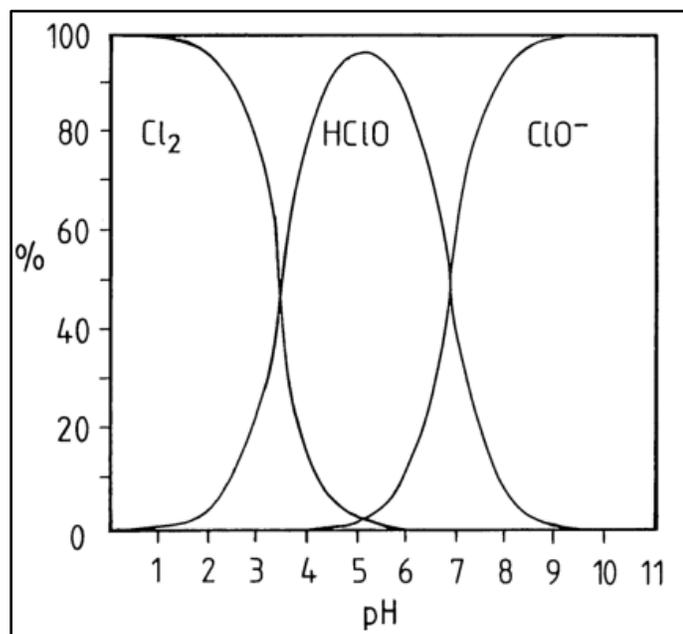
#### 1.4.4 Decloración primaria

La recirculación y resaturación de la salmuera pobre posterior al electrolizador debe realizarse siempre y cuando se mantengan los parámetros de operación establecidos por el proveedor de las membranas del electrolizador. Para ello, es necesario que el proceso de tratamiento de salmuera funcione correctamente, considerando que se utilizaría la salmuera saliente del proceso en lugar de desecharla. Después de la electrólisis, la salmuera pobre sale del electrolizador con una concentración de alrededor de 1 g/L de cloro disuelto en forma de ácido hipocloroso, cuya reacción de hidrólisis es (O'Brien et al., 2005):



**Figura 1.4**

*Porcentajes de especies activas de en función del pH del anolito a 90 °C y 200 g/L de NaCl*



*Nota.* Adaptado de “Selectivity between oxygen and chlorine evolution in the chlor-alkali and chlorate processes.” (p. 2984), por (Karlsson y Cornell, 2016), Chemical Reviews, 116 (5).

Para facilitar su remoción, se añade ácido clorhídrico para disminuir su pH hasta 2. Esta disminución del pH ayuda a la decloración al mover el equilibrio entre las especies de cloro disuelto ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HOCl}$  y  $\text{ClO}^-$ ) que se traduce en la hidrólisis del cloro gas y deprotonación del ácido hipocloroso (Karlsson y Cornell, 2016). La solubilidad del cloro disminuye en el agua con la presencia de cloruro de sodio y requiere menos ácido para eliminarlo gracias a la presencia de un exceso de iones cloruro (O’Brien, 1990).

Luego de la acidificación y deshidrolización del cloro, se lo elimina de la salmuera mediante desorción en una columna empaquetada con aire o rociada en un sistema de vacío; después se añade hidróxido de sodio y metabisulfito de sodio para eliminar el cloro completamente de la salmuera. Este proceso también es llamado decloración secundaria (Kundu, 2010). La decloración mediante desorción en columnas empacadas con aire suele ser la más común y económica. La adición de aire reduce la fracción molar del cloro en el vapor, reduciendo así la presión parcial del cloro y mejorando su remoción (O’Brien, 1990).

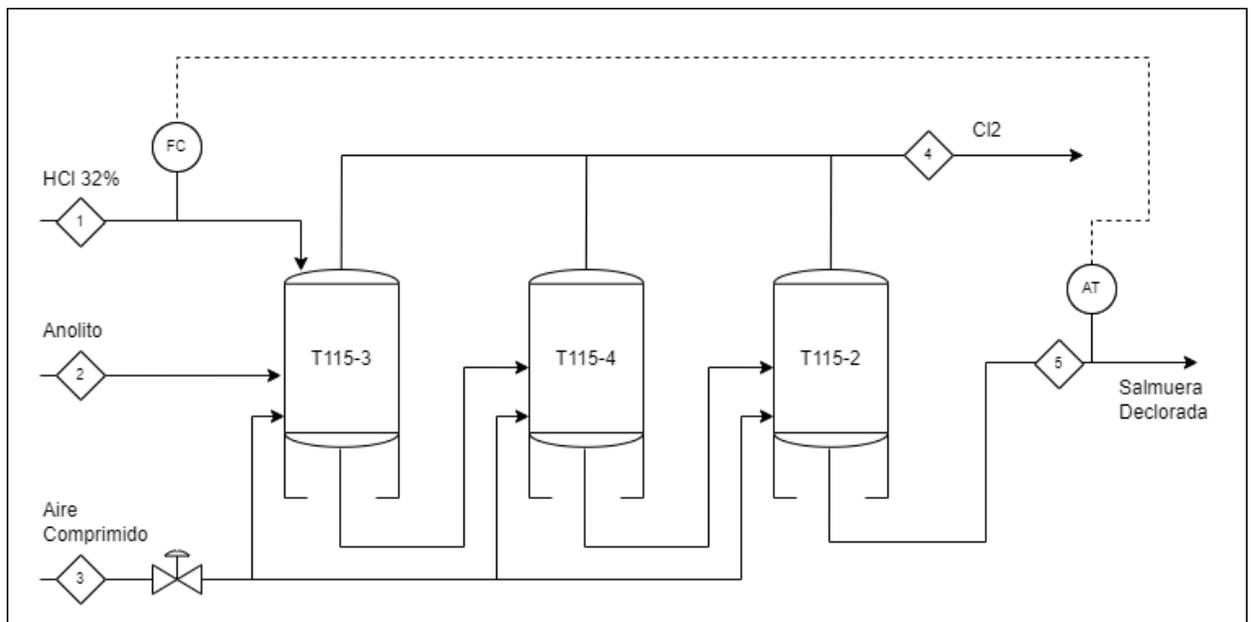
El uso de agentes reductores químicos en la decloración secundaria es especialmente importante en sistemas que utilicen membranas. En este tipo de celdas, se suele requerir niveles de cloro residual menores a 0.5 mg/L debido al deterioro que puede ocasionar a las resinas de las columnas de intercambio iónico (Brinkmann et al., 2014). Estas resinas son sensibles a agentes oxidantes, y la mayoría de las plantas

tienen varias medidas preventivas para evitar que llegue salmuera clorada a esta parte del tratamiento.

Otro ión formado en consecuencia a la desproporción del cloro disuelto es el clorato, que se acumula en el ciclo de salmuera. Este puede perjudicar las membranas y varios equipos del sistema si sus niveles se elevan más allá de los límites que los proveedores de las membranas especifiquen. Por esta razón, la se realiza purga de salmuera para evitar su acumulación. Existen varias técnicas para evitar su formación, que igualmente está relacionada con la disolución del cloro en la salmuera: acidificación de la alimentación de salmuera ultrapura al electrolizador, reducción catalítica y reducción acídica (Brinkmann et al., 2014).

**Figura 1.1.5**

*Proceso de dechloración actual*



*Nota.* Representación simplificada del proceso de dechloración primaria actual.

Mediante la mejora del sistema de dechloración, la reducción de la purga de salmuera puede beneficiar económicamente la empresa, debido a disminución de consumo de sal y menor caudal de desecho de salmuera; y ambientalmente, por la reducción de efluentes a tratar de planta (Lakshmanan y Murugesan, 2013). El sistema actual comprende tres tanques en serie que actúan como etapas de desorción, burbujeadas con aire comprimido. El ácido clorhídrico entra en la primera etapa solamente, y los desgasajes salen juntos hacia la unidad de absorción de cloro.

#### **1.4.5 Contactores gas – líquido**

Uno de los equipos más utilizados en la industria para la separación de fases líquido-gas son los contactores gas – líquido. Estos equipos permiten tanto la transferencia de materia como la de masa y pueden utilizarse en procesos de separación que requieran de reacciones (destilación reactiva). Existen dos tipos de contactores gas – líquido, diferenciales y por etapas. Los diferenciales permiten la transferencia a lo largo del equipo mientras que los otros permiten la transferencia en un determinado volumen de cada etapa. En la categoría de contactores diferenciales se encuentran las columnas empacadas, burbujas, entre otras. Para los contactores por etapas se encuentran las columnas por bandejas y de agitación mecánica.

El uso de estos equipos va a depender del proceso de separación que se quiera realizar, ya que pueden presentar beneficios y dificultades. En el caso de los contactores

diferenciales, las columnas requieren de empaques que pueden ser costosos; por otro lado, una columna por etapas puede no ser muy rentable si el número de etapas es excesivamente alto (Ghosal y Datta, 2011).

Para lograr la separación gas – líquido, se hace circular el fluido que actuará agente separador de forma tangencial, ayudado por deflectores, de tal forma que se genera turbulencia dentro del equipo y se logra extraer el compuesto de interés. La efectividad de la extracción dependerá de diversos factores como el tiempo de residencia y la longitud del tanque. Finalmente, la fase líquida debe ser descargada o almacenada.

Existen diversos fundamentos por los cuales se logra esta transferencia de masa, entre estos están: separación por gravedad, fuerza centrípeta y por choque. La separación por gravedad consiste en circular el fluido en fase líquida a contra flujo del gaseoso hasta alcanzar la velocidad constante y que se iguale con la fuerza de arrastre de la corriente gaseosa. La fuerza centrípeta consiste en realizar movimientos rotacionales a altas velocidades para lograr la separación de las partículas del líquido suspendidas en el gas. La separación por choque es de las más comunes en la industria y consiste en colocar obstrucciones en el interior del equipo para que las partículas líquidas queden adheridas a las mismas (Diaz, 2011).

Para el diseño de un contactor líquido-gas se debe tener en cuenta diversos parámetros, entre los cuales están:

- Diámetro
- Longitud
- Piezas internas

- Propiedades de los fluidos
- Presión
- Temperatura
- Numero de etapas de separación
- Flujos de operación
- Tiempo de residencia

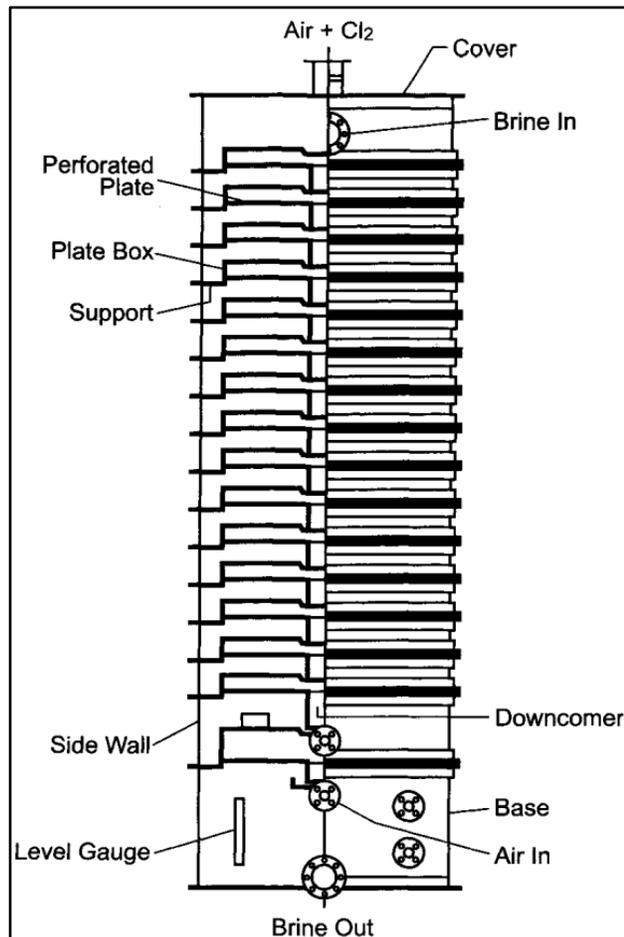
Es importante que los parámetros vayan acorde a la operación para evitar inconvenientes como daños en el equipo o accidentes con los operadores (Diaz, 2011). En la producción de cloro, los contactores gas líquido se conocen como decloradores. Estos equipos tienen la función de remover la mayor cantidad de cloro libre presente en la salmuera empobrecida para que esta puede volver a enriquecerse con sales y reutilizarse en el proceso.

Esta operación se conoce como desorción de cloro y a menudo se lleva a cabo en columnas empacadas con anillos Rasching de cerámica como relleno. Se realiza una acidificación en salmuera a la salida del electrolizador para poder desplazar el equilibrio de la reacción de HClO a Cl<sub>2</sub>. Esta solución ingresa por la parte superior de la columna, mientras que por la parte inferior se hace circular aire, por lo que ambas corrientes estarían en contra flujo. El aire reduce la presión parcial del cloro en el líquido y debido al empaque, se favorece el área de contacto permitiendo una separación efectiva del cloro

gas de la salmuera. A la salida inferior de la columna estará la salmuera libre de cloro y en la zona superior una mezcla de cloro gas con aire (Balbi y Rodríguez, 2013).

**Figura 1.1.6**

*Diseño generalizado de torre empacada para decloración de salmuera mediante desorción con aire*



*Nota.* Adaptado de *Handbook of Chlor-Alkali Technology* (p. 677), por (O'Brien et al., 2005), Springer.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Alternativas para el diseño del sistema de dechloración

Para mejorar la remoción de cloro en la salmuera del proceso actual de la planta, se analizaron varias alternativas en base a la información recopilada. Los datos más relevantes tomados en planta fueron: flujos, temperaturas, presiones, pH y composiciones de las corrientes involucradas en la dechloración primaria. De acuerdo con información proporcionada por expertos en la industria cloro-soda, una alternativa viable es la implementación de una columna de desorción. Esto reemplazaría el sistema actual de tres tanques en serie, con la finalidad de promover la transferencia de masa del cloro hacia el aire. Finalmente, con ello se mejoraría la remoción de cloro de la salmuera saliente del electrolizador.

