

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Dr. Andrés Ramírez Madrid

Ingenieros Supervisores

Cristian Nanjari Zamora

Francisco Pizarro Soza

**DESCRIPCIÓN TÉCNICA Y OPERATIVA DEL
SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS
PLANTA DESALADORA MLP**

JONATAN ALEXIS FERNÁNDEZ SÁEZ

Informe de Memoria de Título para optar al Título de
Ingeniero Civil Metalúrgico

Concepción, Agosto de 2025

Agradecimientos

A mis padres, Victoria y Enio, por ser mis mentores, mi soporte y mi inspiración. Sin su amor incondicional, su cariño y su crianza, no sería la persona que soy ni la que algún día llegaré a ser. Gracias por estar siempre presentes, por creer en mí y por su apoyo incondicional; espero seguir dándoles alegrías y orgullo.

A mis hermanos, por su cariño, apoyo constante, sus palabras de aliento y su preocupación.

A mis mascotas, Lupe y Manchas. Su amor fue, es y será siempre una luz de esperanza en los momentos en que todo se vea gris.

A todas las personas que conocí en este proceso: a aquellas con las que formé lazos duraderos que trascendieron la universidad, a quienes fueron buenos compañeros de estudio y a todos con quienes simplemente coincidí durante este tiempo.

A Constanza, pilar fundamental en mi camino por la universidad. Gracias por tu amor, tu apoyo incondicional y por ser el faro que me mantuvo a flote cuando sentía que todo perdía el sentido. Estaré agradecido toda la vida.

A mis mejores amigos, Nicolás y Rodrigo; su compañía, soporte y noches de risas fueron, muchas veces, justo lo que necesitaba para seguir adelante, gracias por siempre estar dispuestos a escucharme aunque repitiera una y otra vez las mismas cosas.

A Vicente y Javier, mis primeros amigos de la universidad que trascendieron para convertirse en amigos de vida. Compartir ramos hizo que nos conociéramos, pero las piscinas nos unieron.

A "Metalebrios", el grupo que comenzó como una excusa para juntarse a tomar y se convirtió en lo más cercano a una segunda familia.

A Pablo, por su amistad incondicional, por hacerme sentir como en casa, por las conversaciones interminables y por entender mi forma de ver el mundo; lo que la cerveza unió, que nada lo separe.

A Nicole, porque aunque nos conocimos hace relativamente poco, su apoyo y compañía durante mi estadía en Minera Los Pelambres fueron fundamentales.

A mis profesores, quienes con su dedicación y disposición para enseñar hicieron que me enamorara de la carrera. En especial, a mi profesor guía, Dr. Andrés Ramírez Madrid, por su apoyo constante, tanto en lo académico como en lo personal.

A mis tutores de Minera Los Pelambres, Cristian y Francisco, por su tiempo, apoyo y por compartir

generosamente sus conocimientos durante la realización de esta memoria.

A todos los que están y estuvieron, gracias. Siempre llevaré una parte de cada uno conmigo. Espero que sigamos compartiendo experiencias, riendo, amando y jugando, pero sobre todo, que continuemos creciendo juntos como personas.

”Una lección sin dolor no tiene sentido. Eso es porque no se puede ganar algo sin sacrificar algo a cambio. Sin embargo, una vez que hayas soportado el dolor y lo hayas superado, ganarás un corazón que es más fuerte que todo lo demás. Así es, un corazón de acero.” -Edward Elric

Resumen

La presente memoria de título aborda el análisis técnico y operativo del sistema de tratamiento de lodos de la planta desaladora de Minera Los Pelambres. El diagnóstico inicial reveló una cascada de deficiencias interconectadas: la unidad de Flotación por Aire Disuelto (FAD) operaba con una presión en los saturadores un 22% por debajo de su valor de diseño, mientras que los equipos de la línea de deshidratación se encontraban fuera de servicio, impidiendo la purga efectiva de sólidos del sistema.

Para cuantificar el impacto de la principal desviación detectada, se evaluó el rendimiento del sistema FAD en dos escenarios: pre y post-ajuste de la presión de los saturadores. El análisis demostró que la corrección de este parámetro al valor de diseño de 4.5 bar generó una mejora radical en el proceso. La eficiencia de captura de sólidos aumentó de manera estadísticamente significativa de un 27.1% a un 52.5% y, de forma crucial, el sistema pasó de un estado de alta volatilidad a una operación estable y predecible. Paralelamente, y para resolver la falta de purga, se desarrollaron planes estructurados de Puesta en Marcha (PEM) para los equipos de deshidratación de lodos.

Se concluye, por tanto, que la presión de saturación era un parámetro limitante y una de las causas principales de la ineficiencia e inestabilidad de la unidad FAD. Su corrección es una acción fundamental que habilita el correcto funcionamiento de la etapa de separación. En consecuencia, la estrategia de optimización propuesta es doble: en primer lugar, mantener la operación a la presión de diseño de forma permanente y, en segundo lugar, iniciar la puesta en marcha del sistema de deshidratación de lodos utilizando los protocolos PEM desarrollados, como acción clave para asegurar la gestión global de sólidos de la planta.

Abstract

This thesis addresses the technical and operational analysis of the sludge treatment system at the Minera Los Pelambres desalination plant. The initial diagnosis revealed a cascade of interconnected deficiencies: the Dissolved Air Flotation (DAF) unit operated with a saturator pressure 22% below its design value, while the dewatering equipment was out of service, preventing an effective solids purge from the system.

To quantify the impact of the main deviation detected, the DAF system's performance was evaluated in two scenarios: pre- and post-adjustment of the saturator pressure. The analysis showed that correcting this parameter to the design value of 4.5 bar led to a radical improvement in the process. The solids capture efficiency showed a statistically significant increase from 27.1% to 52.5%, and crucially, the system transitioned from a state of high volatility to a stable and predictable operation. Concurrently, to address the lack of a purge system, structured Commissioning Plans (PEM) were developed for the sludge dewatering equipment.

It is concluded, therefore, that the saturator pressure was a limiting parameter and one of the main causes of the DAF unit's inefficiency and instability. Its correction is a fundamental action that enables the proper functioning of the separation stage. Consequently, the proposed optimization strategy is twofold: first, to permanently maintain operation at the design pressure, and second, to initiate the commissioning of the dewatering system using the developed protocols, as a key action to ensure the overall management of solids in the plant.

Lista de Abreviaciones

Abreviación	Descripción
DAF	Dissolved Air Flotation (Término en inglés para FAD).
DCS	Distributed Control System (Sistema de Control Distribuido).
FAD	Flotación por Aire Disuelto. Proceso de separación sólido-líquido.
HSE	Health, Safety, and Environment (Salud, Seguridad y Medio Ambiente).
I&C	Instrumentation and Control (Instrumentación y Control).
INCO	Proyecto Infraestructura Complementaria de Minera Los Pelambres.
IOM	Installation, Operation, and Maintenance (Instalación, Operación y Mantenimiento).
KPI	Key Performance Indicator (Indicador Clave de Rendimiento).
MLP	Minera Los Pelambres.
NTU	Nephelometric Turbidity Units (Unidades Nefelométricas de Turbidez).
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram (Diagrama de Tuberías e Instrumentación).
PEM	Plan de Puesta en Marcha. Metodología para el comisionamiento de equipos.
PLC	Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable).
RO	Reverse Osmosis (Ósmosis Inversa). Tecnología de desalinización.
TSS	Total Suspended Solids (Sólidos Suspendidos Totales).
UF	Ultrafiltración. Proceso de filtración por membranas.
VDF	Variable Frequency Drive (Variador de Frecuencia).

Índice

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo General	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
2	Marco Teórico	4
2.1	El Agua como Recurso Estratégico en la Minería	4
2.2	Tecnologías de Desalinización de Agua de Mar	5
2.3	Fundamentos de las Operaciones Unitarias Clave	8
2.3.1	Acondicionamiento Químico: Coagulación y Floculación	8
2.3.2	Separación por Flotación por Aire Disuelto (FAD)	9
2.3.3	Espesamiento y Deshidratación de Lodos	9
2.4	Antecedentes de la empresa	10
2.4.1	Contexto Operacional de Minera Los Pelambres	10
2.4.2	Análisis de las Etapas de Generación y Tratamiento de Lodos en MLP	12
2.4.3	Manejo de Lodos: Espesamiento y Deshidratación	13
3	Metodología	16
3.1	Fase 1: Diagnóstico del Sistema	16
3.1.1	Levantamiento y Procesamiento de Información	16
3.2	Fase 2: Diseño de Metodología para Plan de Puesta en Marcha (PEM)	18
3.3	Fase 3: Evaluación de Rendimiento y mejora	18
3.3.1	Balace de Materia y Fórmulas de Cálculo	18
3.3.2	Evaluación del Efecto de Parámetros Operacionales en la Unidad FAD	19
4	Resultados	21
4.1	Resultados del Diagnóstico del Sistema	21
4.2	Metodología Propuesta para Plan de Puesta en Marcha (PEM)	25

4.3	Resultados de la Evaluación de Rendimiento y Optimización	26
4.3.1	Análisis del Rendimiento del Sistema	29
4.3.2	Análisis Conjunto de Indicadores de Rendimiento	31
4.3.3	Comparación Gráfica del Rendimiento	32
5	Conclusiones y Recomendaciones	34
5.1	Conclusiones	34
5.2	Recomendaciones	35
	Referencias	37
A	Análisis de Regresión Adicionales para TSS vs. Turbidez	40
A.1	Modelo Logarítmico	41
A.2	Modelo Exponencial	42
A.3	Modelo Polinomial de Grado 2	43
B	Planes de Puesta en Marcha (PEM)	44
B.1	Plan de Puesta en Marcha - Espesador de Lodos	44
B.2	Plan de Puesta en Marcha - Centrífuga	50
C	Balance de Masa de Diseño (INCO)	59
D	Datos Operacionales para Balances de Materia	62

Índice de Tablas

1	Condiciones de operación de diseño para el FAD en MLP [27]	13
2	Comparación de parámetros de diseño vs. operacionales	21
3	Balance de Materia Teórico de la Planta	28
4	Balance Real Pre-Ajuste de Saturadores	30
5	Balance Real Post-Ajuste de Saturadores	31
6	Comparación del Indicador de Rendimiento Pre y Post-Ajuste	31

Índice de Figuras

1	Usos de agua en Chile [14]	5
2	Esquema desalación por destilación [16]	6
3	Principio de funcionamiento RO [17]	7
4	Esquema proceso Electrodiálisis [21]	7
5	Diagrama de bloques de la planta desaladora MLP [27]	11
6	Unidad de FAD estándar en MLP [27]	12
7	Diagrama del sistema de tratamiento de lodos en MLP [27]	14
8	Diagrama de Flujo Metodológico.	17
9	Dispersión de datos históricos entre la concentración de Sólidos Suspendidos Totales (TSS) y la Turbidez (NTU).	23
10	Evidencia fotográfica de la acumulación de lodos en el tanque de retrolavado sucio; (a) Vista superior de la acumulación de lodos y (b) Detalle de la consistencia del lodo y espuma.	24
11	Diagrama de balance de materia teórico para el sistema de tratamiento de lodos.	28
12	Diagrama de balance de materia de la operación real del sistema.	29
13	Comparación de la eficiencia de remoción vs. tiempo para los escenarios pre y post-ajuste.	32
14	Ajuste de tendencia con modelo logarítmico para la relación TSS vs. Turbidez.	41
15	Ajuste de tendencia con modelo exponencial para la relación TSS vs. Turbidez.	42
16	Ajuste de tendencia con modelo polinomial de grado 2 para la relación TSS vs. Turbidez.	43
17	Tabla de propiedades del balance de masa de diseño (Corrientes 1 a 3B).	60
18	Tabla de propiedades del balance de masa de diseño (Corrientes 21B a 27A).	61

Capítulo 1

Introducción

La industria minera del cobre es un pilar fundamental para la economía de Chile; sin embargo, su desarrollo y sostenibilidad enfrentan un desafío crítico: la creciente escasez hídrica, problemática que se intensifica por el hecho de que gran parte de las operaciones mineras se emplazan en zonas de aridez extrema. lo que ha impulsado una transición estratégica desde el uso de aguas continentales hacia el aprovechamiento de agua de mar como fuente principal para sus procesos [1, 2]. Esta transición no solo responde a una necesidad operativa, sino también a un imperativo de responsabilidad ambiental y comunitaria, buscando mitigar el impacto sobre los recursos hídricos locales. En este contexto, la construcción y operación de plantas desaladoras a gran escala se ha convertido en una solución tecnológica indispensable para garantizar la viabilidad a largo plazo del sector minero [3, 4].