Para el diseño de la columna, se consideraron varias alternativas. Entre ellas, estaban las columnas de platos, empacadas y al vacío. Se tomaron en cuenta distintos factores limitantes, entre los cuales estaba la complejidad del diseño, información proporcionada por la empresa, costos y limitaciones de Aspen Plus® para realizar las simulaciones. En base a esa información se realizó la elección del tipo de columna que se diseñó para el proceso, que es la columna empacada con desorción mediante aire comprimido.

La columna de platos es recomendable cuando los compuestos están en fase líquida. Sin embargo, en este caso se va a trabajar con compuestos tanto líquidos como

gaseosos. Por lo tanto, ya que en las columnas de platos no hay una buena relación líquido/gas se descartó la opción. Además, la columna estaría bajo condiciones de extrema corrosión debido a los ácidos concentrados del proceso, como lo es el ácido clorhídrico; Esto provoca un mayor desgaste en los platos generando gastos excesivos de mantenimiento (Treybal, 2004).

## **2.2 Columna empacada como mejor alternativa de diseño**

Las columnas empacadas son una alternativa más viable para el caso de estudio por varias razones. Al existir un volumen de empaque, la transferencia de masa hacia el gas aumentará gracias a la mayor superficie de contacto entre las fases. Existen diferentes tipos de columnas empacadas, pero para este proyecto se analizaron únicamente las columnas empacadas que operan con vacío y las columnas empacadas con flujos de aire (Treybal, 2004).

Las columnas que operan al vacío son más costosas de implementar y se necesita de personal altamente capacitado para involucrarse en el proceso. Al ser equipos que funcionan al vacío, requieren adaptación de los equipos actuales de la planta cloro-soda para que puedan trabajar con la columna al vacío, lo que conlleva a más gastos de implementación. El factor económico es un parámetro muy determinante al momento de decidirse por este tipo de equipos.

Se optó por diseñar la columna que opera con flujo aire en lugar del vacío. Este equipo tiene la ventaja de adaptar las líneas de aire que utiliza la planta con mayor facilidad, de esta manera se reducen costos de implementación. Otra característica importante es la elección del tipo de empaque, considerando que se trabaja con salmuera clorada y ácido

clorhídrico las mejores alternativas son los anillos *Rasching de cerámica* o anillos *Pall*. Tanto los anillos Pall como los anillos Rasching tienen características similares. Ambos empaques presentan gran resistencia a altas temperaturas y a sustancias alcalinas y ácidas, exceptuando el ácido sulfhídrico. En el caso de temperatura, los anillos Rasching tienen un punto de ablandamiento a los 1400°C y pueden operar con temperaturas de hasta 1200°C. Existe una gran variedad de aplicaciones para los anillos Rasching, entre las cuales se encuentra destilación, lavado, tratamiento de gases, entre otras.

Los anillos Pall de cerámica pueden operar hasta 1000°C y al igual que los anillos Rasching, tienen una amplia variedad de aplicaciones debido a su alta resistencia al calor y sustancias ácidas y básicas. Una de las características principales de los anillos Pall son las aberturas a lo largo del empaque. Estas permiten una mejor transferencia de masa con el flujo de gas que los anillos Rasching cuando son colocados al azar.

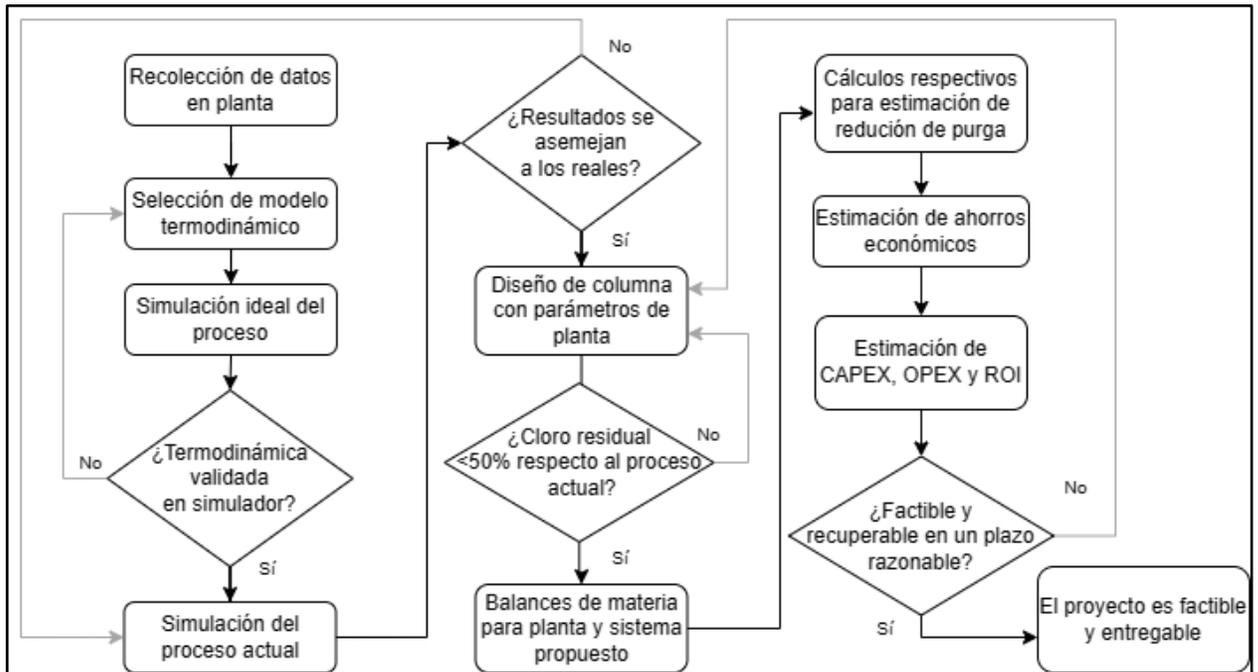
El costo de estos empaques es un factor que también debe considerarse para su elección. De acuerdo con diversos proveedores de empaques como Alibaba y Pingxiang Nanxiang, el precio por metro cúbico de los anillos Rasching se encuentra en un rango de 260 a 500\$; mientras que los anillos de Pall se encuentran en un rango de 200 a 485\$ por metro cúbico. De acuerdo con los factores revisados para los empaques, los anillos de Pall son una buena alternativa para el diseño de una columna para decoloración de salmuera.

### **2.3 Diseño conceptual y algoritmo de resolución de problemas**

Una vez decididos estos factores, se esquematizó la metodología a seguir mediante un diseño conceptual:

**Figura 2.1**

*Diseño conceptual para el diseño de la columna de decoloración de salmuera*



*Nota.* Algoritmo para el desarrollo del proyecto.

## 2.4 Datos y análisis de laboratorio

Para realizar la simulación del proceso actual se recopilaron los siguientes datos de la planta: flujos másicos, concentraciones, temperaturas, presiones y pH de las corrientes de interés. Para la simulación, se requieren variables de entrada como temperatura, presión y flujos másicos de los componentes para cada corriente. Con estos datos, se detallaron los flujos en el simulador, bastante aproximados para cada componente en las corrientes de la salmuera saturada "SS", ácido clorhídrico "HCL" y aire "AIRE". Estos datos fueron corroborados por los supervisores y contrastados con el histórico de datos

de la empresa. De esta manera, se puede afirmar que la información estuvo actualizada y validada.

El recurso principal utilizado para el diseño fue el simulador Aspen Plus®, que permitió colocar los parámetros de la planta y obtener resultados considerando todos los aspectos del proceso. Mediante esta herramienta, se pudo simular el proceso actual de planta para poder comparar los resultados con la propuesta.

Se tomaron datos de análisis de laboratorio respecto al 2022, para analizar las tendencias de sulfatos y cloro libre en la salmuera. Esta información se utilizó para conocer la efectividad de los decoloradores que actualmente se utilizan en la planta. Utilizando herramientas estadísticas, se verificó la correlación entre el cloro y los sulfatos en la salmuera antes y después de pasar por los decoloradores.

La medición de la concentración de cloro disuelto residual es un análisis de laboratorio que se realiza y reporta diariamente. El proceso consiste en un ensayo yodométrico estandarizado (Baird et al., 2017) donde se mide la concentración de  $\text{Cl}_2$  en salmuera en unidades de ppm. Otro análisis importante es la cantidad de sulfato de sodio presente, que si excede los 10 g/L es perjudicial para las membranas del electrolizador. Para este caso de estudio, se solicitaron tres muestras de salmuera tanto a la salida de los decoloradores como después de la adición de metabisulfito y soda. Mediante este análisis, se cuantificó la generación de sulfato de sodio promedio en el proceso.

Respecto a otros datos obtenidos, se realizaron mediciones en campo y promedios de reportes del histórico de datos. Entre estos estuvieron: cantidad de metabisulfito promedio consumida por hora, flujo de metabisulfito utilizado para la salmuera decolorada y la cantidad de agua que interviene, flujo de soda hacia la línea de salmuera decolorada y

flujo de la purga de salmuera. Datos importantes como el precio aproximado de la sal y el metabisulfito de sodio fueron provistos por el cliente para los cálculos respectivos en ahorros del proyecto.

**Tabla 2.1**

*Datos relevantes obtenidos en la recolección y análisis de laboratorio*

<b>Dato</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Cantidad de metabisulfito promedio consumida	2.8225	kg/h
Cantidad de agua en metabisulfito promedio consumida	36.2903	kg/h
Concentración promedio de Cl <sub>2</sub> en salmuera declorada	1.215	kg/h
Consumo de soda 32% en salmuera declorada	5.7235	L/h
Promedio sulfato de sodio en salmuera declorada	8.09	g/L
Promedio sulfato de sodio luego de adición de metabisulfito	8.223	g/L
Promedio purga de salmuera	1000	L/h
Costo aproximado de sal para la empresa	32.5	\$/ton
Costo aproximado de metabisulfito de sodio para la empresa	1.2	\$/kg

*Nota.* Valores aproximados para el análisis de reducción de purga y costos de la planta.

## **2.5 Criterios de diseño para la columna empacada**

Dependiendo del proceso una columna empacada requiere de ciertos criterios para que su diseño sea adecuado y no genere problemas durante su operación. Entre los principales aspectos se encuentra: La altura máxima de la columna, el distribuidor de líquido, la sección superior, sección inferior y la alimentación de vapor (Branan, 2012).

Tanto la altura de la torre como la del empaque son parámetros ligados a los flujos de operación. El valor de estas variables es directamente proporcional al tamaño de la columna, por lo tanto, a mayor flujo mayor deberá ser el tamaño de la columna. Para la sección superior se toma como referencia la superficie de los distribuidores de líquido hasta la tangente superior del equipo y no puede exceder los cuatro pies (Branan, 2012).

Los distribuidores de líquido son una parte muy importante en la columna, ya que de ellos depende el contacto entre las distintas fases. Para que un distribuidor sea efectivo, el flujo de salida de la columna no debe variar en más de cinco por ciento respecto al flujo de entrada. Se recomienda que la caída del líquido no debe exceder las 12 pulgadas entre la entrada del líquido y la superficie del distribuidor (Branan, 2012).

Para las entradas de vapor se recomiendan boquillas de al menos 12 pulgadas y se debe ubicar debajo de los platos de soporte del interior de la columna. La sección inferior de la columna comprende desde la superficie inferior de la cama de soporte hasta la tangente inferior del equipo. Se recomienda que no se excedan los seis pies de altura en esta sección de la columna (Branan, 2012).

El diámetro interno de la columna se puede aproximar dependiendo del tipo y tamaño del empaque. Existen diferentes diámetros internos para columnas con empaques desde una pulgada hasta tres pulgadas y media con diámetros desde 30 centímetros hasta 1,20 metros (Branan, 2012).

Por medio del tamaño del empaque también se pueden aproximar las cargas del líquido requeridas por la columna. Para empaques con tamaños de  $\frac{3}{4}$ , 1, 1  $\frac{1}{2}$ , 2 y 3  $\frac{1}{2}$  pulgadas, se recomiendan cargas de líquido de 25, 40, 55, 70 y 125 (gpm/ft<sup>2</sup>) respectivamente (Branan, 2012).

La caída de presión de la columna se puede aproximar dependiendo de la operación en la que se utilizará la columna. En este proyecto se trabajó con una columna mediante desorción con aire. Las caídas de presión de la columna recomendadas para esta operación son de 0.40 a 0.60 (pulgadas de agua por profundidad de empaque en pies) (Branan, 2012).

Se tomaron en cuenta diversos aspectos de seguridad para el diseño de la columna, de esta forma se puede garantizar la seguridad para los operadores, una vida útil del equipo más duradera y la reducción de posibilidad de accidentes graves. Los aspectos de seguridad considerados para la columna fueron los siguientes:

- El cloro es un agente oxidante muy activo, por ello reacciona casi inmediatamente con muchos compuestos metálicos oxidándolos y reduciendo su vida útil. Los materiales involucrados en el diseño de equipos que trabajen con cloro deben ser muy resistentes a la corrosión, como alternativas se encuentra el titanio y el Policloruro de Vinilo Clorado (CPVC). Los materiales mencionados son muy utilizados en la industria cloro soda.

- En caso de existir problemas de presión en los conductos que transportan el cloro se debe tener en cuenta que no puede ser liberado al ambiente. Las líneas de cloro deben tener líneas secundarias que permitan distribuir el cloro ya sea a otro proceso o a tanques de almacenamiento presurizados en caso de existir sobrepresión en el sistema.
- Los operadores deben contar con equipos de protección adecuados para trabajar en los equipos en donde el cloro esté involucrado. Además, deben contar con entrenamiento en caso de una emergencia que requiera evacuación o primeros auxilios por exposición al cloro. Es importante que se cuente con protocolos de contención y remediación en caso de fugas de cloro, para salvaguardar la vida del personal y mitigar daños al medio ambiente.

## **2.6 Diseño de la columna en el simulador Aspen Plus®**

Para realizar la simulación, primero se colocaron todos los compuestos presentes en las corrientes involucradas en la cloración primaria de la salmuera. Estas corrientes son: salmuera pobre saliente del electrolizador (SS), ácido clorhídrico 32% (HCL), aire comprimido (AIRE), salida de cloro gas con el aire (GAS) y salida de salmuera clorada (LIQ).