La tecnología predominante para la desalinización de agua de mar a escala industrial es la ósmosis inversa (RO, por sus siglas en inglés), un proceso basado en membranas que exige una calidad de agua de alimentación muy alta para evitar el ensuciamiento (fouling) y asegurar su integridad y vida útil [5, 6]. Por esta razón, la etapa de pretratamiento es un componente de gran importancia en el diseño de cualquier planta desaladora [6]. Un pretratamiento robusto típicamente incluye etapas de acondicionamiento químico, como la coagulación y floculación [7, 8], seguidas de un proceso de separación sólido-líquido para remover las partículas suspendidas y coloidales.

Dentro de las alternativas para la separación sólido-líquido, la Flotación por Aire Disuelto (FAD o DAF, por sus siglas en inglés) se ha posicionado como una tecnología de vanguardia, especialmente adecuada para el tratamiento de aguas de mar. Su eficacia radica en la remoción de partículas de baja densidad, como materia orgánica y células de algas, que son comunes en fuentes de agua superficial y difíciles de tratar mediante sedimentación convencional [9, 6]. No obstante, la aplicación de la FAD en un medio de alta salinidad presenta desafíos únicos. La solubilidad del aire en agua de mar es significativamente menor que en agua dulce, lo que exige ajustes de diseño, principalmente la operación de los saturadores a una presión considerablemente mayor para

asegurar una generación de microburbujas adecuada y estable [10]. Un manejo inadecuado de estos parámetros puede comprometer severamente la eficiencia del proceso de pretratamiento.

Un pretratamiento eficiente genera, como subproducto inevitable, un flujo continuo de lodos que concentra los sólidos removidos del agua de mar. La gestión de estos lodos es tan importante como la clarificación del agua misma, ya que una remoción ineficiente provoca la acumulación de sólidos dentro del sistema, desestabilizando la operación y afectando la calidad del agua que alimenta las etapas posteriores [11]. El proceso FAD, en particular, es conocido por producir un lodo flotado más denso y compacto en comparación con otras tecnologías [6, 9], lo que subraya la necesidad de un sistema de deshidratación bien diseñado y operado, compuesto típicamente por etapas de espesamiento y centrifugación [12].

La presente memoria de título se centra en el análisis técnico y operativo del sistema de tratamiento de lodos de la planta desaladora de Minera Los Pelambres (MLP), una infraestructura clave para la minería en la zona central de Chile [3, 13]. Se postula que las deficiencias en el rendimiento de este sistema están directamente relacionadas con desviaciones en parámetros operacionales críticos de la unidad FAD, particularmente la presión de los saturadores. Para abordar esta problemática, se realizó un diagnóstico del estado actual del sistema, se evaluó cuantitativamente su rendimiento bajo diferentes condiciones operativas y se desarrolló una metodología para la puesta en marcha de los equipos de deshidratación. El objetivo final es proponer una estrategia de mejora que permita optimizar la operación, asegurar la estabilidad del proceso y contribuir a la sostenibilidad global de la planta desaladora.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

- Analizar técnica y operativamente el sistema de tratamiento de lodos de la planta desaladora MLP, con el fin de identificar deficiencias en su rendimiento actual y proponer estrategias de mejora.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Diagnosticar el estado actual del sistema de tratamiento de lodos mediante el levantamiento sistemático y análisis crítico de información técnica (planos, manuales, filosofías de operación), datos operativos históricos y actuales, y observaciones de campo.

2. Desarrollar una metodología para el diseño de un plan de comisionamiento y puesta en marcha (PEM) para los subsistemas de espesamiento y deshidratación de lodos (espesador y centrifugas), identificando las actividades, pruebas críticas y criterios de aceptación.
3. Evaluar el rendimiento y la estabilidad del sistema de pretratamiento mediante balances de masa, para determinar la influencia de la presión de operación en la unidad FAD y fundamentar una estrategia de mejora del proceso.

Capítulo 2

Marco Teórico

Este capítulo establece el contexto y los fundamentos teóricos necesarios para comprender el sistema de tratamiento de lodos en una planta desaladora por ósmosis inversa. Se abordan los principios generales de la desalinización y las operaciones unitarias clave, como la flotación, el acondicionamiento químico, la filtración y la centrifugación, que son la base para el análisis del caso de estudio.

2.1 El Agua como Recurso Estratégico en la Minería

El agua es un recurso de vital importancia para la industria minera. Debido a la escasez hídrica en las zonas donde se emplazan los principales yacimientos del país, la industria ha experimentado una transición estratégica, migrando desde el uso de fuentes de agua continentales hacia el agua de mar como suministro principal para sus operaciones [1]. Las dos principales formas de aprovechamiento son el uso directo de agua de mar y, de forma predominante para la minería del cobre, el uso de agua desalada. Aunque la minería no es el principal consumidor de agua a nivel nacional, como se observa en la Figura 1, este cambio de paradigma hacia el uso de recursos hídricos no continentales es fundamental para garantizar la sostenibilidad y viabilidad a largo plazo del sector.

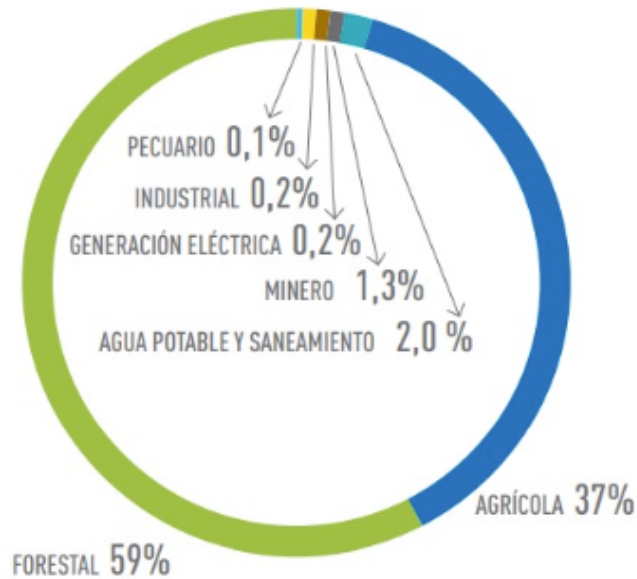


Figura 1: Usos de agua en Chile [14]

2.2 Tecnologías de Desalinización de Agua de Mar

El proceso de desalación es el paso clave para el uso de agua de mar en minería. Existen diversos tipos de procesos para llevar a cabo esta tarea. Las principales son [5, 11]:

- **Procesos térmicos (Destilación):** El principio de funcionamiento consiste en utilizar energía térmica para vaporizar el agua, separándola de las sales disueltas, para después condensar el vapor y así producir un efluente purificado [15]. Dicho proceso se ilustra en la Figura 2.

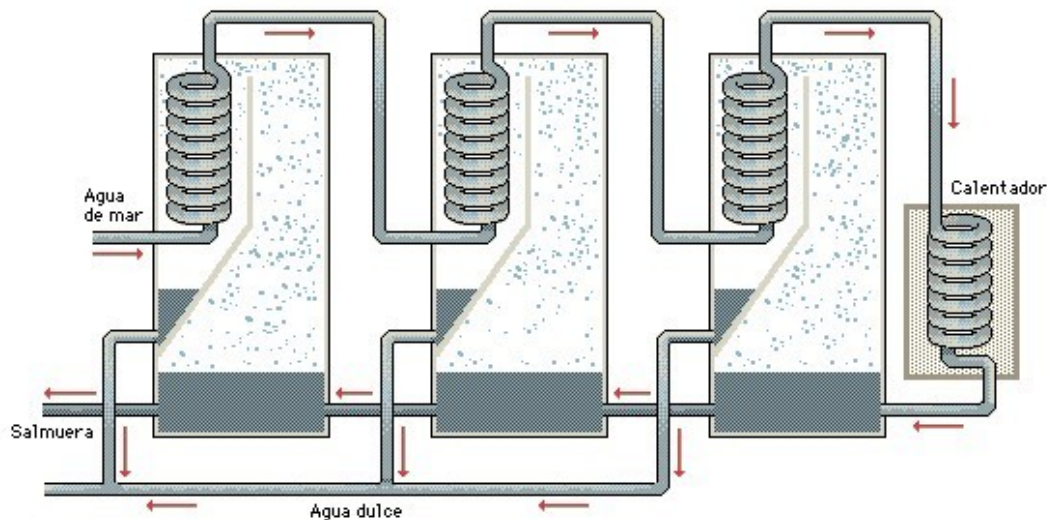


Figura 2: Esquema desalación por destilación [16]

- **Procesos con membranas:** Utilizan membranas semipermeables que permiten el paso selectivo del agua. Los más relevantes son:

- **Ósmosis Inversa (RO):** Es la tecnología más extendida, esta consiste en aplicar una presión superior a la presión osmótica del agua de mar para forzar el paso del agua a través de una membrana que retiene las sales [17].

A pesar de su alta eficiencia, el principal desafío operacional y económico de la ósmosis inversa es el ensuciamiento o *fouling* de las membranas. Este fenómeno consiste en la acumulación de material indeseado sobre la superficie de la membrana, lo que obstruye el flujo de agua y deteriora su rendimiento. El ensuciamiento puede ser de origen particulado (coloides, sedimentos), orgánico (biopelículas, materia orgánica natural) o inorgánico (incrustaciones o *scaling* por precipitación de sales poco solubles). Las consecuencias directas del *fouling* son una disminución en la producción de agua, un aumento en el consumo energético para mantener el flujo y una reducción drástica de la vida útil de las membranas, cuyo reemplazo representa uno de los costos de capital más significativos de la planta [18, 19]. Por consiguiente, el tren de pretratamiento se configura como una barrera de protección esencial, cuyo objetivo primordial es acondicionar el agua de alimentación para las membranas de Ósmosis Inversa (RO). La optimización de la calidad del agua en esta etapa es crucial para mitigar fenómenos de ensuciamiento y prolongar la vida útil del sistema. El principio de funcionamiento del proceso de RO se ilustra en la Figura 3.

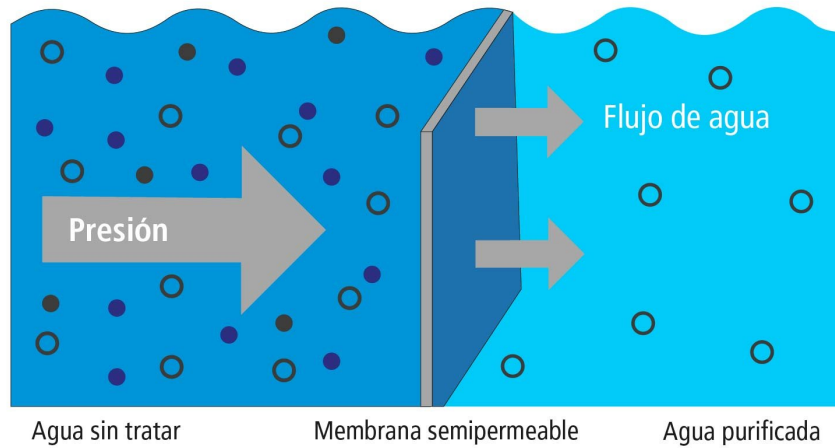


Figura 3: Principio de funcionamiento RO [17]

- **Electrodiálisis (ED):** Emplea membranas cargadas eléctricamente para el principio de este método se fundamenta en la separación de los iones disueltos en el agua mediante la aplicación de un campo eléctrico [20]. Dicho campo induce una migración selectiva de los aniones y cationes a través de membranas de intercambio iónico, un proceso que se ilustra esquemáticamente en la Figura 4.

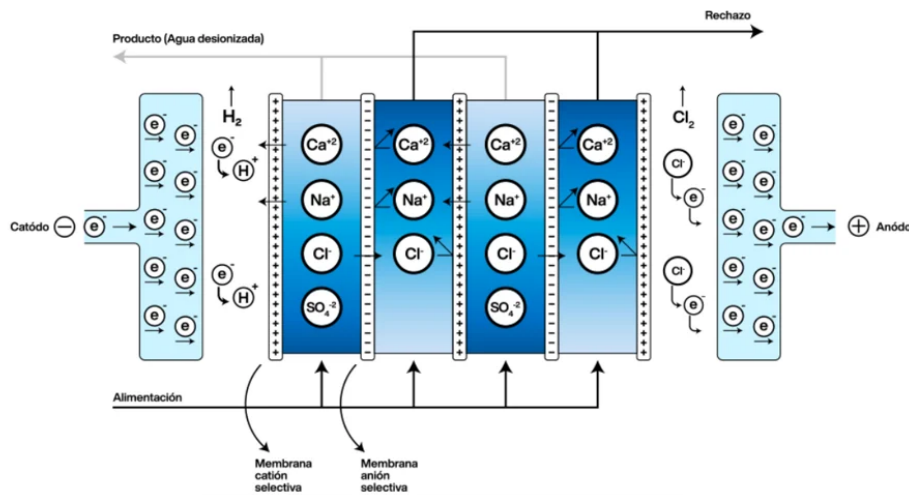


Figura 4: Esquema proceso Electrodiálisis [21]

De estas técnicas, la ósmosis inversa es la más utilizada en las grandes plantas desaladoras para la minería, debido a su eficiencia energética y modularidad.

2.3 Fundamentos de las Operaciones Unitarias Clave

2.3.1 Acondicionamiento Químico: Coagulación y Floculación

El acondicionamiento químico es una etapa esencial en el pretratamiento del agua para remover partículas coloidales y materia orgánica que son los principales precursores del ensuciamiento de membranas [8].

- **Coagulación:** Su objetivo es desestabilizar las partículas coloidales, que poseen cargas superficiales (generalmente negativas) que impiden su agregación. Se añaden coagulantes (ej. sales metálicas como FeCl_3) que actúan mediante neutralización de carga o formando hidróxidos metálicos que atrapan las partículas en un mecanismo de barrido (*sweep flocculation*) [8].
- **Floculación:** Tras la coagulación, se busca promover el crecimiento de los microfloculos en agregados más grandes y resistentes (macrofloculos). Se logra mediante la adición de polímeros de alto peso molecular (floculantes) y una agitación lenta, que promueven la formación de puentes entre partículas [7]. La formación de estos floculos es un prerequisite para que los mecanismos de captura por microburbujas en la FAD, como el atrapamiento físico, sean efectivos [9].

En el contexto específico del tratamiento de agua de mar, la selección del coagulante es crítica. Se prefiere el uso de sales férricas, como el cloruro férrico (FeCl_3), sobre las sales de aluminio. Esto se debe a que las sales de aluminio presentan una solubilidad demasiado alta en la matriz de alta fuerza iónica del agua de mar, lo que reduce su eficacia y puede llevar a la presencia de aluminio residual en el agua tratada [22]. Adicionalmente, para optimizar la formación de floculos y proteger las membranas de ósmosis inversa aguas abajo, es esencial ajustar el pH del agua a un rango entre 5.5 y 6.0 [19, 23].

Si bien la adición de un floculante es una práctica común, no siempre es un requisito indispensable. La decisión de operar sin floculante se basa en una optimización precisa del proceso de coagulación. La investigación sugiere que el tamaño de floculo óptimo para la flotación FAD es relativamente pequeño, en el rango de 10-50 μm [23, 19]. Si la coagulación, bajo condiciones controladas de dosis, pH y energía de mezcla, puede generar de forma consistente floculos estables dentro de este rango, la adición de un polímero para crear agregados más grandes puede ser innecesaria.

2.3.2 Separación por Flotación por Aire Disuelto (FAD)

La FAD es un proceso fisicoquímico que actúa como una barrera de protección fundamental para las etapas posteriores de filtración y ósmosis inversa. Es especialmente adecuada para el pretratamiento de agua de mar, dada su alta eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos de baja densidad como algas, aceites y materia orgánica, los cuales son difíciles de separar por sedimentación y son conocidos por ser agentes causantes de un severo ensuciamiento en las membranas [6]. Sus principios fundamentales son:

- **Generación de Microburbujas:** Se disuelve aire en una corriente de agua a alta presión. Al liberar esta presión súbitamente a través de boquillas especiales, se generan millones de microburbujas, típicamente de 20 μm a 100 μm [11]. No obstante, la aplicación de este principio en agua de mar presenta un desafío: la alta fuerza iónica del medio salino reduce significativamente la solubilidad del aire. A 20°C, la masa de aire transferida puede ser hasta un 26% menor que en agua dulce. Para compensar este déficit, es imperativo operar los saturadores a una presión considerablemente mayor para asegurar una concentración de aire disuelto suficiente para una flotación estable [10].
- **Adhesión Flóculo-Burbuja:** En la flotación de minerales, la adhesión se basa en la hidrofobicidad de las partículas. Sin embargo, en el tratamiento de aguas, donde se trabaja con flóculos hidrofílicos (como los de hidróxido férrico), la captura se produce por otros mecanismos. Entre ellos destacan el atrapamiento físico de las microburbujas dentro de la estructura porosa de los flóculos y la generación de burbujas directamente sobre la superficie del agregado [9]. Estos mecanismos explican la razón por la cual la FAD es eficaz sin necesidad de reactivos colectores que modifiquen la mojabilidad de las partículas.
- **Ascenso y Remoción:** Los agregados flóculo-burbuja resultantes tienen una densidad neta inferior a la del agua, por lo que flotan hacia la superficie. Allí forman una capa de lodo (espuma) que es removida de forma continua por un sistema de raspadores mecánicos [5].

2.3.3 Espesamiento y Deshidratación de Lodos

Una vez generado el lodo en la etapa de FAD, es necesario reducir su contenido de agua para minimizar el volumen de disposición final. Una ventaja operativa de la FAD es que produce un lodo flotado más denso que otros procesos como la sedimentación, pudiendo alcanzar concentraciones de sólidos de 1 a 3% [6], lo que optimiza las etapas posteriores de deshidratación.

Filtración en Tambor Rotatorio: Este método, a menudo utilizado para un espesamiento primario, opera por tamizado. Un lodo previamente floculado se alimenta a un tambor rotatorio cuya superficie es una malla fina. Los sólidos (flóculos) son retenidos por la malla, formando una torta, mientras que el líquido (filtrado) pasa a través de ella. La rotación del tambor facilita la descarga de la torta y la limpieza continua de la malla mediante sistemas de lavado. El rendimiento depende de la integridad estructural de los flóculos [24].

Deshidratación por Centrifugación: Este proceso utiliza una fuerza centrífuga, muy superior a la gravedad, para una separación sólido-líquido eficiente. La aceleración centrífuga (a_c) depende de la velocidad angular (ω) y el radio de giro (r), como lo muestra la Ecuación 1 :

$$a_c = \omega^2 r \quad (1)$$

Esta fuerza acelera la sedimentación de las partículas sólidas, compactándolas contra la pared de un rotor. Un tornillo sinfín interno transporta la torta de sólidos hacia la descarga. La velocidad de sedimentación en un campo centrífugo ($v_{\infty,c}$) se puede modelar con la Ley de Stokes modificada, tal como se ve en la Ecuación 2:

$$v_{\infty,c} = \frac{1}{18} \frac{\Delta\rho d^2 a_c}{\mu_f} \quad (2)$$

donde $\Delta\rho$ es la diferencia de densidad, d el diámetro de la partícula y μ_f la viscosidad del fluido [25, 12].

2.4 Antecedentes de la empresa

Este capítulo aplica los conceptos teóricos presentados previamente al caso de estudio específico de la planta desaladora de Minera Los Pelambres (MLP). Se describen los equipos y procesos involucrados en la generación y tratamiento de lodos, sentando las bases para la identificación del problema y el análisis experimental.

2.4.1 Contexto Operacional de Minera Los Pelambres

Antofagasta Minerals se destaca como uno de los principales grupos mineros en Chile y figura entre los diez mayores productores de cobre a nivel mundial [26]. Su operación principal, Minera Los Pelambres (MLP), es el caso de estudio de esta memoria.

Hitos Históricos y Desarrollo: La historia moderna de MLP se consolida a partir de hitos clave. Tras la adquisición de los derechos por parte de Antofagasta Holding en 1985, se dio inicio a una operación piloto en 1992. En 1997, tras la aprobación ambiental, comenzó la construcción de la mina a rajo abierto, la cual fue puesta en marcha exitosamente en 1999. Proyectos de expansión subsecuentes incrementaron su capacidad de procesamiento de manera significativa [13].

El Proyecto INCO y la Transición Hídrica: De crucial importancia para la presente memoria es el desarrollo del *Proyecto Infraestructura Complementaria (INCO)* entre 2016 y 2018. Este proyecto, que responde a la necesidad estratégica de asegurar el suministro hídrico frente a la escasez en la zona central de Chile, fue fundamental ya que incluyó la construcción de la planta desalinizadora por ósmosis inversa en Los Vilos. Con una capacidad inicial de 400 L/s, esta infraestructura permitió a la mina operar de manera más sostenible y es el contexto directo del sistema de tratamiento de lodos analizado en este trabajo [13]. La implementación de FAD en la planta es coherente con las estrategias de otras grandes desaladoras en Chile, como la planta El Coloso en Antofagasta, que utiliza esta tecnología para manejar eventos recurrentes de marea roja [6].