### **Figura 2.2**

*Compuestos ingresados en la simulación*

Components x +

Selection Petroleum Nonconventional  Enterprise Database Comments

Select components

Component ID	Type	Component name	Alias
▶ <b>NACL</b>	<i>Conventional</i>	<b>SODIUM-CHLORIDE</b>	<b>NACL</b>
▶ <b>HCL</b>	<i>Conventional</i>	<b>HYDROGEN-CHLORIDE</b>	<b>HCL</b>
▶ <b>NACLO</b>	<i>Conventional</i>	<b>SODIUM-HYPOCHLORITE</b>	<b>NACLO</b>
▶ <b>CL2</b>	<i>Conventional</i>	<b>CHLORINE</b>	<b>CL2</b>
▶ <b>H2O</b>	<i>Conventional</i>	<b>WATER</b>	<b>H2O</b>
▶ <b>NA+</b>	<i>Conventional</i>	<b>NA+</b>	<b>NA+</b>
▶ <b>H+</b>	<i>Conventional</i>	<b>H+</b>	<b>H+</b>
▶ <b>HCLO</b>	<i>Conventional</i>	<b>HYPOCHLOROUS-ACID</b>	<b>HCLO</b>
▶ <b>OH-</b>	<i>Conventional</i>	<b>OH-</b>	<b>OH-</b>
▶ <b>CLO-</b>	<i>Conventional</i>	<b>CLO-</b>	<b>CLO-</b>
▶ <b>CL-</b>	<i>Conventional</i>	<b>CL-</b>	<b>CL-</b>
▶ <b>AIR</b>	<i>Conventional</i>	<b>AIR</b>	<b>AIR</b>
▶ <b>NACLO3</b>	<i>Conventional</i>	<b>SODIUM-CHLORATE</b>	<b>NACLO3</b>
▶ <b>NA2SO4</b>	<i>Conventional</i>	<b>SODIUM-SULFATE</b>	<b>NA2SO4</b>
▶ <b>H2SO4</b>	<i>Conventional</i>	<b>SULFURIC-ACID</b>	<b>H2SO4</b>
▶ <b>HSO4-</b>	<i>Conventional</i>	<b>HSO4-</b>	<b>HSO4-</b>
▶ <b>CLO3-</b>	<i>Conventional</i>	<b>CLO3-</b>	<b>CLO3-</b>
▶ <b>SO4--</b>	<i>Conventional</i>	<b>SO4--</b>	<b>SO4-2</b>

Find Elec Wizard SFE Assistant User Defined Reorder Review

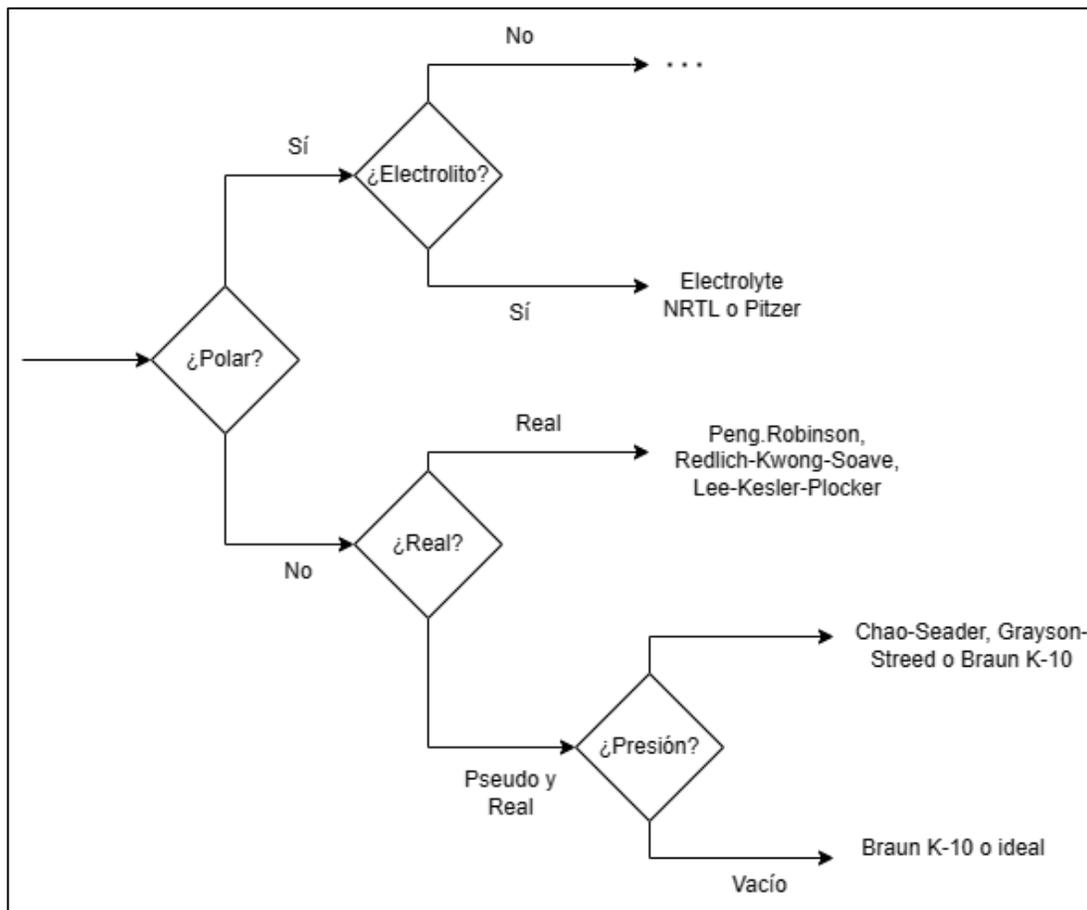
*Nota.* Captura de pantalla de los compuestos ingresados en la simulación.

Luego se eligió un método termodinámico acorde a los compuestos presentes en el sistema. Para ello, se recurrió al árbol de decisión de modelos termodinámicos y dado que el sistema tenía compuestos electrolíticos, se optó por utilizar el método “Electrolyte NRTL”. Este método se adecua al sistema de la planta cloro – soda debido a la interacción de los

iones sodio y cloro durante el equilibrio. Además, se pueden utilizar compuestos que cumplen la ley de Henry, como el cloro gas.

**Figura 2.3**

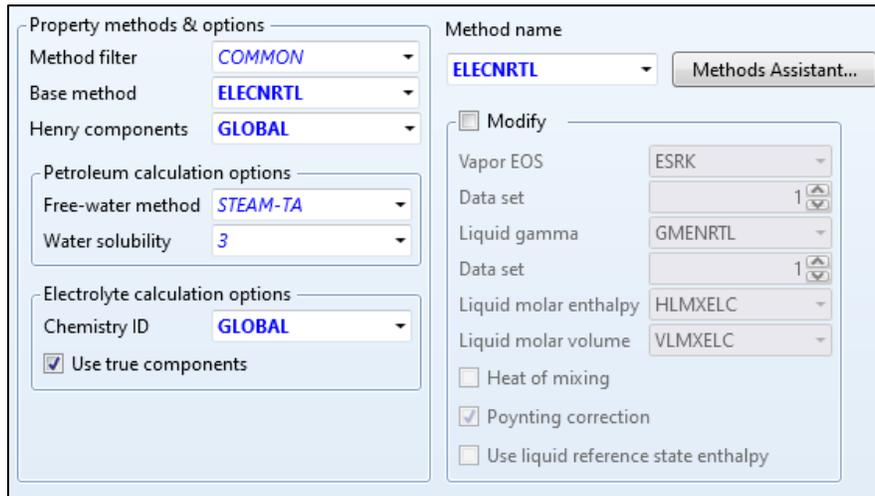
*Árbol de decisión del método termodinámico*



*Nota.* Adaptado de *Thermodynamic and Property Models* (p. 71), por (Chaves et al., 2016), Springer.

**Figura 2.4**

*Método termodinámico en el simulador*



*Nota.* Captura de pantalla del método termodinámico seleccionado en la simulación.

Con la función de ELECTRO WIZARD, se completaron las reacciones del sistema y se especificaron los compuestos que cumplen con la ley de Henry. En este caso, fueron el cloro gas  $\text{Cl}_2$ , el ácido hipocloroso  $\text{HClO}$  y el ácido clorhídrico  $\text{HCl}$ .

**Figura 2.5**

*Reacciones involucradas en la simulación*

Reaction stoichiometry			
	Reaction	Type	Stoichiometry
▶	1	Equilibrium	$\text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 \leftrightarrow \text{HClO} + \text{Cl}^- + \text{H}^+$
▶	2	Equilibrium	$\text{HCl} \leftrightarrow \text{Cl}^- + \text{H}^+$
▶	5	Equilibrium	$\text{HClO} \leftrightarrow \text{ClO}^- + \text{H}^+$
▶	6	Equilibrium	$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{OH}^- + \text{H}^+$
▶	NACLO3	Dissociation	$\text{NACLO}_3 \rightarrow \text{ClO}_3^- + \text{NA}^+$
▶	NACLO	Dissociation	$\text{NACLO} \rightarrow \text{ClO}^- + \text{NA}^+$
▶	NA2SO4	Dissociation	$\text{NA}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4^{--} + 2 \text{NA}^+$
▶	NACL	Dissociation	$\text{NACL} \rightarrow \text{Cl}^- + \text{NA}^+$

*Nota.* Captura de pantalla de las reacciones ingresadas en la simulación.

Las reacciones que fueron descritas en el proceso eran principalmente de equilibrio y de disociación. Al tener sales en el proceso, se debe considerar la hidrolización con el agua y su incidencia en el equilibrio y el pH.

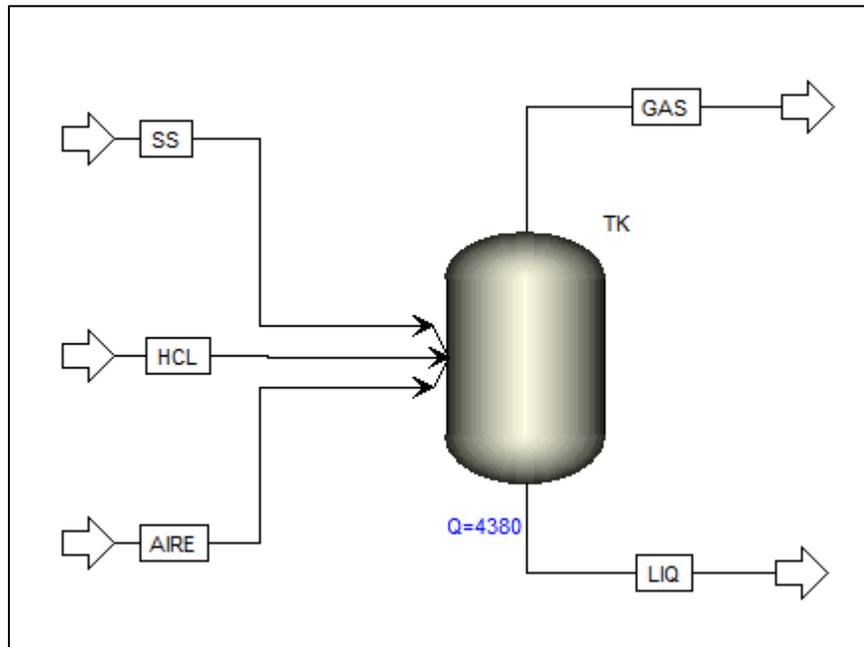
Para la validación de la termodinámica, se simuló el proceso actual de la planta utilizando un tanque flash, el cual representaba los tres tanques de decoloración actual. Los resultados obtenidos no presentaron una gran variación respecto a los valores de planta, específicamente los dados en el balance de materia. Por ello, se decidió que el modelo termodinámico seleccionado era adecuado para el procedimiento. Por consiguiente, se concluyó que el comportamiento de las sustancias en el simulador era similar al del proceso real y se podía realizar un diseño válido.

El cloro es un elemento muy reactivo, especialmente en agua y con ciertos metales. Al momento de entrar en contacto con el agua reacciona formando el ácido hipocloroso. Esta reacción ocurre rápidamente debido a que el cloro es un agente oxidante fuerte. Teniendo en cuenta que las condiciones de las reacciones en donde interviene el cloro son extremadamente ácidas, se pudo realizar la simulación en un flash sin necesidad de un reactor.

Los balances de materia y energía obtenidos de la simulación fueron contrastados con los datos de planta, de esta forma se pudieron ajustar los flujos de las corrientes del proceso. Tanto la presión como la temperatura fueron tomadas directamente de los balances oficiales de empresa, para que el proceso se pueda aproximar al real. Mediante el ajuste de las corrientes, se determinó la incidencia que tenían los parámetros de operación y flujos de las corrientes en los resultados.

**Figura 2.6**

*Diagrama de flujo de la simulación del sistema actual en Aspen Plus®*



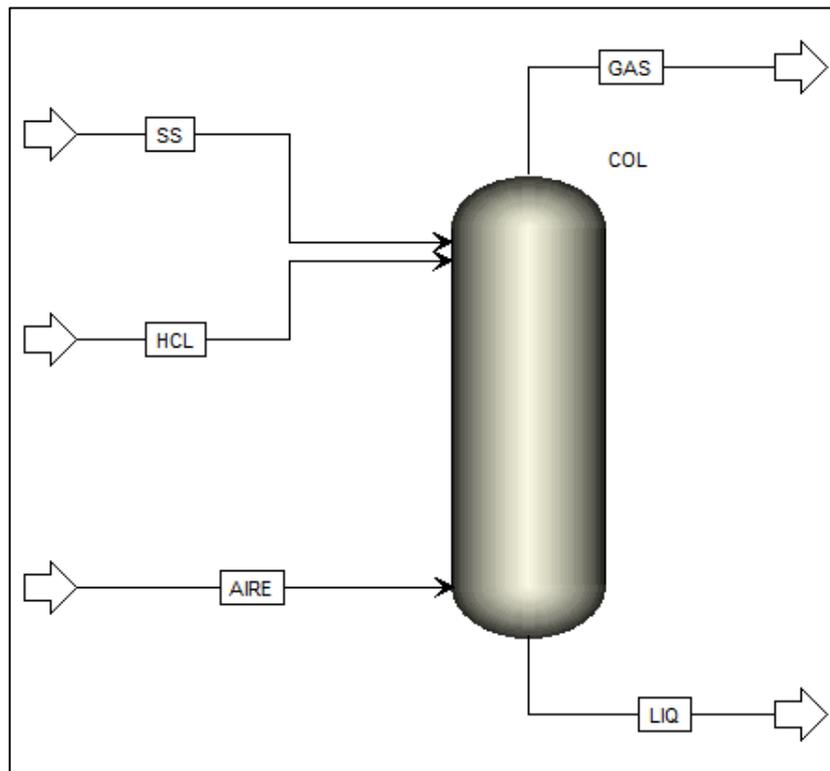
*Nota.* Captura de pantalla del diagrama de simulación del proceso actual.

Luego de la simulación del proceso real se procedió a sustituir el tanque flash por una columna empacada en el simulador. La columna se especificó con un número de etapas preliminar el cual se fue ajustando de acuerdo con los objetivos planteados. El tipo de empaque seleccionado fue el descrito en la sección anterior. El diámetro de la columna se calculó automáticamente basado en los flujos y condiciones de operación. La caída de presión fue ajustada de acuerdo con las gráficas hidráulicas de la columna. El flujo de aire se ajustó a  $10 \text{ Nm}^3 \text{ aire} / \text{m}^3$  de salmuera de salida, según recomendaciones de diseño para este sistema obtenidas referencias de la planta en Argentina. De esta forma, se garantizó que el punto de operación estaba dentro de los rangos aceptables según el diseño. Finalmente, se comprobó que los resultados

obtenidos presentaban una mejora significativa en la remoción de cloro con respecto al proceso actual.

### Figura 2.7

*Diagrama de flujo de la simulación del sistema propuesto en Aspen Plus®*

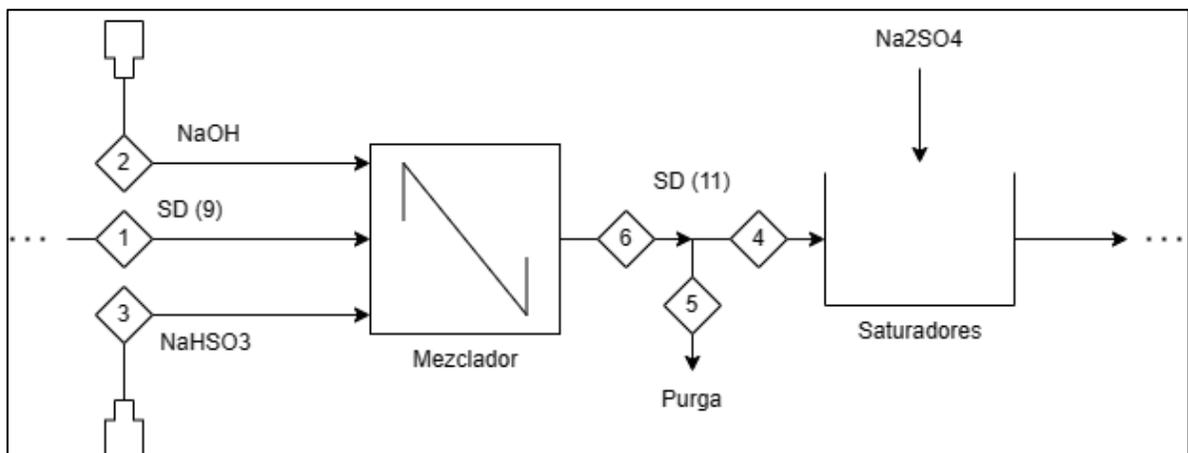


*Nota.* Captura de pantalla del diagrama de simulación del proceso propuesto.

## 2.7 Balance de materia

Los cálculos posteriores a la simulación están relacionados al balance de materia en la adición de soda y metabisulfito a la salmuera de clorada. Por medio del balance se relacionó la cantidad de cloro residual de la de cloración, la generación de sulfato de sodio y la purga. Estos procesos están ligados fuertemente al cloro residual, por lo que su disminución desencadenaría una serie de cambios en el balance de materia. De esta manera, si se logra reducir el cloro residual en la salmuera de clorada, la cantidad de metabisulfito utilizada para neutralizarlo disminuiría y se generarían menos sulfatos. Con estos resultados, se estimó la cantidad de purga necesaria para el sistema propuesto.

**Figura 2.8**



*Nota.* Diagrama de flujo de proceso del balance de materia para el análisis de la generación de sulfatos.

A partir de la purga estimada, se calcularon los ahorros económicos en insumos requeridos por la planta, considerando principalmente la sal y el metabisulfito de sodio. La

disminución del cloro residual afectaría directamente el consumo de metabisulfito de sodio como agente reductor, mientras que la reducción de la purga significaría un menor consumo de la sal.

La reacción que desencadena la producción de sulfatos de sodio comienza mezclando el metabisulfito de sodio con agua formando bisulfito de sodio:



Luego ocurren tres reacciones en serie que terminan de eliminar el cloro residual, formando como subproducto el sulfato de sodio:



# CAPÍTULO 3

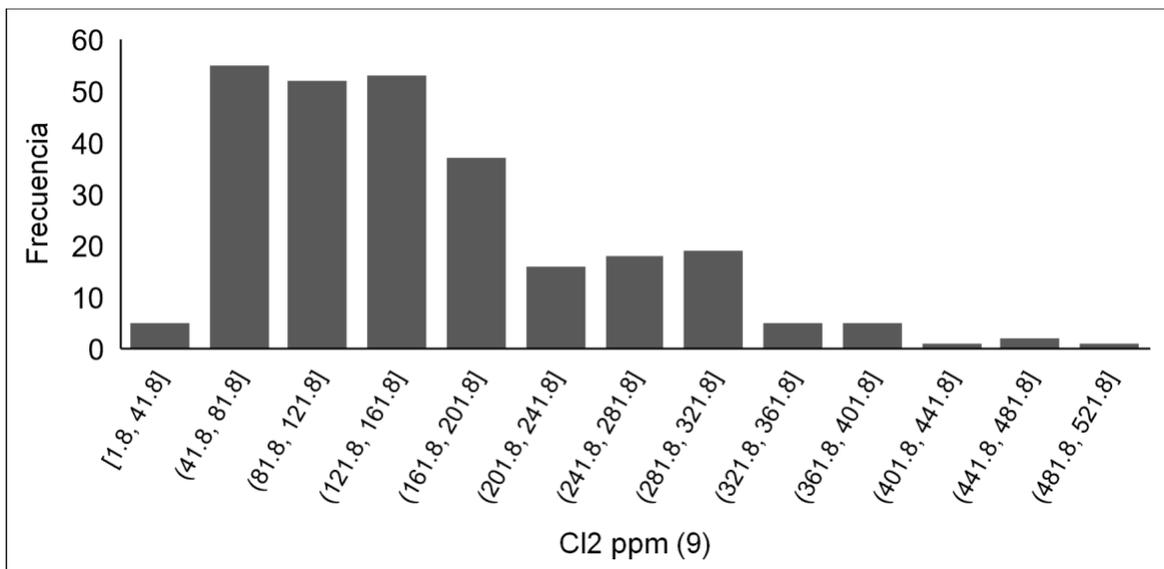
## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Análisis estadístico de datos para la validación del modelado

De los datos y análisis de laboratorio recopilados, se realizó un análisis estadístico de cloro libre y sulfato de sodio en salmuera declorada. Mediante gráficos, se representaron cantidades promedio, tendencias y frecuencias de estos datos tomados a lo largo de todo el año 2022. Esto confirmó los resultados obtenidos en las etapas de diseño de la columna y balance de materia sobre cloro libre y sulfatos. Los siguientes gráficos son análisis estadísticos del histórico de datos de la muestra de salmuera declorada (9).

**Figura 3.1**

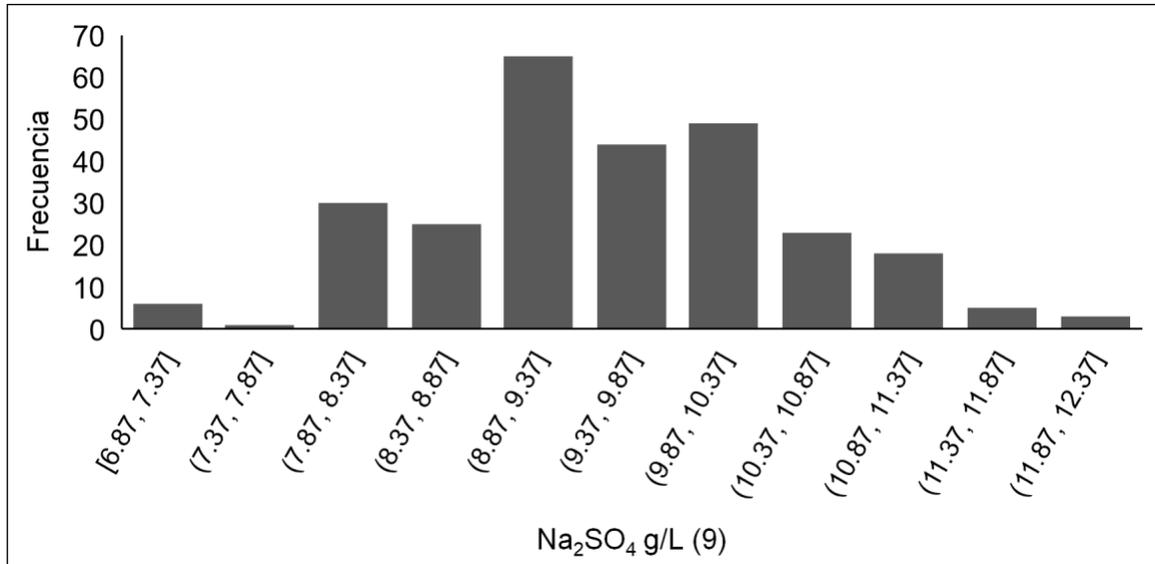
*Frecuencia de datos de Cl<sub>2</sub> ppm en salmuera declorada*



Nota. Datos más frecuentes de los análisis de  $Cl_2$  en salmuera dechlorada.

### Figura 3.2

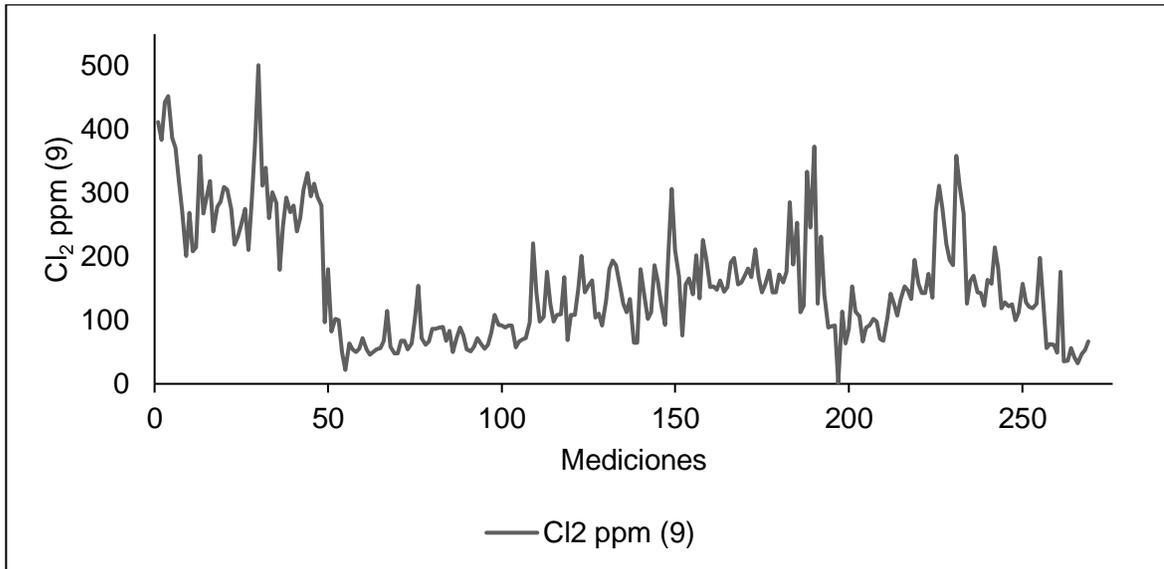
Frecuencia de datos de  $Na_2SO_4$  g/L en salmuera dechlorada



Nota. Datos más frecuentes de los análisis de  $Na_2SO_4$  en salmuera dechlorada.

### Figura 3.3

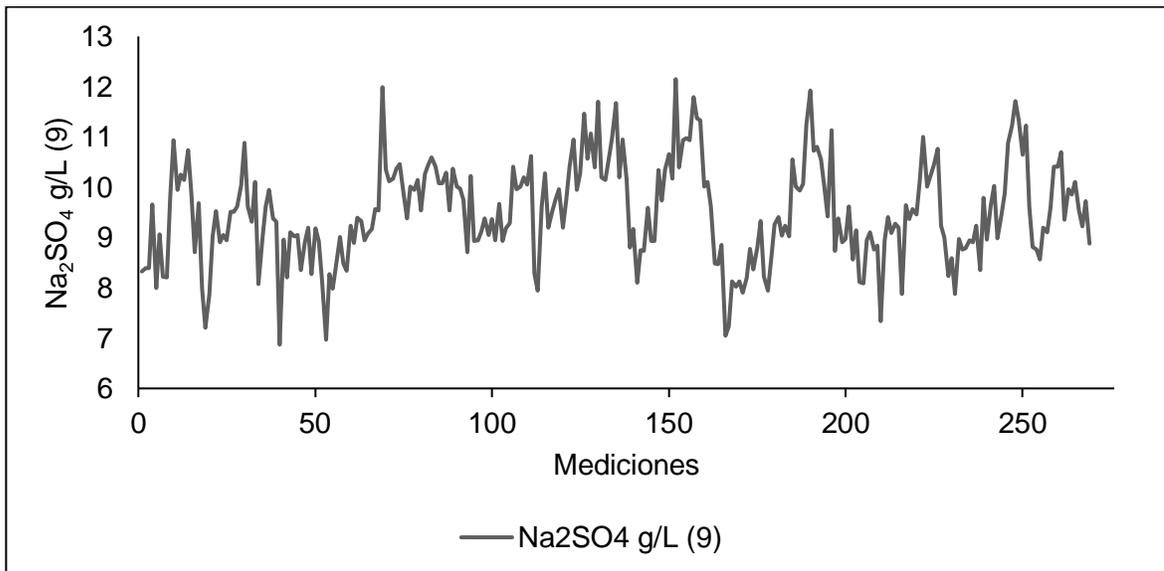
Histórico de datos de  $Cl_2$  ppm en salmuera dechlorada



*Nota.* Datos tomados desde diciembre del 2021 a diciembre del 2022.