El proceso general de la planta se muestra en la Figura 5. El sistema de tratamiento de lodos, objeto de esta memoria, se origina en la etapa de pretratamiento.

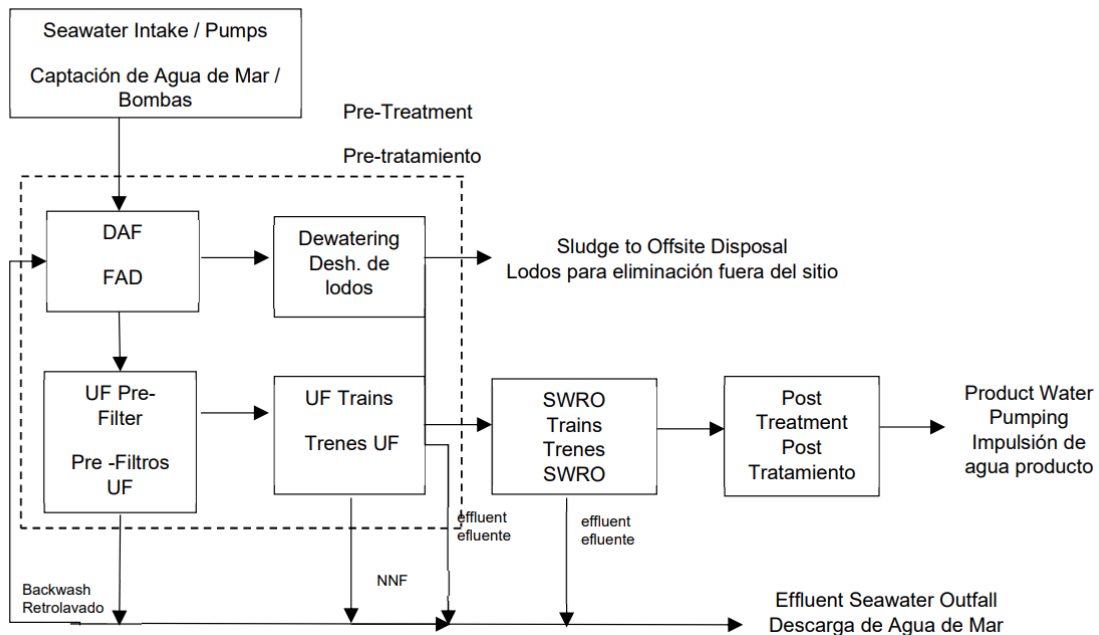


Figura 5: Diagrama de bloques de la planta desaladora MLP [27]

2.4.2 Análisis de las Etapas de Generación y Tratamiento de Lodos en MLP

Pretratamiento: Flotación por Aire Disuelto (FAD)

Descripción del Equipo: En MLP, el sistema FAD busca reducir los sólidos suspendidos para proteger las membranas aguas abajo. Se compone de 4 unidades en paralelo. Como se observa en la Figura 6, el afluente desde la coagulación (*Influent from coagulation*) ingresa a una cámara de floculación (*Flocculation*) con agitadores. Simultáneamente, una bomba de recirculación (*Recycle pump*) toma una porción del efluente clarificado y la envía a un estanque saturador (*Saturator*), donde se mezcla con aire comprimido (*Compressed air*). Esta corriente de agua saturada se inyecta a través de boquillas de inyección (*Recycle injection nozzles*) en la cámara principal, donde la caída de presión genera las microburbujas. Un sistema de raspadores superficiales (*Float scraper*) barre la capa de lodo flotado hacia una playa y canaleta de recolección (*Float collection beach and trough*). El agua clarificada pasa por debajo de un deflector de entrada (*Inlet baffle*), por encima de un vertedero de control de efluente (*Effluent control weir*) y sale como efluente (*Effluent*) [27].

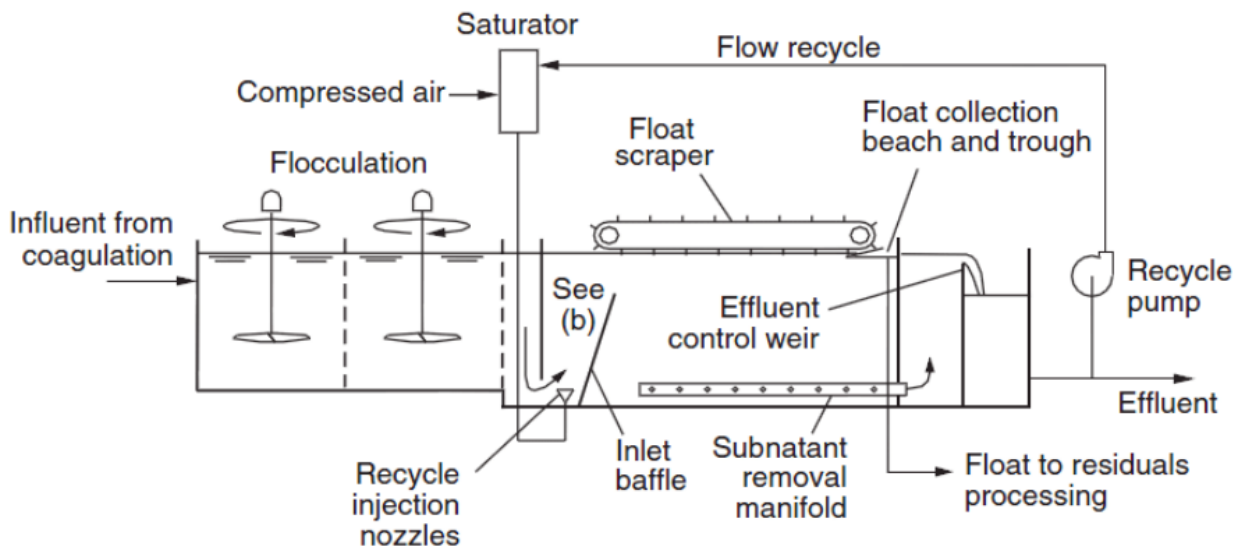


Figura 6: Unidad de FAD estándar en MLP [27]

Operación: Los lodos flotados son removidos y enviados al sistema de tratamiento. Los parámetros de diseño (Tabla 1) indican una presión de 4.5 bar en el saturador. Esta variable es relevante, ya que, según los fundamentos de la sección 2.3.2, gobierna la generación de microburbujas.

Tabla 1: Condiciones de operación de diseño para el FAD en MLP [27]

Parámetro	Corriente	Unidad	Valor
Presión	Recipiente de saturación	bar	4.5
Flujo	Recirculación de agua clarificada (por celda)	m ³ /h	154
Turbidez	Salida de FAD	NTU	≤ 5

2.4.3 Manejo de Lodos: Espesamiento y Deshidratación

Descripción del Sistema: El objetivo es reducir el volumen de lodos de la FAD. El sistema (Figura 7) consta de un espesador de lodos tipo tambor rotatorio (0583-TH-7001) y una centrífuga (0583-CF-7110). El lodo del tambor se acondiciona con polímero antes de entrar a la centrífuga.

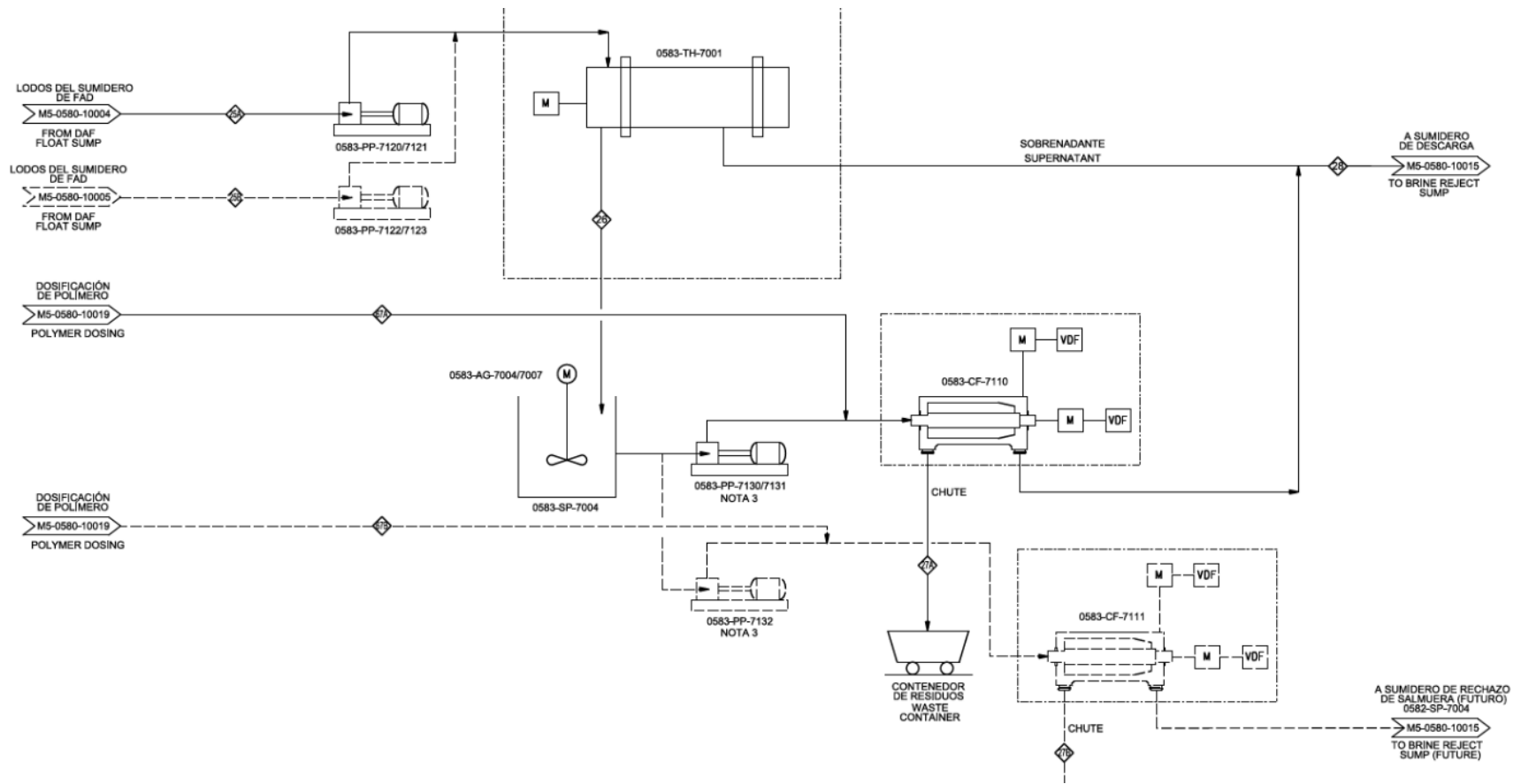


Figura 7: Diagrama del sistema de tratamiento de lodos en MLP [27]

Operación:

- **Espesador (Tambor Rotatorio):** Este equipo opera según el principio de filtración por tamizado descrito en la sección 2.3.3. La eficiencia depende de la correcta floculación para que los sólidos sean retenidos en la malla [27].
- **Centrífuga:** Aplica una alta fuerza centrífuga para producir una torta con aprox. 30% de sólidos en peso [27].