**Figura 3.4**

*Histórico de datos de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> g/L en salmuera de clorada*



*Nota.* Datos tomados desde diciembre del 2021 a diciembre del 2022.

Con estos datos se verificó la frecuencia en ppm de cloro residual, estando en un rango de 40 a 160 para la mayoría de los datos. De manera similar, la frecuencia más alta de datos de concentración de sulfato de sodio se encuentra entre 8.87 y 10.37 g/L. Se calcularon los coeficientes de correlación entre estas variables para determinar si existe relación directa o indirecta:

**Tabla 3.1**

*Matriz de correlación de componentes en salmuera de clorada*

<b>Parámetro</b>	<b>pH</b>	<b>Cl<sub>2</sub> ppm (9)</b>	<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> g/L (9)</b>	<b>ClONa g/L (9)</b>
<b>pH</b>	1			
<b>Cl<sub>2</sub> ppm (9)</b>	-0.135	1		
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> g/L (9)</b>	0.023	-0.098	1	
<b>ClONa g/L (9)</b>	0.137	0.001	0.052	1

*Nota.* Matriz de correlación entre pH, cloro residual, sulfato de sodio e hipoclorito de sodio en salmuera de clorada.

Estos resultados indican que no existe una correlación, al menos directamente, entre el cloro residual y la concentración de sulfato de sodio. Sin embargo, el proceso de formación de sulfatos está ligado a la cantidad de cloro residual que se debe eliminar en la de cloración secundaria. Con esto, concluimos que este resultado de correlación muy bajo significa que los procesos y reacciones que toman lugar en la formación de los sulfatos son complejos, variando los resultados de las mediciones tomadas como se confirmó en la recolección de datos.

## **3.2 Resultados del diseño de la columna en Aspen Plus®**

### **3.2.1 Validación de resultados: simulación del sistema actual**

Durante la etapa inicial de desarrollo del modelo, se realizó la validación de la termodinámica para el sistema de decoloración, simulando el sistema actual de decoloración buscando obtener resultados de cloro residual similares a los de la planta. El valor de cloro residual fue ajustado con la corriente de aire comprimido de entrada al tanque decolorador hasta obtener un error menor al 10% que el existente en el balance de materia de planta.

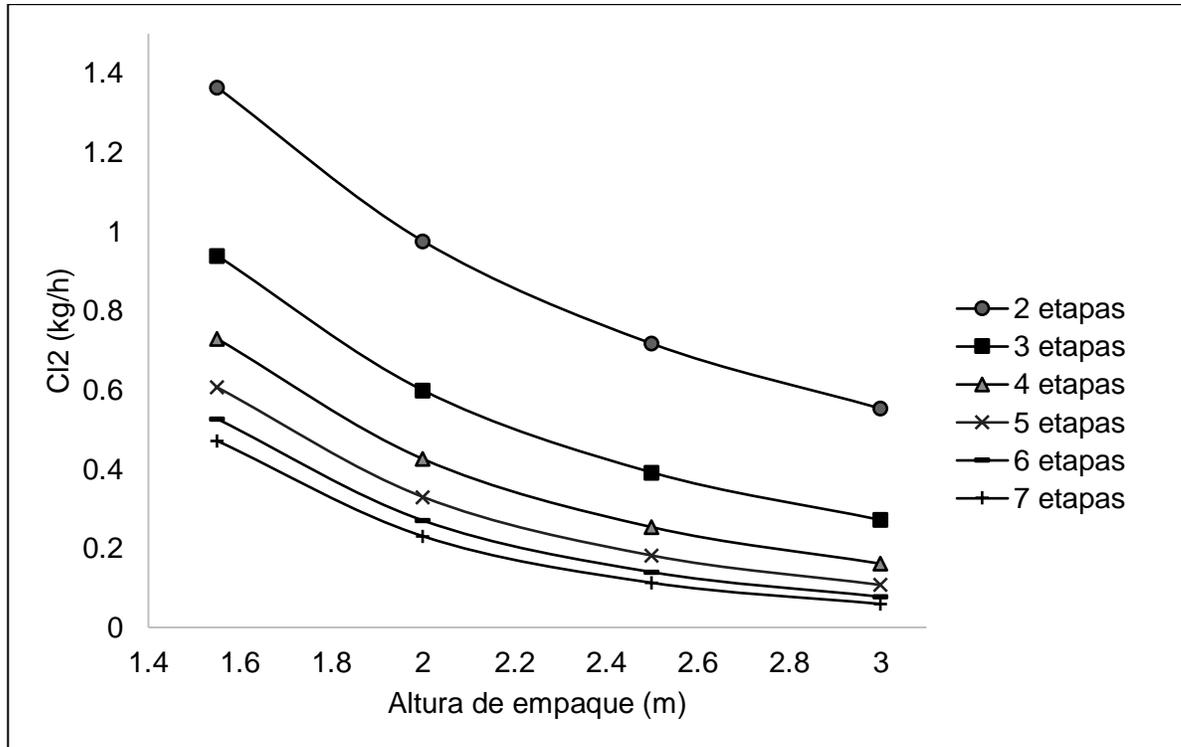
De esta manera, se obtuvo un valor de cloro residual de 0.2646 kg/h, teniendo un error de 8.75% respecto al valor del balance, de 0.29 kh/h Cl<sub>2</sub>. El flujo de aire obtenido mediante esta iteración tiene sentido, ya que actualmente se estima que está por debajo del valor recomendado de 10 Nm<sup>3</sup>/ton salmuera. Esto se ha comprobado con pruebas de aumento de flujo de aire en los tanques decoloradores en planta.

### **3.2.2 Diseño de la columna empacada**

Del balance de materia de la empresa, se tomó un valor estimado de cloro residual en salmuera decolorada para aproximar el diseño hacia la reducción de cerca del 50% de este valor. Es importante reconocer que este valor del balance es menor que los valores reales medidos durante el año, por lo que el cloro residual de la simulación es relativamente bajo y mucho menor al 50% del promedio del año.

**Figura 3.5**

*Estudio paramétrico sobre el efecto de la altura y las etapas de la columna empacada en la salida de cloro residual con la salmuera de clorada*



*Nota.* Datos obtenidos de Aspen Plus®.

La altura del empaque y el número de etapas en la columna fueron estimadas mediante la salida de cloro residual, de acuerdo con el estudio paramétrico. Según los resultados obtenidos, se observó que con más de 5 etapas la cantidad de cloro residual en salmuera no disminuyó significativamente, respecto a simulaciones con menos de 5 etapas. Por lo tanto, se optó por este valor para determinar la altura del empaque. A partir de una altura de 2.5 metros en adelante, no se obtuvieron reducciones significativas de cloro, como se puede observar la tendencia lineal en la figura 3.5. De esta forma, se

estableció que 2.5 metros de altura de empaque fue un valor óptimo para el diseño de la columna, entrando también dentro de los rangos aceptables según el espacio disponible para su ubicación en planta. Existen parámetros que no se consideraron en la simulación, como distribuidores de líquidos, soportes de empaque, las distancias del fondo y la zona superior de la columna, lo cual tiene un aporte significativo en su altura total.

A continuación, se detallan las alturas propuestas para las secciones superior e inferior en la columna.

**Tabla 3.2**

*Dimensiones de la columna empacada*

<b>Secciones</b>	<b>Altura (m)</b>
<b>Sección superior, incluyendo el distribuidor de líquido</b>	0.60
<b>Sección de empaque</b>	2.50
<b>Sección inferior</b>	0.75
<b>Total</b>	3.85

*Nota.* Los valores propuestos se encuentran por debajo de los límites máximos sugeridos por (Branan, 2012). Con esta altura se garantiza que la columna no causará interferencia con otros equipos ni tuberías.

Considerando estas decisiones de diseño, el cloro residual obtenido fue de 0.182 kg/h Cl<sub>2</sub>, que se traduce en una concentración de aproximadamente 21.5 ppm Cl<sub>2</sub>. Además, se obtuvieron los siguientes resultados de diseño de la columna:

**Tabla 3.3**

*Parámetros de diseño de la columna empacada*

<b>Empaque</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Fase inicial de la sección</b>	1	
<b>Etapas final de la sección</b>	5	
<b>Modo de cálculo</b>	Rating	
<b>Diámetro de columna</b>	0.36	m
<b>Altura empacada por etapa</b>	0.5	m
<b>Altura de sección</b>	2.5	m
<b>% de capacidad máxima (L/V constante)</b>	79.8159	
<b>% de capacidad máxima (L constante)</b>	58.5365	
<b>Factor de capacidad máxima (Cs)</b>	0.00829	m/s
<b>Pérdida de carga por sección</b>	0.00388	Bar
<b>Pérdida de carga media / Altura</b>	0.1903	pulg-agua/pie
<b>Pérdida de carga media / altura (fricción)</b>	0.1675	pulg-agua/pie
<b>Retención máxima del líquido de la etapa</b>	4.2283	L
<b>Velocidad superficial máxima del líquido</b>	83.9807	m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>

*Nota.* Tabla obtenida de resultados resumidos de columna empacada – Aspen Plus®.

El modo de cálculo especificado en la simulación es el de *rating*, de esta forma se simula la reacción entre el ácido clorhídrico con el ácido hipocloroso para desplazar el equilibrio de la reacción y favorecer la producción de cloro gas. La reacción se lleva a cabo en las 5 etapas de la columna.

Los porcentajes de máxima capacidad se relacionan con la cantidad de flujo que puede entrar a la columna. La relación L/V se refiere a los flujos de líquido y vapor, mientras que L solo hace referencia al líquido. La relación L/V también se puede aproximar como el porcentaje de inundación con el cual la columna va a operar y dado que se está cercano al 80%, se encuentra dentro de los límites sugeridos.

El factor de capacidad  $C_s$ , de acuerdo con Aspen Plus, indica la velocidad de inundación y depende principalmente del tipo de empaque utilizado y la densidad del gas. En este caso, se utilizó anillos pal de cerámica de forma aleatoria. La velocidad de inundación es extremadamente baja dado que se está trabajando con flujos de gas relativamente bajos en comparación a la entrada de líquido.

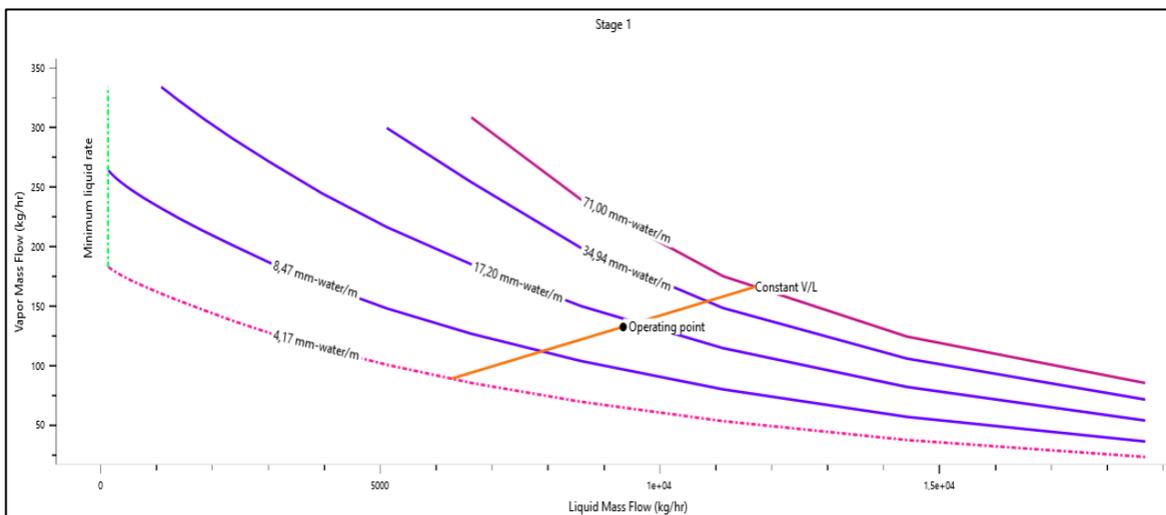
La pérdida de carga, también conocida como caída de presión, se debe principalmente a las retenciones que puede haber en los empaques y la fricción generada por el gas a través de los empaques. Para que la columna funcione correctamente, la caída de presión debe ser menor a la presión de entrada del aire, de esta forma el camino del aire no se obstruye a lo largo de la columna. Dado que hay una caída de presión de 0.00388 bar, esta se encuentra por debajo de la presión de entrada del aire (6.1 Bar).

La velocidad superficial de líquido es una medida que representa la velocidad de entrada del líquido a la columna y está relacionada con el flujo y el diámetro de la tubería. Este es un parámetro que se utiliza habitualmente en diseño de tuberías. La velocidad del líquido dependerá del área de la tubería dado que son inversamente proporcionales; esto quiere decir que, a menor área de tubería, mayor será la velocidad.

En caso de haber retención en alguna etapa de la columna, el volumen máximo que podría soportarse es de 4.23 L. Si este valor se excede, se produciría inundación en la columna, lo cual aumentaría la caída de presión afectando directamente la separación de cloro.

**Figura 3.6**

*Gráfica hidráulica de la primera etapa de la columna empacada*

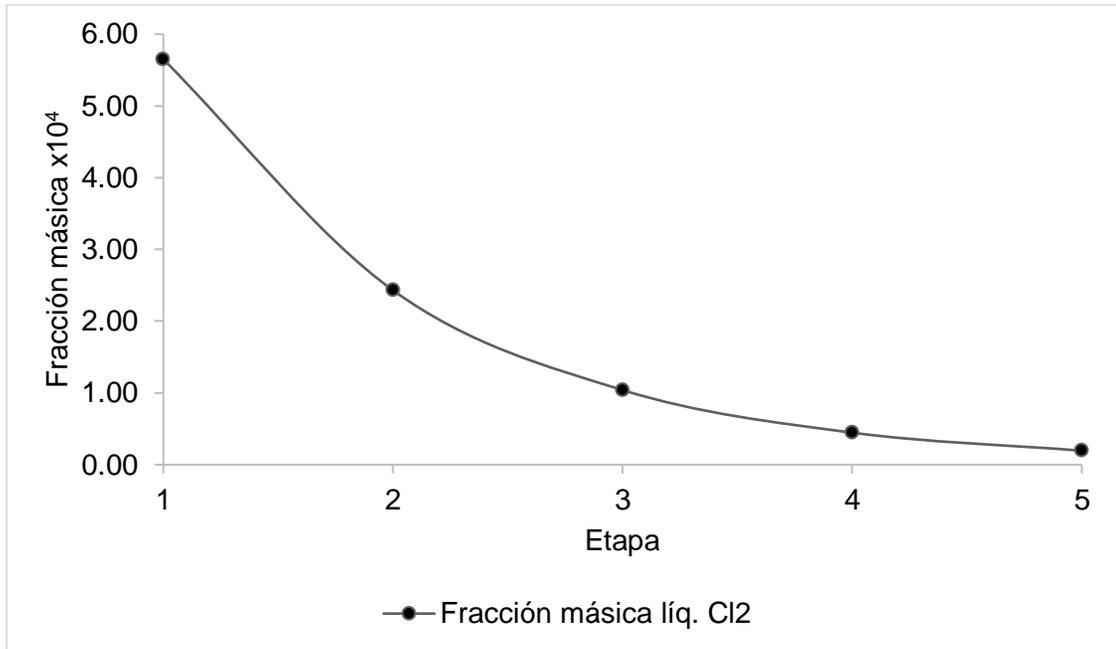


*Nota.* Obtenido de Aspen Plus®.

La gráfica de hidráulicos en Aspen plus muestra una relación entre los flujos de vapor y de líquido en cada etapa. De esta forma se establece la línea de operación de la columna y los límites en los cuales la etapa se empezaría a inundar. Las líneas que atraviesan la recta de operación son las caídas de presión que se producen en cada etapa. Por lo tanto, el punto de operación al encontrarse dentro los límites hidráulicos permite que haya estabilidad en las etapas. En Aspen plus la columna se muestra completamente azul cuando todas sus etapas tienen estabilidad. Cuando el punto de operación se aproxima al límite la etapa correspondiente se torna color amarillo. Finalmente, si el punto de operación está fuera de los límites la etapa se torna roja indicando que hay errores en el diseño.

### **Figura 3.7**

*Perfil de composición de  $Cl_2$  en la fase líquida a lo largo de las etapas de la columna empacada*

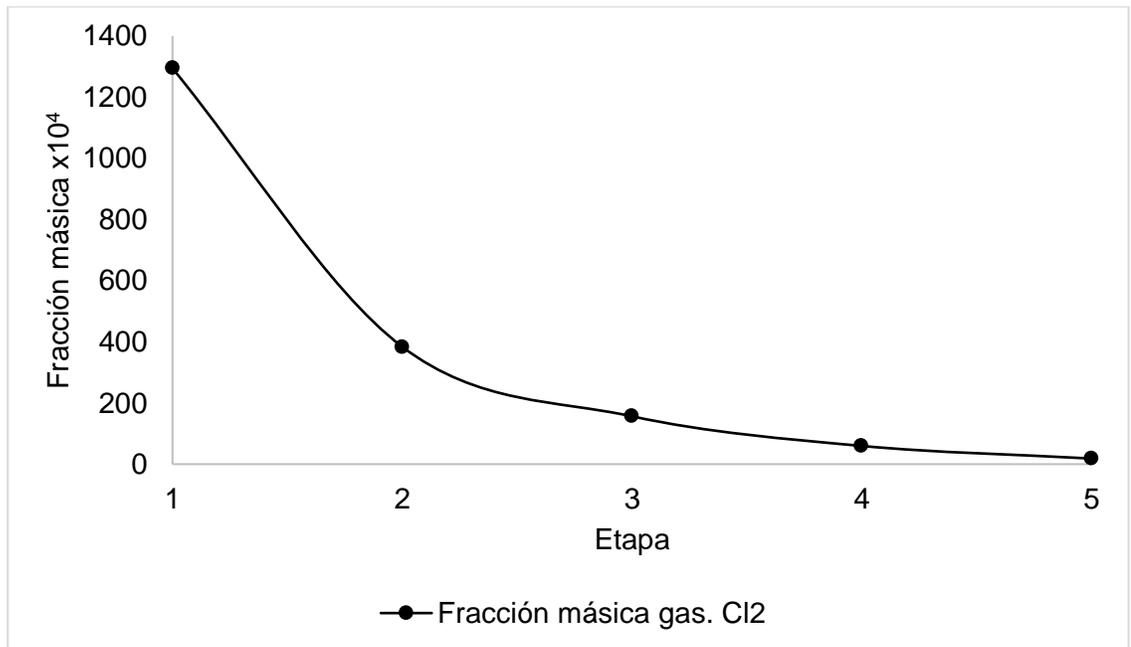


Nota. Obtenido de Aspen Plus®.

En la figura 3.7 se muestra como la fracción másica de cloro va disminuyendo a lo largo de las etapas. La salmuera que ingresa al sistema cuenta con un porcentaje de cloro disuelto, por ello la fracción másica es mayor a la entrada. A medida que el flujo recorre las etapas y entra en contacto con los empaques y el aire se produce el desplazamiento de cloro. Al llegar a la etapa cinco, la salida de la columna, la fracción de cloro se encuentra extremadamente reducida.

**Figura 3.8**

*Perfil de composición de  $Cl_2$  en la fase gaseosa a lo largo de las etapas de la columna empacada*

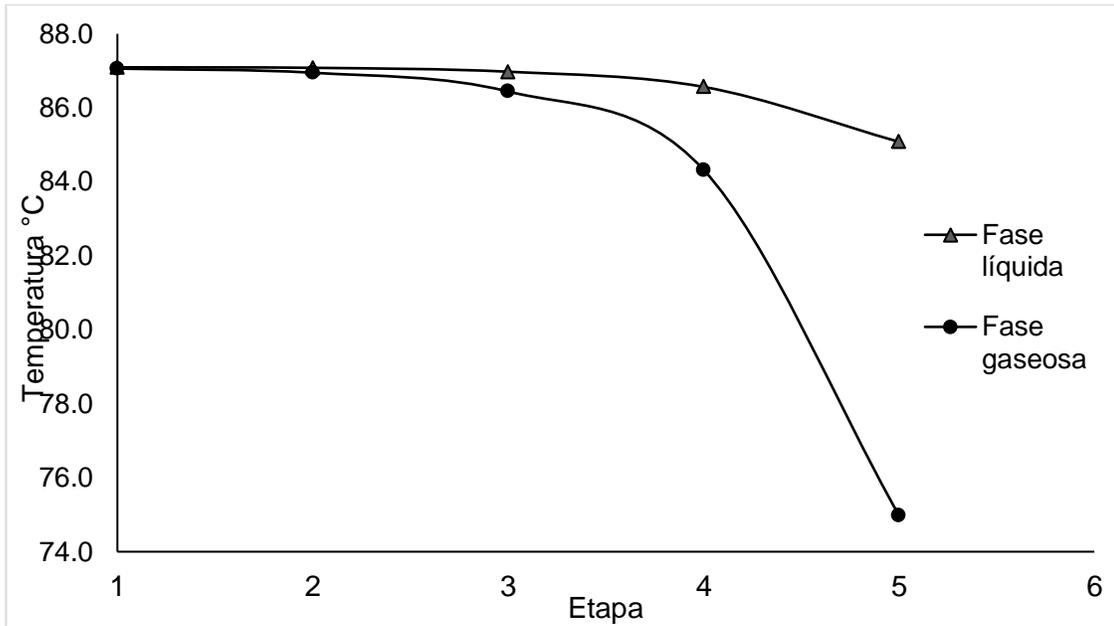


*Nota.* Datos obtenidos de Aspen Plus®.

La figura 3.8 es análoga a la figura 3.7 ya que ahora se muestra la fracción másica del cloro en la fase gaseosa. El flujo de aire entra desde la parte inferior y recorre las cinco etapas. Durante este recorrido, produce el desplazamiento del cloro debido a que se perturba el equilibrio al reducir la presión parcial de cloro en cada etapa. Este efecto provoca que sea desplazado y se redireccione hacia la salida de gas de la columna. Como se esperaba observar, la fracción másica es mayor en la primera etapa dado que es la que contiene mayor cantidad de cloro.

### **Figura 3.9**

*Perfil de temperatura a lo largo de las etapas de la columna*

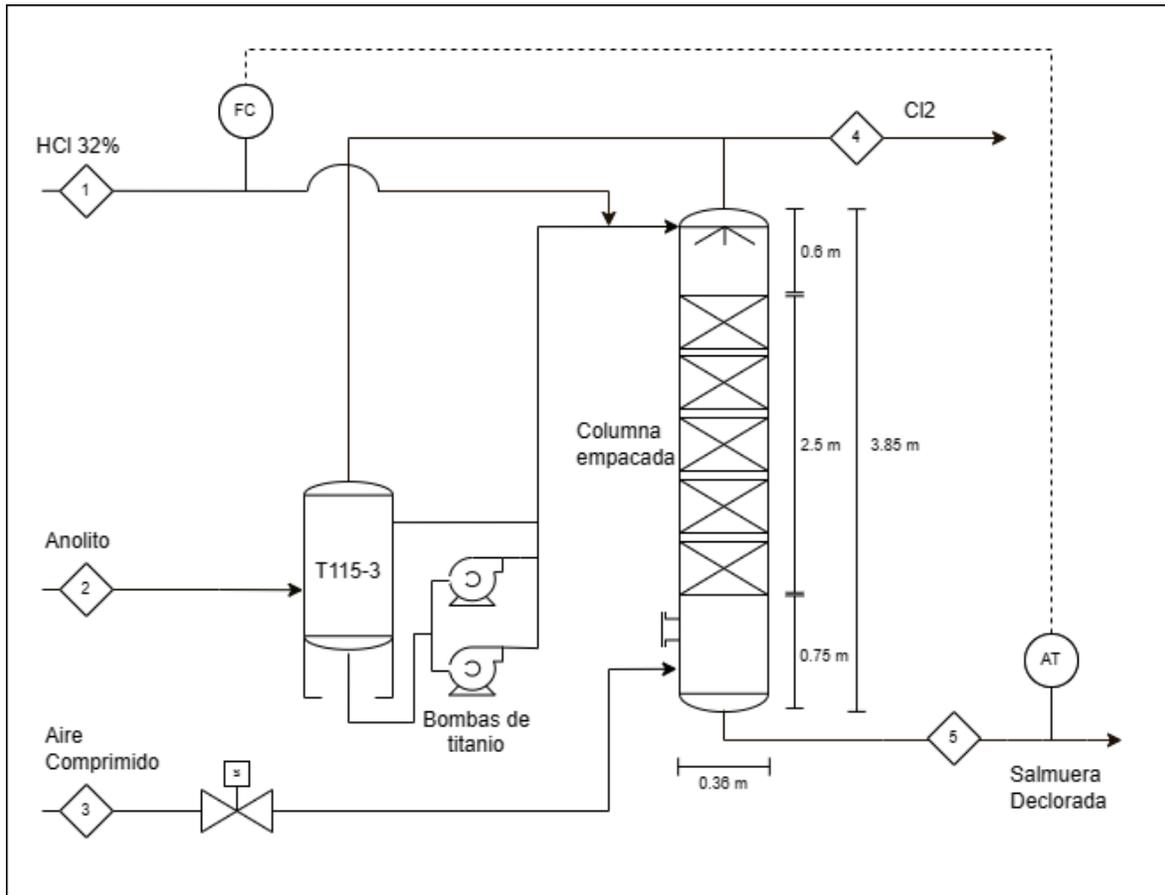


*Nota.* Datos obtenidos de Aspen Plus®.

La figura 3.9 muestra los perfiles de temperatura del cloro en la fase de vapor y en la fase líquida. Dado que las salmueras junto con el cloro disuelto entran a la columna con 87 °C, se espera observar un descenso debido a que se genera transferencia de calor tanto con los empaques como la corriente de aire. En la fase de vapor se observa un cambio más brusco de temperatura, esto se debe a que el aire está entrando a temperatura ambiente. Por lo tanto, se genera un gradiente de temperatura mayor que el de la salmuera dado que este entra también en menor proporción. Ambos flujos llegan al equilibrio en la primera etapa.

**Figura 3.10**

*Diagrama de flujo de proceso del sistema de dechloración propuesto.*



*Nota.* Este esquema busca explicar de manera simplificada la propuesta para la implementación de la columna empacada en lugar de los tanques de dechloración.

El sistema propuesto está diseñado en base a los elementos existentes en planta, utilizados en el sistema actual de dechloración. La línea de aire comprimido es la misma que distribuye el aire a los tres tanques dechloradores, de tal manera que se concentrará todo el flujo de aire en la columna. La ubicación del sistema se acopló al

espacio disponible y los elementos existentes en la zona de los decoloradores. Entre estos, están las tuberías de cloro e hidrógeno que pasan por encima, los toma muestras de salmuera y el electrolizador.

De acuerdo con estas limitaciones espaciales, se planteó el sistema propuesto en la ubicación tentativa del tanque T115-2 (tercer tanque decolorador), donde no tendría obstrucciones en la parte superior con las tuberías existentes. El espacio para colocar las bombas de salmuera de salida hacia la columna estuvo planteado en la ubicación del segundo tanque decolorador (T115-4), dejando así al T115-3 como el único remanente del sistema actual. Este último tendría la nueva función como tanque reservorio para que la bomba de titanio siempre tenga líquido y no cavite. La salmuera decolorada tuvo el mismo destino que en el sistema actual, cayendo directamente al tanque T-116 de salmuera decolorada y siguiendo el ciclo normal del proceso de tratamiento de salmuera.

Considerando estos criterios, la construcción e implementación del nuevo sistema estuvo cotizada colocando nuevas tuberías y accesorios en toda la etapa de decoloración primaria, reemplazando las actuales para mejorar su tiempo de vida y mantenimiento.

### **3.3 Efectos de la columna en la decoloración secundaria y purga de salmuera**

Se realizó el balance de materia para el proceso actual, enfocándose en la adición de la soda y el bisulfito de sodio como se detalló en el capítulo 2. Se partió con el cálculo estequiométrico de cloro residual ( $Cl_2$ ) utilizando los análisis de laboratorio sobre contenido de sulfato de sodio antes y después de la adición de metabisulfito de sodio en

la salmuera de clorada. Con esta generación de sulfatos durante la eliminación del cloro, se calcularon las cantidades de las demás especies presentes. El valor de cloro estequiométrico estuvo dentro del rango promedio del histórico de datos de planta, confirmando que los cálculos realizados estaban acorde al proceso. Los valores más importantes obtenidos en esta sección de los cálculos fueron la cantidad de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  generada, cantidades de  $\text{NaOH}$  y  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  consumidas y cantidad de  $\text{NaCl}$  purgada.