Capítulo 3

Metodología

Este capítulo detalla la metodología diseñada para cumplir con los objetivos específicos de esta memoria. Se presenta un enfoque estructurado por fases que abarcó desde el diagnóstico inicial del sistema, pasando por el diseño de protocolos formales, hasta la evaluación experimental del rendimiento y la optimización del proceso. Esta estructura aseguró que cada objetivo planteado fuera abordado de manera sistemática y rigurosa tal y como se observa en la Figura 8.

3.1 Fase 1: Diagnóstico del Sistema

Esta fase inicial sentó las bases para todo el estudio. Consistió en la recopilación y análisis sistemático de toda la información pertinente para comprender a fondo el estado actual del sistema de tratamiento de lodos, sus deficiencias y áreas de oportunidad.

3.1.1 Levantamiento y Procesamiento de Información

Se abordó mediante una estrategia mixta, combinando la revisión documental (planos P&ID, manuales, filosofías de operación), la recopilación de datos operativos (PI Vision, bitácoras) y la realización de observaciones de campo y entrevistas con el personal. La información fue posteriormente procesada, contrastada y analizada para caracterizar el rendimiento histórico e identificar las brechas operacionales. El foco del levantamiento se centró en parámetros de calidad del agua como turbidez y TSS, y en variables operativas como la presión de los saturadores, identificada en la literatura como un factor de primer orden en el rendimiento de la FAD para agua de mar [10].

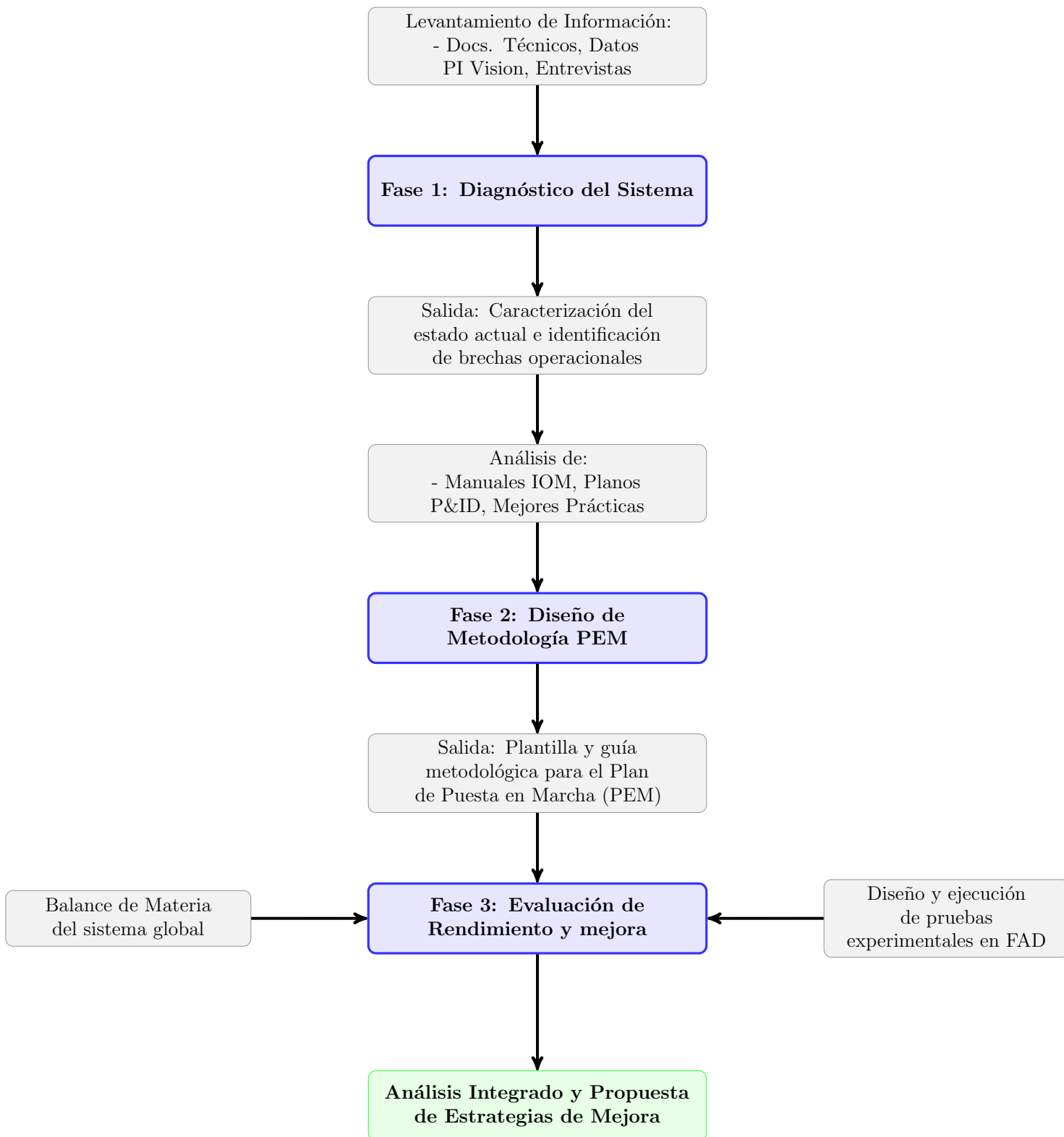


Figura 8: Diagrama de Flujo Metodológico.

3.2 Fase 2: Diseño de Metodología para Plan de Puesta en Marcha (PEM)

Para abordar la carencia de protocolos formales, en esta fase se desarrolló una metodología estructurada para el diseño de un Plan de Puesta en Marcha (PEM) para los equipos de deshidratación de lodos, basada en las mejores prácticas de la industria y en la documentación técnica de los fabricantes. El resultado fue una guía detallada y plantillas para las fases de precomisionamiento, comisionamiento, puesta en marcha y pruebas de rendimiento.

3.3 Fase 3: Evaluación de Rendimiento y mejora

El objetivo de esta fase fue cuantificar el rendimiento del sistema FAD e identificar oportunidades de mejora. Con este fin, se establecieron los cálculos de balance de materia y dos indicadores de eficiencia complementarios, y se implementó un plan de muestreo para dos condiciones operativas distintas.

Para validar la robustez de los hallazgos, se planificó el uso de una prueba t de muestras independientes con el fin de determinar la significancia estadística de las diferencias de rendimiento entre ambas condiciones. El diseño experimental se centró en la variable crítica identificada previamente en el diagnóstico y la revisión bibliográfica.

3.3.1 Balance de Materia y Fórmulas de Cálculo

Balance de Materia: La evaluación se basó en la ley de conservación de la masa. El flujo másico de sólidos para cada corriente se determinó mediante la Ecuación 3:

$$\dot{m} = Q \times C_{TSS} \quad (3)$$

Donde:

- \dot{m} = Flujo másico de sólidos (kg/h).
- Q = Flujo volumétrico de la corriente (m³/h).
- C_{TSS} = Concentración de Sólidos Suspendidos Totales (kg/m³).

Indicadores de Eficiencia: Debido a la configuración del proceso, que incluye un lazo de recirculación, se definió una métrica de eficiencia para evaluar el rendimiento:

1. **Eficiencia de Captura de Sólidos (E_{captura}):** Esta métrica, utilizada en los balances de materia, evalúa el rendimiento interno de la unidad FAD. Mide qué porcentaje de los sólidos que ingresan directamente al FAD (alimentación combinada) son efectivamente separados y concentrados en la purga de lodos. Se calcula según la Ecuación 4:

$$E_{\text{captura}}(\%) = \frac{\dot{m}_{\text{lodo}}}{\dot{m}_{\text{alimentación FAD}}} \times 100 \quad (4)$$

Donde \dot{m}_{lodo} es el flujo másico de sólidos en la purga de lodo y $\dot{m}_{\text{alimentación FAD}}$ es el flujo másico de sólidos en la alimentación combinada al FAD .

3.3.2 Evaluación del Efecto de Parámetros Operacionales en la Unidad FAD

Para investigar la influencia de la presión de los saturadores, se diseñó un protocolo de pruebas experimentales. La elección de esta variable se fundamenta en la literatura especializada, la cual establece que la presión de saturación es un parámetro de diseño de primer orden para la FAD en agua de mar. A diferencia del agua dulce, la alta salinidad reduce significativamente la solubilidad del aire, haciendo imperativo operar a presiones más elevadas para garantizar una concentración de microburbujas suficiente para una flotación estable y eficiente [10]. Por lo tanto, cualquier desviación de la presión de diseño tiene un impacto potencialmente mayor en agua de mar.

– **Variables de Estudio:**

- * **Variable Independiente:** Presión del Saturador (P_{sat}).
- * **Variables Dependientes:** Eficiencia de Captura de Sólidos (E_{captura}) y Eficiencia de Remoción Global ($E_{\text{remoción}}$).

– **Procedimiento:** El experimento se dividió en dos fases de muestreo, obteniendo 123 muestras para cada una:

- * **Fase Pre-Ajuste:** Se registraron los datos de operación con la presión de los saturadores en su estado inicial (aprox. 3.5 bar). El período de muestreo para esta fase fue desde el 20 de abril de 2025 a las 13:00 hasta el 13 de mayo de 2025 a las 13:00.

* **Fase Post-Ajuste:** Se ajustó la presión al valor de diseño de 4.5 bar, un valor consistente con las buenas prácticas para esta aplicación [28, 6]. Tras un período de estabilización, se registraron los datos de la nueva condición de operación. El período de muestreo para esta fase fue desde el 13 de mayo de 2025 hasta el 21 de junio de 2025. El intervalo de tiempo para esta fase fue mayor debido a que la toma de muestras se realizó con una menor frecuencia.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada una de las fases de la memoria. Se exponen los hallazgos del diagnóstico del sistema, la metodología de puesta en marcha desarrollada y, finalmente, los resultados cuantitativos de la evaluación de rendimiento del proceso.

4.1 Resultados del Diagnóstico del Sistema

A partir del levantamiento de información técnica, datos operacionales y observaciones de campo, se realizó un diagnóstico del estado actual del sistema FAD y el de tratamiento de lodos. Los hallazgos clave se centran en las desviaciones entre los parámetros de diseño y las condiciones operacionales reales, así como en la falta de procedimientos estandarizados. En la Tabla 2 se presenta un resumen comparativo de los principales parámetros.

Tabla 2: Comparación de parámetros de diseño vs. operacionales

Equipo	Parámetro	Valor de Diseño	Valor Operacional Observado
Saturadores FAD	Presión (bar)	4.5	3.5
Dosificación	FeCl ₃ (mg/L)	10-16	1.7-4
Espesador	% Sólidos a la salida	5%	N/A
Centrífuga	PEM	N/A	N/A

Las principales deficiencias identificadas fueron las siguientes:

- Baja tasa de generación de lodos en el sistema FAD.

- Una desviación significativa en la presión de operación de los saturadores FAD, la cual operaba aproximadamente un 22% por debajo del valor de diseño [10]. La presión observada de 3.5 bar es considerablemente inferior a los 4.5 bar - 5 bar reportados en otras plantas desaladoras [6, 28].
- Una dosificación de coagulante (FeCl_3) en el rango de 1.7-4 mg/L, muy por debajo del valor de diseño (10-16 mg/L). Esta baja dosificación se identificó como una estrategia operativa reactiva para mitigar la saturación de las membranas de Ultrafiltración (UF) ante la imposibilidad de purgar los sólidos generados.
- La inexistencia de un Plan de Puesta en Marcha (PEM) formalizado.
- Equipos críticos de la línea de lodos, como el espesador y las centrífugas, se encontraban fuera de operación, lo que impedía la purga efectiva de sólidos del sistema.
- Como consecuencia directa de lo anterior, se observó una notoria acumulación de lodos en el tanque de retrolavado sucio, tal como se evidencia en la Figura 10.

Adicionalmente, como parte del diagnóstico, se analizó la relación entre dos de los parámetros clave para el control del pretratamiento: los Sólidos Suspendidos Totales (TSS) y la Turbidez. El objetivo era determinar si la turbidez, una medición en línea y más sencilla, podía usarse como un indicador fiable de la carga de sólidos que ingresa a la planta. Como se observa en la Figura 9, el análisis de los datos históricos revela que, si bien existe una tendencia positiva, la correlación entre los Sólidos Suspendidos Totales (TSS) y la Turbidez es débil y presenta una alta dispersión. Esta pobre correlación se ve reflejada en el bajo valor del coeficiente de determinación R^2 obtenido para el modelo lineal. Los análisis de regresión para otros modelos —logarítmico, exponencial y polinómico de grado dos— arrojaron resultados similares y se adjuntan en los Anexos A. Este hallazgo es crucial, pues demuestra que la turbidez por sí sola no constituye un predictor robusto de la masa de sólidos. Por consiguiente, se confirma la necesidad de utilizar la medición de TSS para la realización de balances de materia, ya que este parámetro cuantifica de forma directa la carga que debe ser removida por el sistema FAD.

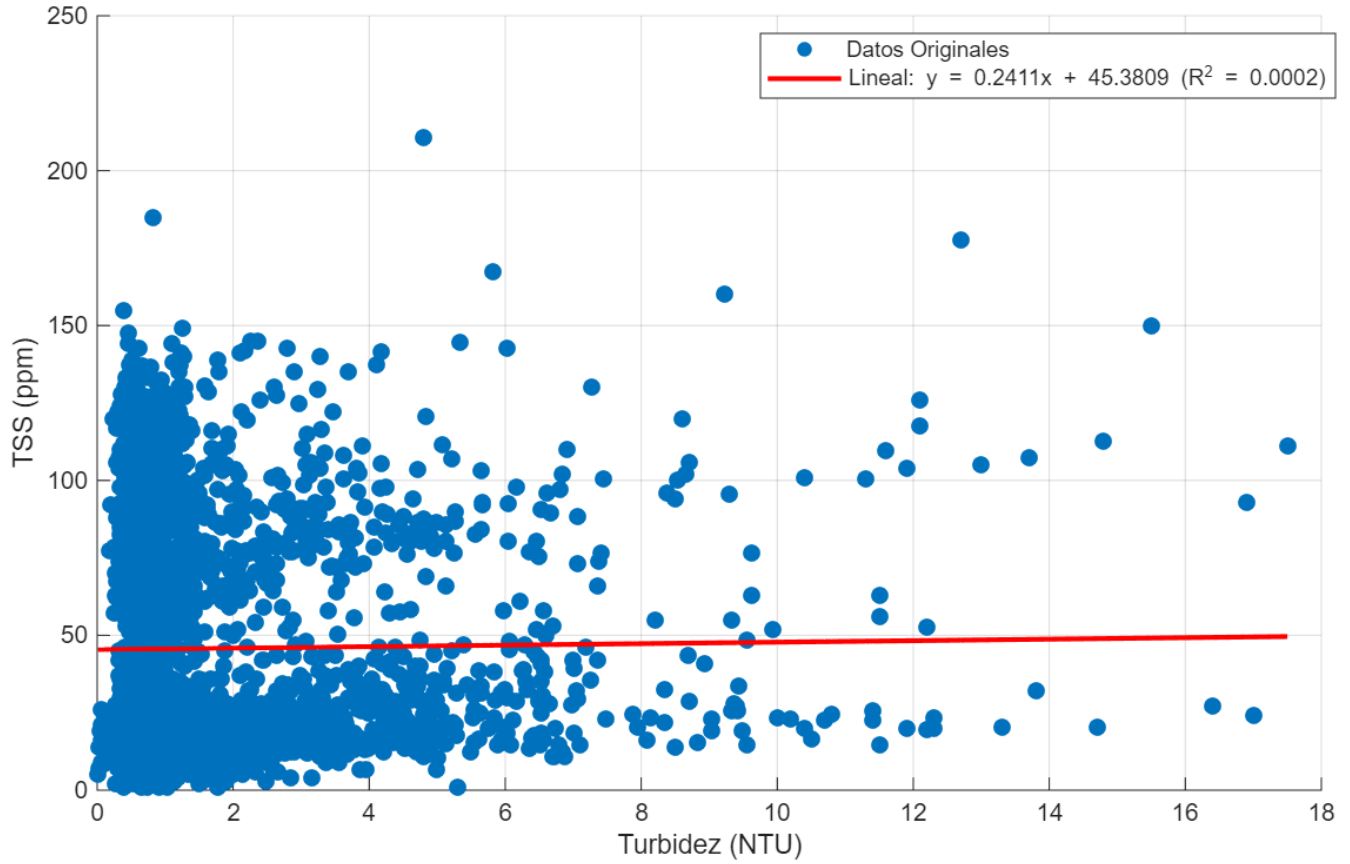


Figura 9: Dispersión de datos históricos entre la concentración de Sólidos Suspendedos Totales (TSS) y la Turbidez (NTU).



(a)



(b)

Figura 10: Evidencia fotográfica de la acumulación de lodos en el tanque de retrolavado sucio; (a) Vista superior de la acumulación de lodos y (b) Detalle de la consistencia del lodo y espuma.

La acumulación de lodos evidenciada en la Figura 10, observada en una etapa del proceso no diseñada para contener tan alto nivel de sólidos, justificó la necesidad de realizar las evaluaciones experimentales y desarrollar los procedimientos propuestos en esta memoria.

4.2 Metodología Propuesta para Plan de Puesta en Marcha (PEM)

En respuesta a la falta de procedimientos formales para la activación de equipos, identificada como una deficiencia clave durante el diagnóstico, se desarrolló una metodología estructurada para el diseño e implementación de un Plan de Puesta en Marcha (PEM). Este marco metodológico no solo representa el resultado principal del segundo objetivo específico, sino que también constituye un entregable de valor permanente para la operación. Su propósito es asegurar que futuras activaciones de equipos se realicen de manera segura, eficiente y sistemática, mitigando los riesgos de una operación inestable como la evidenciada en la fase de diagnóstico. El desarrollo se basó en las mejores prácticas de la industria del comisionamiento, adaptadas a las particularidades de los equipos de deshidratación de lodos de la planta. El resultado es un protocolo robusto que se divide en cuatro fases secuenciales y lógicas, donde la finalización exitosa de una etapa es prerrequisito para iniciar la siguiente.

1. **Fase 1: Precomisionamiento (Verificaciones Estáticas):** Esta fase inicial, también conocida como "verificación en frío", es fundamental para garantizar la seguridad e integridad del montaje. Consiste en una inspección exhaustiva de la instalación mecánica, eléctrica y de instrumentación de los equipos en estado detenido. Se realizan verificaciones como la correcta nivelación de los equipos rotativos, el torque de pernos de anclaje, la continuidad de cables de fuerza y control, y las pruebas de lazo de todos los instrumentos para asegurar su correcta comunicación con el sistema de control. El objetivo es certificar que el equipo está físicamente listo y seguro para ser energizado.
2. **Fase 2: Comisionamiento (Pruebas Funcionales sin Carga):** Una vez superada la fase estática, se procede a las pruebas funcionales, utilizando un fluido inocuo como el agua en lugar de lodo. El propósito de esta etapa es verificar el correcto funcionamiento dinámico de todos los componentes: motores, bombas, secuencias de control desde el sistema de control distribuido (DCS), y la lógica de los sistemas de enclavamiento y alarmas. Se prueban las paradas de emergencia y la respuesta del sistema ante fallas simuladas, todo en un entorno seguro y sin riesgo para el proceso.
3. **Fase 3: Puesta en Marcha (Arranque con Carga Gradual):** Corresponde al arranque real del equipo con lodo. Esta fase es de suma importancia y se ejecuta de forma controlada. Se introduce el lodo al sistema de forma gradual, comenzando con un bajo caudal. Durante esta etapa se realizan los ajustes iniciales de los parámetros operativos clave (por ejemplo, el caudal de alimentación, la dosis de polímero floculante,

la velocidad diferencial y el nivel de estanque en la centrífuga) con el fin de estabilizar la operación y observar la respuesta del equipo bajo condiciones de proceso reales.

4. **Fase 4: Pruebas de Rendimiento (Pruebas de Aceptación):** Una vez que la operación se ha estabilizado, se realiza una prueba formal y documentada para verificar que el equipo cumple con los Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs) definidos en su hoja de datos de diseño. Para el caso del espesador y la centrífuga, estos KPIs incluyen el porcentaje de sequedad de la torta de lodos, la recuperación de sólidos y el consumo específico de reactivos. Esta fase valida cuantitativamente que el equipo no solo funciona, sino que lo hace de acuerdo a las expectativas de rendimiento.

Aplicando este marco metodológico, se generaron los planes de puesta en marcha específicos para los equipos clave de la línea de deshidratación de lodos de la planta. Los documentos PEM detallados, que incluyen listas de verificación (checklists), procedimientos de prueba y criterios de aceptación para el Espesador de Lodos y la Centrífuga Decantadora, se presentan íntegramente en el Anexo B.

4.3 Resultados de la Evaluación de Rendimiento y Optimización

Esta sección presenta los resultados cuantitativos de la evaluación experimental del sistema, separando el análisis en las condiciones operacionales pre y post-ajuste de la presión de los saturadores del sistema FAD. Primero se establece la línea base de diseño a través del balance teórico, y luego se detallan los hallazgos operacionales.

Explicación del Diagrama de Flujo y sus Corrientes

El diagrama presentado en la Figura 11 representa el diseño ideal del sistema de tratamiento de lodos. A continuación, se describe cada una de las corrientes numeradas:

- **Corriente 1:** Es la entrada de agua de mar cruda a la planta, antes de mezclarse con cualquier recirculación.
- **Corriente 2:** Corresponde a la alimentación combinada que ingresa a la unidad de Flotación por Aire Disuelto (FAD). Esta corriente, compuesta por la mezcla del agua de mar cruda (1) y el agua clarificada recirculada (11), ha sido previamente acondicionada mediante ajuste de pH y un proceso de coagulación-floculación.