**Tabla 3.4**

*Resumen del balance de sulfato de sodio*

<b>Proceso Actual</b>					
	<b>Entrada (1)</b>	<b>Salida del mezclador (6)</b>	<b>Salida (4)</b>	<b>Purga (5)</b>	<b>Generación</b>
<b>Flujo <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math> (kg/h)</b>	68.3590	62.6870	70.9255	8.223	2.5665
<b>Concentración <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math> (g/L)</b>	8.0900	8.2233	8.2233	8.2233	
<b>Proceso Propuesto</b>					
	<b>Entrada (1)</b>	<b>Salida del mezclador (6)</b>	<b>Salida (4)</b>	<b>Purga (5)</b>	<b>Generación</b>
<b>Flujo <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math> (kg/h)</b>	68.3590	63.5210	68.7230	5.192	0.3640
<b>Concentración <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math> (g/L)</b>	8.0900	7.9883	7.9883	7.988	

*Nota.* Número de corrientes considerando la [figura 2.8](#).

La tabla 3.4 habla sobre cómo se comporta el sulfato de sodio previo y posterior a la adición de metabisulfito de sodio y soda, tanto para el proceso actual como para el

propuesto. En la actualidad, se observa que existe un aumento de 2.5665 kg/h de sulfato de sodio en promedio durante esta fase de dechloración secundaria y hay un aumento de entre 4.65 y 5.25 kg/h entre las corrientes de salida y entrada del balance. Este aumento se debe principalmente a la sal introducida al proceso, que viene con un promedio de alrededor de 0.3% de sulfato de sodio en masa. Considerando los flujos volumétricos de las corrientes, se obtiene una concentración de entrada y salida de 8.09 g/L y 8.22 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> respectivamente.

En la segunda parte de la tabla se expresan las mismas variables, pero para el sistema propuesto. Se obtuvo una cantidad de salida de sulfato de sodio mucho menor de 0.3640 kg/h, debido a su generación reducida por la cantidad de cloro residual por eliminar. Esto repercute directamente en la purga de salmuera, que tendrá la misma concentración que la salida (6). Las concentraciones obtenidas en este caso fueron de 8.09 g/L y 7.9883 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para entrada y salida al balance respectivamente. Aquí se observó una disminución en la concentración, lo cual es beneficioso para el sistema ya que está en constante movimiento por la cantidad de sulfato introducida en los saturadores de salmuera.

**Tabla 3.5**

*Resultados de porcentajes de reducción*

<b>Componente kg/h</b>	<b>Actual</b>	<b>Propuesto</b>	<b>%</b>
<b>Cl<sub>2</sub></b>	1.28108447	0.1817	85.82%

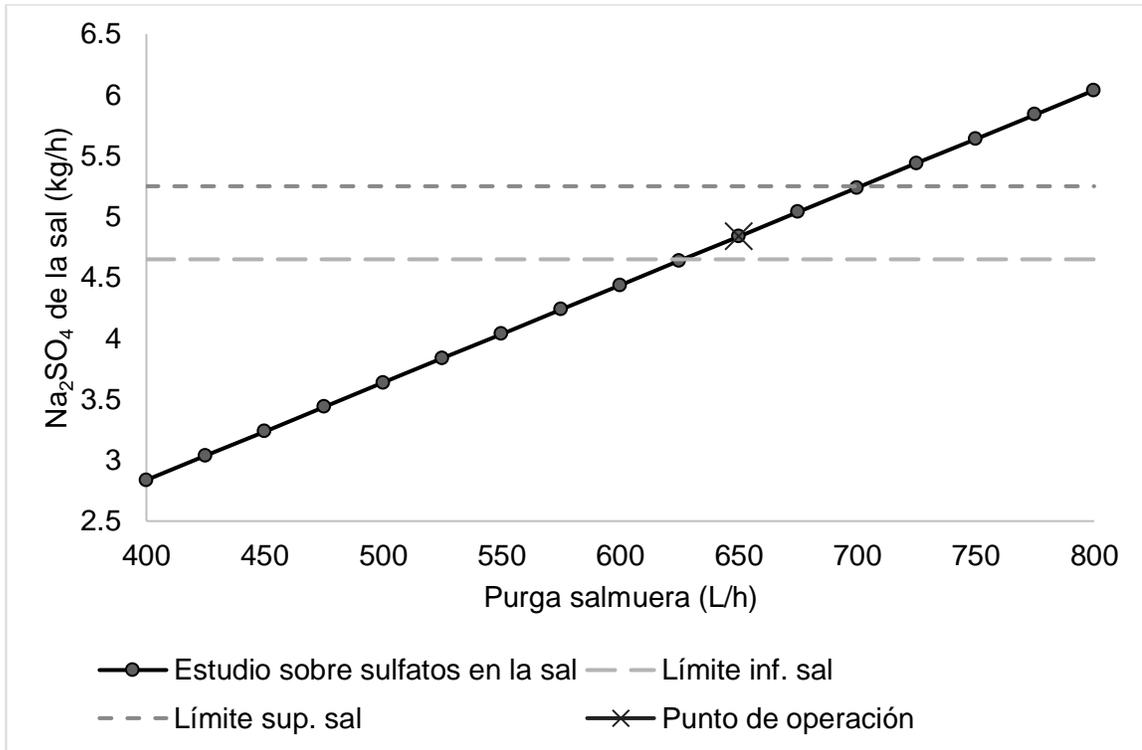
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	2.56650548	0.364015063	85.82%
<b>NaOH</b>	2.16826708	0.307531735	85.82%
<b>Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	2.82258065	1.44	48.98%
<b>NaCl (purga)</b>	205	133.25	35.00%

---

De acuerdo con los resultados de la tabla 3.4, se calcularon los porcentajes de reducción de las variables de interés. Se obtuvieron reducciones del 85.82% para el cloro residual en la salmuera declorada y la generación de sulfato de sodio, evidenciando su relación de dependencia. Estas reducciones permitieron calcular los nuevos consumos de soda cáustica y metabisulfito de sodio. Así, se consiguió un porcentaje de 85.82% de ahorro en NaOH y 48.98% en Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, manteniendo las condiciones normales de operación que incluyen un pH neutro y un exceso de bisulfito de sodio en el sistema similar al del proceso actual de aproximadamente 1.21 kg/h NaHSO<sub>3</sub>. Finalmente, se calculó la purga en relación con estos resultados, con un porcentaje de 35% de reducción.

### **Figura 3.11**

*Estudio del balance de materia para la estimación de la purga*



*Nota.* Mediante este gráfico, se realizó la estimación de una purga óptima según la cantidad de sulfato de sodio proveniente de la sal en el caso de estudio.

Utilizando el estudio paramétrico presentado en la figura 3.10, se consideró el valor óptimo de purga como 650 L/h de salmuera de clorada, obteniendo los resultados presentados en la tabla 3.4 como flujo de sulfato de sodio purgado en la corriente 5, y la tabla 3.5 como porcentajes de reducción de las variables de interés. Se optó por este valor ya que se encontraba dentro del rango de variabilidad de sulfato de sodio proveniente de la sal, por lo que los resultados de la hoja de cálculo tienen sentido respecto al proceso real. Así, ya que la cantidad de sulfato de sodio ingresada al proceso mediante la sal no será una variable que se pueda alterar, los cálculos están acorde a este valor.

### 3.4 Estimación de costos de construcción de la columna

**Tabla 3.6**

*Costos relacionados a la construcción de la columna*

<b>Sección</b>	<b>Precio</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Columna CPVC con recubrimiento de fibra de vidrio</b>	\$19,254	16.91%
<b>Empaque</b>	\$2,000	1.76%
<b>Bombas</b>	\$30,000	26.35%
<b>Tuberías</b>	\$4,000	3.51%
<b>Estructura, soportes y base de bombas</b>	\$10,000	8.78%
<b>Manómetros</b>	\$400	0.35%
<b>Montaje de tuberías y equipos</b>	\$10,000	8.78%
<b>Importaciones</b>	\$7,500	6.59%
<b>Valor provisional</b>	\$5,690	5.00%
<b>Mantenimiento preventivo</b>	\$25,000	21.96%
<b>Total</b>	\$113,844	100.00%

*Nota.* Valores aproximados y estimaciones de los costos del proyecto.

El costo de la columna empacada se aproximó utilizando la relación de la capacidad en el coste de los equipos adquiridos, también llamada ecuación de Williams (Turton et al., 2013):

$$\frac{C_a}{C_b} = \left(\frac{P_a}{P_b}\right)^{0.6} \quad (3.1)$$

Donde:

$C_a$  y  $C_b$  son los costos de la planta o equipos.

$P_a$  y  $P_b$  son los parámetros característicos de la planta o equipos (volumen, potencia, flujos, entre otros).

$n$  es el exponente de Williams de acuerdo con el tipo de equipo.

Se tomó como referencia el costo de construcción de una planta cloro soda de argentina la cual opera con un caudal de salmuera aproximadamente seis veces al actual. El exponente de Williams es de 0.6 debido a que se trata de una columna, además es utilizado frecuentemente en equipos como una regla de 0.6 (*six-tenths rule*) (Turton et al., 2013). De esa forma, se estimó un costo de aproximadamente \$19,254.00.

Las bombas son un gasto significativo en la construcción de la columna, ya que por su ubicación es necesario llevar la salmuera hacia la entrada del equipo a aproximadamente cuatro metros de altura. Son necesarias dos bombas en paralelo, ya que de esa forma existe un respaldo en caso de que la bomba falle y para que se puedan realizar mantenimientos preventivos en la bomba fuera de servicio. El material de las bombas fue de titanio, debido a la corrosividad del cloro presente en la salmuera y se colocaron previo de la entrada de ácido clorhídrico para evitar cavitación debido al cloro gas.

De datos provenientes del área de proyectos de la empresa, se realizaron estimaciones de costos para las tuberías, accesorios y estructuras de base o soporte. Esto representa aproximadamente una cuarta parte de los gastos de la construcción de la

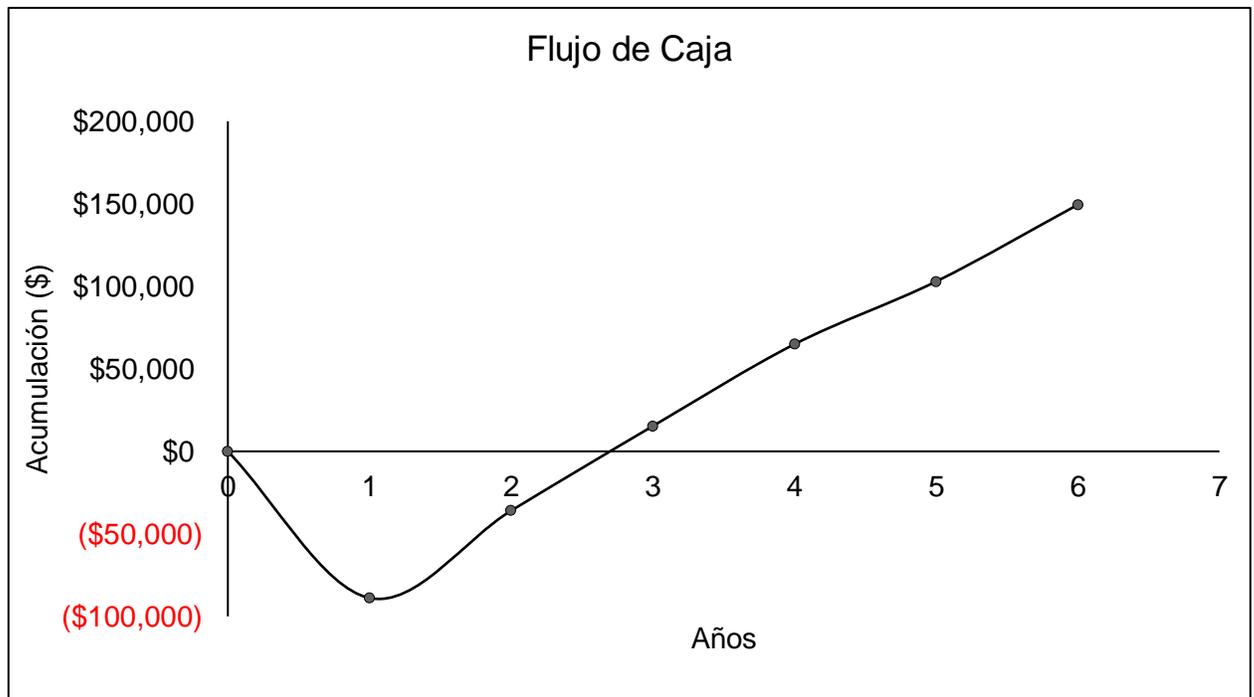
columna. Debido al ambiente corrosivo al que serán expuestas las tuberías y la temperatura elevada, es necesario que sean de CPVC. Este material es resistente al calor y puede soportar líquidos y gases corrosivos, en este caso la salmuera clorada.

Se realizó una estimación de los gastos de mantenimiento e imprevistos, llegando a un total de \$25,000.00. Para el mantenimiento se estimó a partir de los repuestos de las zonas que tienen mayor probabilidad de averiarse por uso constante. En el caso de la columna, para la columna es necesario realizar limpieza de incrustaciones en las entradas y salidas del equipo para evitar aumento de pérdida de carga. Las bombas deben tener un mantenimiento anual para asegurar su correcta operación, el estado de los componentes internos y limpieza. Entre los imprevistos se tienen valores aproximados de importación de materiales y repuestos, así como un valor provisional en caso de ser necesario algún gasto extra.

### 3.5 Análisis de rentabilidad del proyecto

Figura 3.12

Flujo de caja del proyecto



Nota. Gráfica de inversión y recuperación con estimaciones de costos.

En la figura 3.12, se presenta el flujo de caja que se realizó para saber la rentabilidad de la columna empacada para la remoción de cloro. Se estableció un periodo de 6 años dado que en ese tiempo se deben realizar mantenimientos más rigurosos en los equipos. La inversión inicial que corresponde a los valores estimados en la sección anterior es de aproximadamente \$113,844.00.