- **Corriente 3:** Es el efluente total de agua clarificada que sale del FAD.
- **Corriente 4:** Es el lodo flotado que se retira de la superficie del FAD. Esta es la purga principal de sólidos del proceso de clarificación, y se dirige hacia la primera etapa de deshidratación.
- **Corriente 5:** Es el lodo que sale del Espesador y alimenta a la Centrífuga. Se espera que tenga una mayor concentración de sólidos que la corriente 4.
- **Corriente 6:** Es el agua o sobrenadante que se recupera del Espesador, con una baja concentración de sólidos.
- **Corriente 7:** Es la torta de sólidos final, con un alto porcentaje de sequedad, que sale de la Centrífuga para su disposición final.
- **Corriente 8:** Es el líquido (centrado) que se recupera de la Centrífuga.
- **Corriente 9:** Es la corriente combinada de los líquidos recuperados de las etapas de deshidratación (Espesador y Centrífuga).
- **Corriente 10:** Es el agua clarificada que se envía a las etapas posteriores del proceso (como la ultrafiltración).
- **Corriente 11:** Es la porción del agua clarificada (de la corriente 3) que se recircula para mezclarse con el agua de mar cruda a la entrada del FAD.

El Rol del Nodo A y su Conexión con la Acumulación de Lodos

El Nodo A es el punto de división donde la corriente de agua clarificada (3) se separa: una parte continúa como agua producto hacia las etapas siguientes (10) y la otra se recircula (11). En condiciones de diseño, la mayoría de los sólidos son removidos en el FAD y evacuados por la corriente de lodos (4), por lo que el agua en el Nodo A debería tener una carga de sólidos muy baja. Sin embargo, el diagnóstico de este estudio reveló dos problemas: una baja eficiencia de captura en el FAD y la detención de la línea de deshidratación (Espesador y Centrífuga), bloqueando la principal ruta de purga de sólidos. Esta situación convierte al Nodo A en un punto de acumulación. Los sólidos no capturados llegan en alta concentración a este nodo y, a través de la corriente 11, son recirculados de vuelta a la entrada del FAD. Esto genera un ciclo vicioso de enriquecimiento de sólidos en todo el circuito de clarificación. La evidencia física de esta falla sistémica se observa en la Figura 10, donde la masiva acumulación de lodo en el tanque de retrolavado es la consecuencia directa de un sistema saturado de sólidos sin una vía de evacuación efectiva.

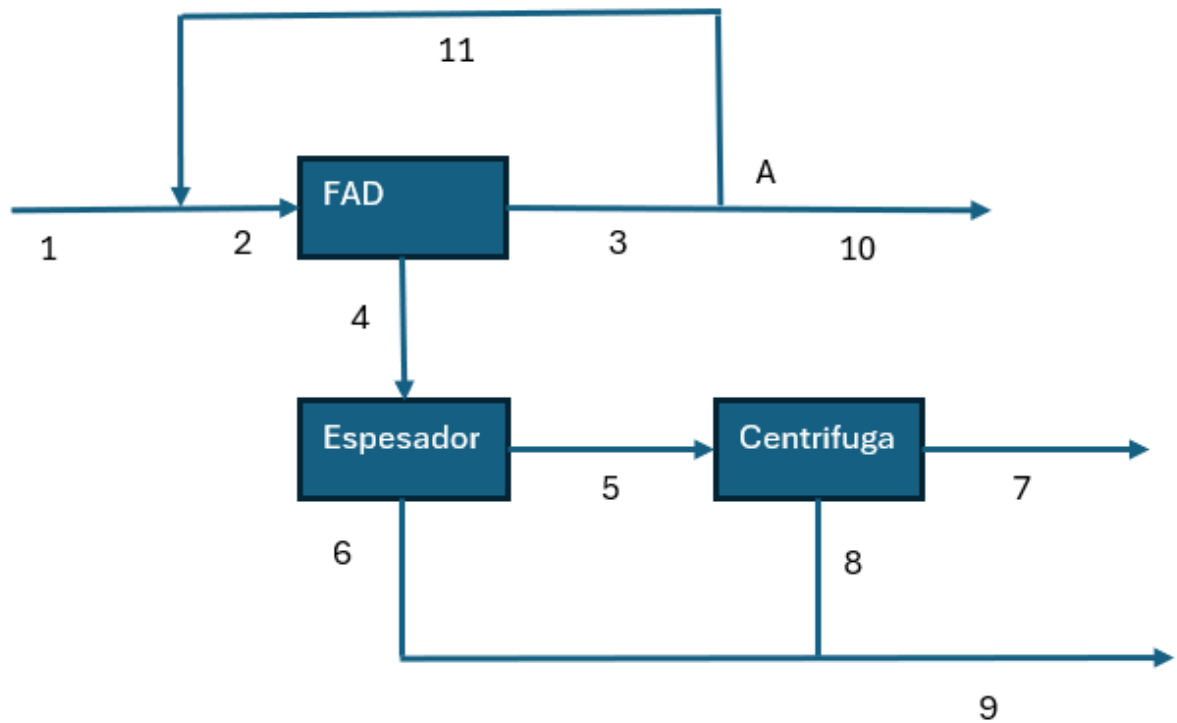


Figura 11: Diagrama de balance de materia teórica para el sistema de tratamiento de lodos.

Tabla 3: Balance de Materia Teórico de la Planta

Corriente	Flujo (m ³ /h)	TSS (mg/L)	TSS (kg/h)
1	3002.0	60.0	180.1
2	3198.4	59.8	198.8
3	3192.0	3.5	11.2
4	6.4	32810.0	210.0
5	4.2	50000.0	210.0
6	2.2	7.3	0.0
7	3.3	300000.0	195.0
8	1.0	15789.5	15.0
9	3.2	4767.0	15.0
10	2995.6	0.0	0.0
11	196.4	36.0	7.1

Al analizar los datos teóricos de diseño de la planta (Anexo C), se notó una desviación en el balance entregado. Esta discrepancia demuestra que el balance no cumple con el principio de conservación de la masa, un desajuste que puede atribuirse a las simplificaciones

y redondeos inherentes a la etapa de ingeniería. La inconsistencia se evidencia de forma directa al comparar el flujo másico de Sólidos Suspendedos Totales (TSS) entre la corriente de alimentación (corriente 2) y la de salida de lodos (corriente 4 o corriente 25A de la Figura 18). Notablemente, el valor de TSS en la corriente 4 (kg/h) es superior al que ingresa al sistema a través de la corriente 2, postulando una condición físicamente imposible. Esta anomalía indica que, teóricamente, el sistema purga una mayor cantidad de sólidos de los que son alimentados, incluso al considerar la recirculación interna.

4.3.1 Análisis del Rendimiento del Sistema

En esta sección se cuantifica y compara el rendimiento del sistema FAD antes y después del ajuste de la presión de los saturadores, con el objetivo de evaluar el impacto de esta intervención en la eficiencia de captura de sólidos, estos análisis se realizaron en base a los datos adjuntos en anexos D.

Diagrama de Flujo y Supuestos de la Evaluación

La configuración operacional del sistema durante los períodos de estudio se representa en el diagrama de flujo simplificado de la Figura 12. Este esquema es válido tanto para la condición pre como post-ajuste, ya que la intervención se limitó a un parámetro operacional sin modificar la disposición de los equipos. Las corrientes representadas son: (1) Agua de mar, (2) Entrada al FAD, (3) Salida de agua clarificada, (4) Lodo purgado (flotado), (5) Agua producto y (6) Recirculación. El punto 'A' es un punto de acumulación de masa.

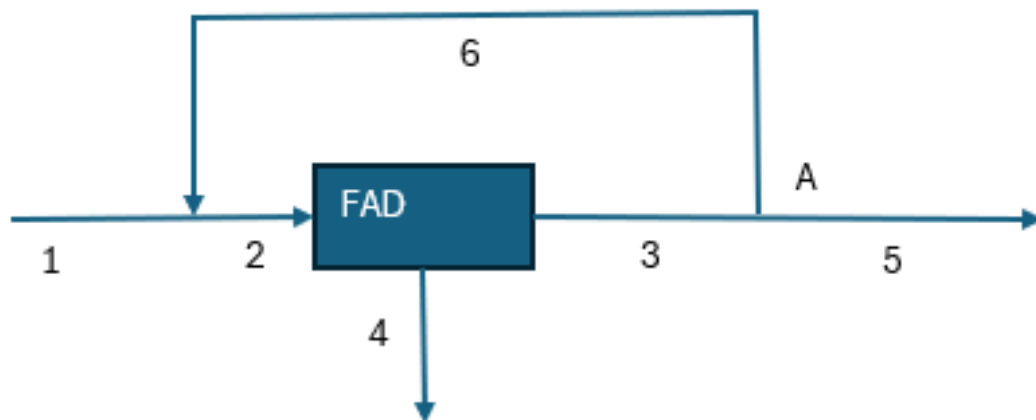


Figura 12: Diagrama de balance de materia de la operación real del sistema.

Es importante señalar que esta evaluación comparativa se fundamenta en ciertos supuestos clave. Se asume que el sistema operó en un estado pseudoestacionario durante los períodos de muestreo, que las muestras tomadas fueron representativas de las corrientes totales y que los instrumentos de medición de flujo, así como los análisis de laboratorio para TSS, son precisos.

Condición Pre-Ajuste: Diagnóstico de la Línea Base Operacional

La Tabla 4 detalla los valores del balance de materia para la condición inicial, la cual sirve como línea base para evaluar el rendimiento.

Tabla 4: Balance Real Pre-Ajuste de Saturadores

Corriente	Flujo (l/s)	Flujo (m ³ /h)	TSS (mg/L)	TSS kg/h
1	695	2502.0	17.2	43.1
2	735	2646.0	30.1	79.6
3	734.8	2645.3	21.9	58.0
4	0.2	0.7	29931.0	21.6
5	694.8	2501.3	8.6	21.5
6	40	144.0	253.538	36.5

Con los datos de este balance, se calculó el indicador con la Ecuación 4, obteniendo el siguiente resultado:

- **Eficiencia de Captura de Sólidos ($E_{captura}$): 27.1%**

Este bajo valor confirma cuantitativamente la ineficiencia del sistema en su estado original, indicando que era incapaz de cumplir su función primordial de separación y estableciendo la necesidad de una intervención correctiva.

Condición Post-Ajuste: Evaluación del Rendimiento Optimizado

Tras establecer la línea base, se procedió a ajustar la presión de los saturadores al valor de diseño de 4.5 bar. La Tabla 5 presenta los resultados del balance para esta nueva condición optimizada.

Tabla 5: Balance Real Post-Ajuste de Saturadores

Corriente	Flujo (l/s)	Flujo (m ³ /h)	TSS (mg/L)	TSS kg/h
1	695.00	2502.00	18.26	45.67
2	735.00	2646.00	32.72	86.57
3	734.80	2645.28	15.53	41.09
4	0.20	0.72	63162.77	45.48
5	694.80	2501.28	0.08	0.20
6	40.00	144.00	284.00	40.90

Se calculó nuevamente el indicador con la Ecuación 4:

- **Eficiencia de Captura de Sólidos** ($E_{captura}$): 52.5%

Este valor valida el ajuste de presión como una medida de optimización efectiva, demostrando que el sistema pasó a ser funcional y capaz de retener más de la mitad de la masa de sólidos, en marcado contraste con su rendimiento inicial.

4.3.2 Análisis Conjunto de Indicadores de Rendimiento

La evaluación del indicador de rendimiento revela un cambio drástico en la dinámica del sistema. La Tabla 6 resume los resultados.