Esta inversión se realiza en el primer año, que se estimó no tendrá ganancias debido a que se plantea la construcción y pruebas de la columna. Esta inversión sería totalmente responsabilidad de la empresa, mediante el apoyo de contratistas y

empresas que realicen la implementación y montaje de los equipos nuevos. A partir del segundo año, se observa un retorno relativamente rápido debido a los ahorros de reactivos y salmuera del proceso. Finalizando el segundo año se observa que la inversión fue recuperada y se empiezan a generar ganancias.

Las ganancias generadas en la gráfica no presentan un comportamiento lineal debido a que se consideró una inflación del 3% en cada año. Esta tasa de inflación se aproximó a partir de datos proporcionados por la empresa, en los cuales se analizaban precios de materiales y reactivos a lo largo de los años. Para el sexto año, se habrán generado ganancias aproximadas de \$149,465.00.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Importancia del proyecto

La industria cloro-soda es muy antigua y ha evolucionado con el pasar de los años, mejorando sus procesos y haciéndolos más seguros. Sin embargo, no existe mucha información disponible respecto a la implementación del proceso en simuladores, ya sea para el diseño de equipos u optimización del proceso. El hecho de implementar la herramienta de simulación en esta industria ayuda a modernizar las plantas y ahorra costos de implementación ya que el número de pruebas para analizar el comportamiento del proceso disminuyen al realizarse de manera digital.

En este trabajo se estableció como objetivo el diseño de un sistema de decoloración primaria utilizando Aspen Plus®. Al finalizar, se consiguieron los parámetros necesarios para el diseño de una columna empacada, utilizando el software mencionado junto con criterios de ingeniería aplicada al diseño de columnas. Al disponer de las especificaciones del equipo y su eficiencia, en cuento a remoción de cloro, se ajustaron las cantidades de reactivos y purgas necesarias para tratar la salmuera. Esto conlleva a que se generen ahorros considerables para la empresa al optimizar sus recursos.

El uso de simuladores implica una manera alternativa de aproximar procesos y diseños de equipos en la industria. Al tratarse de programas con cálculos automatizados se disminuye la probabilidad de error comparada con la ingeniería clásica y sus cálculos extensos. Sin embargo, es importante conocer adecuadamente el proceso para interpretar los resultados obtenidos y que estos estén acorde a las estimaciones iniciales.

El factor económico es un punto clave en el desarrollo de proyectos. En este caso, es importante justificar la inversión que se va a realizar si se decide construir la columna empacada. Por ello se disponen de herramientas como el flujo de caja, retorno de inversión y fórmulas de escalado para aproximar precios. Si bien un equipo puede tener un alto rendimiento, no es viable económicamente si el retorno de la inversión no se va a dar en un tiempo razonable debido a la depreciación de la maquinaria.

## **4.2 Conclusiones**

Mediante toma de datos, simulación de procesos, balances de materia y cálculos financieros, se diseñó eficientemente un sistema de decoloración primaria de salmuera clorada para la planta cloro soda del caso de estudio. Mediante esta propuesta, se obtuvieron considerables mejoras en el ciclo de salmuera, incluyendo mayor flujo de recirculación y menor consumo de químicos utilizados en la etapa de decoloración secundaria. Estos resultados fueron posibles gracias a la eficiencia de transferencia de masa del lecho empacado en la columna propuesta.

Para aquello, fue necesario verificar la veracidad de los resultados del simulador Aspen Plus® realizando la correspondiente simulación del sistema actual de decoloración. Mediante este modelado, se comparó la eficiencia de remoción de cloro y se obtuvo que la columna empacada tiene la capacidad teórica de remover un 85.82% más de cloro que el sistema actual. Esto representa una reducción del 35% de la purga actual, dejando un valor de 650 L/h.

Con estos resultados de cloro residual obtenidos, se estimaron los balances de materia en la etapa de decoloración secundaria, en especial considerando la generación

de sulfato de sodio y consumo de soda cáustica y metabisulfito de sodio. De esta manera, se obtuvieron reducciones de consumo del 85.82% y 48.98% de NaOH y  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  respectivamente, mientras que se generó un 85.82% menos de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

De acuerdo con los resultados obtenidos del diseño de la columna respecto al balance de materia, se analizó la rentabilidad del proyecto considerando costos varios para su implementación en la planta. Estos incluyeron costos de la columna como tal, el empaque y los equipos y accesorios necesarios para su funcionamiento, además del mantenimiento de estos componentes. Con esto, se llegó a la conclusión de que, entre el segundo y tercer año, se recuperará la inversión, que tiene un valor de \$113,844.00.

#### **4.3 Aspen Plus® en el diseño de equipos y sus limitaciones**

Entre las ventajas del uso de este software de simulación, una importante es el hecho de que la simulación puede adaptarse a distintas condiciones de operación, por ejemplo: distintos flujos, concentraciones, presiones y temperaturas. Esto permite que se simulen distintos ambientes de operación y analizar como respondería el proceso a los cambios.

Otra ventaja que se aprovechó durante la elaboración de este proyecto fue la facilidad de cálculo del tamaño adecuado de la columna empacada. Para ello, fueron necesarios solamente los flujos másicos y condiciones de operación, además de las reacciones involucradas. Mediante los modelos internalizados en el programa, se calcularon automáticamente porcentajes de inundación, perfiles de concentración y temperatura a lo largo de las etapas de la columna, y composiciones de los componentes

a la entrada y salida. Esto nos dio resultados importantes para los cálculos posteriores en el balance de materia.

Aspen Plus® proporciona herramientas para análisis tecnológicos complejos. Sin embargo, estas se encuentran en versiones especiales, por lo que es complicado tener acceso a estas herramientas sino se dispone de una licencia. Existen diversos compuestos que el simulador no posee en su base de datos, por esa razón hay reacciones y procesos que no son simulados adecuadamente. Para este trabajo, se tuvo problemas con el metabisulfito de sodio y su reacción con el cloro, debido a que no existía información termodinámica relacionada a presiones de vapor, temperaturas críticas, coeficientes de actividad, entre otras.

Un inconveniente que se esperaba que ocurra es la imposibilidad de simular exactamente las reacciones químicas que ocurren simultáneamente en la planta. Si bien un ambiente simulado trata de acercarse a la realidad en lo posible, no se pueden considerar todas las reacciones secundarias y posteriores que ocurren en el equilibrio. Dado que el proceso de producción de cloro es muy complejo y se presentan varias reacciones, en ocasiones el simulador entra en conflicto con las mismas y se producen resultados que se alejan de los valores esperados. Por ello, las reacciones se ajustaron para que los valores más importantes se acerquen a los valores de planta y así los resultados proporcionados por Aspen Plus® tengan sentido físico.

Para el diseño de equipos o procesos hay accesorios y equipos auxiliares con los que Aspen Plus® no cuenta. Por este motivo, los diseños son aproximaciones que pueden ser de mucha ayuda para realizar estimaciones o cotizaciones para la implementación real. Con la información proporcionada por parte de la empresa, se

diseñó una columna empacada que es capaz de tratar el caudal de salmuera con el que opera la planta y reducir los niveles de cloro en más de un 90% con respecto al proceso de dechloración actual.

El software utilizado facilitó parámetros de diseño como: el diámetro de la columna, la altura del empaque, caídas de presión y velocidades de flujo superficial. Además, se realizó un análisis paramétrico para determinar cuáles serían las medidas correctas del empaque en base a la remoción de cloro.

La información dada por aspen permitió realizar un balance de materia en el proceso de dechloración secundaria, con lo que se estimó una reducción en la purga de la planta que se traduce en ahorros económicos, debido a la disminución en las cantidades de reactivos necesarias para remover el cloro residual en salmuera. El ahorro en reactivos se debe principalmente a la disminución del consumo hidróxido de sodio y metabisulfito de sodio para esta finalidad. Por medio de un análisis de rentabilidad, se determinó que el proyecto es bastante rentable, ya que la inversión se recupera a partir del segundo a tercer año.

#### **4.4 Recomendaciones y futuro del proyecto**

Se recomienda que, para el diseño de columnas en Aspen Plus®, se verifique el análisis hidráulico cada una de las etapas, ya que de esta forma se puede saber si va a haber un nivel de inundación dentro de los rangos recomendados, o si los flujos son los adecuados para la columna según su tamaño.

Es recomendable que, al finalizar el diseño de la columna, se tomen en cuenta diversos accesorios que son necesarios para la construcción de columnas en general, como: los distribuidores de líquido, aspersores, soportes para el empaque, entre otros. Para este caso en específico, se debe considerar el uso exclusivo del titanio para este tipo de elementos internos en la columna, por la corrosión generada a causa de la presencia de salmuera clorada.

Cuando se trabajan con múltiples reacciones electrolíticas en Aspen Plus®, se recomienda utilizar el asistente “ELECTRO WIZARD”, ya que este facilitará la adición de los productos de las reacciones. Antes de iniciar con el proceso de diseño del equipo, se debe validar el modelo termodinámico a utilizar. De esta forma, los resultados obtenidos van a ser certeros y servirán como referencia para la futura implementación del proyecto en la planta.

En caso de que se necesite realizar un diseño mucho más riguroso, se recomienda obtener las licencias de los paquetes adicionales de Aspen Plus®. Estos paquetes proporcionan más herramientas para análisis económicos, eficiencia energética, entre otros.

# BIBLIOGRAFÍA

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Baird, R., Eaton, A., Rice, E., y Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association.

<https://doi.org/https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.079>

Balbi, G., y Rodríguez, L. (2013). Informe Ambiental Resumen de EFICE S.A. . rep. San José, Uruguay: *Estudio Ingeniería Ambiental*, 17-26.

Branan, C. (2012). *Rules of Thumb for Chemical Engineers* (3ra ed.). New York: Elsevier Science.

Brinkmann, T., Santonja, G. G., Schorcht, F., Roudier, S., y Sancho, L. D. (2014). Best available techniques (BAT) reference document for the production of chlor-alkali. *JRC (Joint Research Center EU)*, JRC91156., 25-39; 213-234. <https://doi.org/10.2791/13138>

Chaves, I., López, J., Zapata, J., Robayo, A., y Niño, G. (2016). hermodynamic and Property Models. . *Process Analysis and Simulation in Chemical Engineering.*, 71.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-14812-0\\_2](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-14812-0_2)

Chuncho Juca, L., Uriguen Aguirre, P., y Apolo Vivanco, N. (2021). Ecuador: análisis económico del desarrollo del sector agropecuario e industrial en el periodo 2000-2018.

*Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 8(1), 08-17. <https://doi.org/DOI>

0.26423/rctu.v8i1.547

Dardel, F. (n.d.). *El Intercambio iónico, Principios Básicos*. Intercambio iónico: información general y principios. : [http://dardel.info/IX/IX\\_Intro\\_ES.html](http://dardel.info/IX/IX_Intro_ES.html)

- Diaz, A. e. (2011). Parámetros requeridos en el diseño de separadores para manejar mezclas gas-líquido. *rep. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral*, 2-5.
- Flodman, H. R., y Dvorak, B. I. (2012). Brine reuse in ion-exchange softening: Salt discharge, hardness leakage, and capacity tradeoffs. *Water Environment Research*, 84(6), 535-543. <https://doi.org/https://doi.org/10.2175/106143012x13373550427354>
- Ghosal, S. K., y Datta, S. (2011). Introduction to Chemical Engineering. McGraw-Hill Education.
- Hausmann, R., y Klinger, B. (2010). *Structural Transformation in Ecuador*. Inter-American Development Bank.
- Kansara, N., Bhati, L., Narang, M., y Vaishnavi, R. (2016). Wastewater treatment by ion exchange method: a review of past and recent researches. *ESAIJ (Environmental Science: An Indian Journal)*, 12(4), 143-150.
- Karlsson, R. K., y Cornell, A. (2016). Selectivity between oxygen and chlorine evolution in the chlor-alkali and chlorate processes. . *Chemical Reviews*, 116(5), 2982–3028. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00389>
- Kundu, S. K. (2010). Corrosion control of electrolyzer, anolyte tank and Dechlorination Tower Tank of a chlor-alkali plant by an innovative method. *Journal of Chemical Engineering*, 1, 37-41. <https://doi.org/https://doi.org/10.3329/jce.v24i0.5583>
- Lakshmanan, S., y Murugesan, T. (2013). The chlor-alkali process: Work in progress. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(2), 225-234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10098-013-0630-6>

Madaeni, S., y Kazemi, V. (2008). Treatment of saturated brine in chlor-alkali process using membranes. *Separation and Purification Technology*, 61(1), 68-74.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.09.028>

O'Brien, T. F. (1990). Dechlorination of brines for membrane cell operation. . *Modern Chlor-Alkali Technology*, 251–270. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-009-1137-6\\_21](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-009-1137-6_21)

O'Brien, T. F., Bommaraju, T. V., y Hine, F. (2005). *Handbook of Chlor-Alkali Technology*. New York: Springer.

Paidar, M., Fateev, V., y Bouzek, K. (2016). Membrane electrolysis—history, current status and perspective. . *Electrochimica Acta*, 209, 737-756.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.05.209>

Paz, G. (1998). *Proceso de Secado de Cloro Gaseoso y Manejo de Soda Caustica*. ESPOL.

Ramaswamy, S., Huang, H.-J., y Ramarao, B. V. (2013). *Separation and purification technologies in biorefineries*. John Wiley & Sons, Ltd.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118493441>

Treybal, R. (2004). *Equipos para las operaciones gas líquido* (2da ed.). New York: McGraw-Hill.

Turton, R., Shaeiwitz, J., Bhattacharyya, D., y Whiting, W. (2013). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes* (5ta ed.). Boca Raton, FL: Pearson Education International.



# APÉNDICES

## APÉNDICE A

**Figura 5.1**

*Analista de laboratorio realizando análisis de sulfato de sodio en salmuera*



**Figura 5.2**

*Reunión con gerente cloro soda de Argentina*



**Figura 5.3**

*Reunión con el jefe de planta del caso de estudio junto al tutor de tesis*



**Figura 5.4**

*Planta cloro-soda del caso de estudio.*



**Figura 5.5**

*Tanques decloradores, sistema actual de decloración de salmuera.*