Tabla 6: Comparación del Indicador de Rendimiento Pre y Post-Ajuste

Indicador de Rendimiento	Valor Pre-Ajuste	Valor Post-Ajuste	Mejora
Eficiencia de Captura ($E_{captura}$)	27.1%	52.5%	+25.4%
Desviación estándar	20%	34%	–

El análisis de estos valores permite obtener conclusiones de alto impacto:

- **Rendimiento Pre-Ajuste:** En la condición inicial, el sistema exhibía una eficiencia de captura de sólidos marcadamente baja, de solo un 27.1%. Esto significa que casi tres cuartas partes de la masa de sólidos que ingresaban a la unidad FAD no eran separadas hacia la corriente de lodos, recirculando y sobrecargando el sistema.
- **Mejora Sustancial Post-Ajuste:** El ajuste de la presión de los saturadores a su valor de diseño provocó una mejora radical en el proceso. La eficiencia de captura prácticamente se duplicó, alcanzando un 52.5%, lo que representa una mejora de 25.4 puntos porcentuales. Para validar estadísticamente esta observación, se realizó una

prueba t de muestras independientes, la cual arrojó un valor p de 4.68227×10^{-17} . Dado que este valor es drásticamente inferior al nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, se confirma que la mejora es altamente significativa y no producto del azar. Esto demuestra que el sistema, una vez ajustado, comenzó a cumplir su función de separación de manera mucho más efectiva.

- **Impacto del Ajuste de Presión:** Se concluye que la presión de los saturadores era un parámetro operacional limitante del rendimiento de la unidad FAD. Su corrección fue la acción que habilitó el cambio de un sistema con muy baja performance a uno considerablemente más eficiente en la separación de sólidos. Aunque la puesta en marcha de la línea de deshidratación sigue siendo crucial para el manejo del lodo generado, el ajuste de presión fue la clave para que el FAD pudiera, en primer lugar, capturar los sólidos de manera efectiva.

4.3.3 Comparación Gráfica del Rendimiento

Para visualizar el impacto del ajuste operacional en el tiempo, la Figura 13 presenta la evolución de la eficiencia de remoción antes y después de la intervención.



Figura 13: Comparación de la eficiencia de remoción vs. tiempo para los escenarios pre y post-ajuste.

El análisis gráfico de la Figura 13 no solo confirma los hallazgos numéricos, sino que permite interpretar la naturaleza de la mejora. La volatilidad extrema del período pre-ajuste, con fluctuaciones tan abruptas, es indicativa de un sistema inestable y fuera de control. Este comportamiento errático puede atribuirse a una deficiente formación de microburbujas, mecanismo esencial para la flotación, que volvía al proceso altamente sensible a cualquier variación. En contraste, el período post-ajuste evidencia un cambio fundamental. La mejora no se limita al nivel de eficiencia, sino que se extiende a una drástica reducción de la variabilidad. El sistema transita de un estado impredecible a uno robusto y estable, lo cual es crucial para garantizar una operación fiable y proteger las etapas posteriores del tratamiento. La evidencia gráfica es, por tanto, contundente al demostrar que el ajuste de presión fue exitoso, logrando una mejora simultánea en el rendimiento y en la estabilidad operativa.

Este éxito operativo resalta la importancia de alinear los parámetros del proceso con las condiciones de diseño, especialmente en el tratamiento de agua de mar. En aplicaciones a gran escala como la planta de Barcelona-Llobregat, por ejemplo, las celdas SeaDAF® están diseñadas para operar a altas tasas de carga hidráulica, superiores a 30 m/h, logrando una clarificación efectiva sin el uso de polímeros [29]. Estudios a escala piloto han validado la importancia de estos parámetros, demostrando que una presión de saturación de 500 kPa (5 bar) y una tasa de recirculación del 20% pueden alcanzar una remoción de turbidez del 62% de forma estable [30]. La literatura de diseño refuerza este punto, explicando que para compensar la menor solubilidad del aire en agua de mar, un sistema que opera a 500 kPa podría requerir un ajuste a 675 kPa para igualar el rendimiento de un sistema equivalente de agua dulce [31]. Por lo tanto, el ajuste realizado en la planta no solo corrigió una desviación, sino que alineó la operación con los principios fundamentales necesarios para el rendimiento robusto que se observa en otras instalaciones exitosas.

En resumen, los resultados presentados en este capítulo han permitido: (1) diagnosticar las deficiencias operativas clave del sistema, (2) proponer una metodología estandarizada para la puesta en marcha de equipos críticos, y (3) cuantificar el impacto de la optimización. Se demostró que el ajuste de la presión de los saturadores fue el factor determinante que mejoró sustancialmente la eficiencia de captura de sólidos y la estabilidad del sistema FAD. Estos hallazgos serán la base para formular las conclusiones y recomendaciones finales en el siguiente capítulo.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

A continuación, se presentan las conclusiones principales derivadas del análisis de los resultados obtenidos en esta memoria de título, seguidas de una serie de recomendaciones técnicas y operacionales para la planta.

5.1 Conclusiones

En base al trabajo realizado y los resultados presentados, se establecen las siguientes conclusiones, respondiendo a los objetivos específicos planteados:

1. **Sobre el diagnóstico del sistema:** Se confirma que el sistema FAD y de tratamiento de lodos operaba con deficiencias críticas. La principal desviación fue la presión de operación de los saturadores, un 22% por debajo de su valor de diseño. A esto se suma la inexistencia de protocolos formales de puesta en marcha (PEM) y la detención de los equipos de la línea de deshidratación, lo que impedía la purga efectiva de sólidos del sistema.
2. **Sobre la metodología de puesta en marcha:** Se desarrolló y entregó con éxito una metodología estructurada para la creación de Planes de Puesta en Marcha (PEM) para los equipos de deshidratación. Este marco, basado en las fases de precomisionamiento, comisionamiento, puesta en marcha y pruebas de rendimiento, constituye una herramienta estandarizada para asegurar la correcta implementación y operación de dichos equipos, tal como se detalla en el Anexo B.
3. **Sobre el rendimiento del sistema FAD pre-ajuste:** Se concluye que, en su estado inicial, el sistema FAD presentaba un rendimiento de separación marcadamente deficiente

e inestable. El análisis cuantitativo arrojó una eficiencia de captura de sólidos de solo un 27.1%, mientras que el análisis gráfico evidenció una volatilidad extrema, demostrando que el proceso era impredecible y operaba fuera de control.

4. **Sobre el impacto de la optimización de la presión:** El ajuste de la presión de los saturadores al valor de diseño de 4.5 bar demostró tener un doble impacto positivo y fundamental en el proceso. Por un lado, la eficiencia de captura de sólidos prácticamente se duplicó, alcanzando un 52.5% (una mejora de 25.4 puntos porcentuales), siendo esta mejora estadísticamente significativa ($p < 0.001$). Por otro, el proceso se estabilizó de manera drástica, eliminando los valores negativos, reduciendo la variabilidad y operando de forma consistente, como se demostró en el análisis gráfico.
5. **Sobre la causa raíz de la ineficiencia e inestabilidad:** Se concluye que la causa raíz del bajo rendimiento y la inestabilidad de la unidad FAD era la operación con una presión de saturación incorrecta. El ajuste de este parámetro no solo mejoró la eficiencia, sino que transformó un proceso errático en uno robusto y predecible. Esto confirma que el bajo rendimiento no era una falla inherente del equipo, sino de su condición operativa.

5.2 Recomendaciones

A partir de las conclusiones anteriores, se propone una estrategia de optimización secuencial para la planta, donde cada paso habilita al siguiente:

1. **Acción Fundamental - Operación a Presión de Diseño:** Se recomienda de forma prioritaria y permanente mantener la presión de operación de los saturadores FAD en su valor de diseño de 4.5 bar. Se ha demostrado que esta es una condición indispensable para asegurar no solo una alta eficiencia de captura de sólidos, sino también la estabilidad y robustez operativa del sistema.
2. **Acción Estratégica y Habilitante - Habilitar la Purga de Sólidos:** La recomendación principal de este estudio es iniciar la puesta en marcha del sistema de deshidratación de lodos (espesador y centrífugas), adoptando para ello los Planes de Puesta en Marcha (PEM) desarrollados en esta memoria (Anexo B). Ahora que el FAD puede capturar los sólidos de manera eficiente y estable, es imperativo habilitar la ruta de evacuación para evitar la saturación del circuito y gestionar el lodo generado.
3. **Acción de Optimización (Condicional) - Reevaluación del Control Químico:** Una vez que el sistema de deshidratación esté operativo y la purga de lodos sea continua, se debe reevaluar y optimizar la estrategia de dosificación de coagulante. La dosis actual

(1.7-4 mg/L) es una medida reactiva y subóptima. Con la purga habilitada, el objetivo cambiará a maximizar la captura de sólidos en la FAD. Por lo tanto, se deberá validar una dosis de coagulante mayor, en línea con los resultados de las pruebas de jarra (8-10 mg/L) [32]. Esta acción permitirá una coagulación robusta y una captura aún más eficiente de flóculos.

4. **Trabajos Futuros - Monitoreo y Optimización Continua:** Como trabajo futuro, una vez que el sistema esté operando íntegramente bajo el nuevo paradigma (presión de diseño y purga de lodos activa), se recomienda realizar un nuevo análisis de sensibilidad para evaluar el impacto combinado de la presión de saturación y la dosis de coagulante, buscando el punto de máxima eficiencia y estabilidad global.

Referencias

- [1] Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). Consumo de agua en la minería del cobre al año 2022. Technical report, Gobierno de Chile, Santiago, Chile, 2023.
- [2] Ministerio de Obras Públicas. Mesa nacional del agua – primer informe. Technical report, Gobierno de Chile, 2020.
- [3] Antofagasta Minerals. Los Pelambres pone en marcha primera planta desalinizadora para la minería de la zona central, 2024.
- [4] ACCIONA. ACCIONA construirá y operará una desaladora para la compañía minera Doña Ines de Collahuasi (Chile), 2022.
- [5] Suez. *Water treatment handbook*. SUEZ International, Paris, France, 10th edition, 2018. Formerly Degrémont Water Handbook.
- [6] Nikolay Voutchkov. Considerations for selection of seawater filtration pretreatment system. *Desalination*, 261(3):354–364, 2010.
- [7] John C. Crittenden, R. Rhodes Trussell, David W. Hand, Kerry J. Howe, and George Tchobanoglous. *MWH’s Water Treatment: Principles and Design*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 3rd edition, 2012.
- [8] S. Assiyeh Alizadeh Tabatabai. *Coagulation and ultrafiltration in seawater reverse osmosis pretreatment*. PhD thesis, Delft University of Technology and UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, The Netherlands, 2014.
- [9] Rafael Teixeira Rodrigues and Jorge Rubio. DAF-dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, 82(1):1–13, 2007.
- [10] Johannes Haarhoff and James K. Edzwald. Adapting dissolved air flotation for the clarification of seawater. *Desalination*, 311:90–94, 2013.

- [11] George Tchobanoglous, H. David Stensel, Ryujiro Tsuchihashi, Franklin L. Burton, and Metcalf & Eddy, Inc. *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. McGraw-Hill Education, New York, NY, 5th edition, 2014.
- [12] W. W. Leung. Centrifugal separation for dewatering of sludge. *Filtration & Separation*, 35(5):453–460, 1998.
- [13] Antofagasta Minerals. Reporte de producción y sustentabilidad 2023. Technical report, Antofagasta Minerals, 2023.
- [14] Escenarios Hídricos 2030. Usos del agua en Chile: Medir para gestionar. <https://escenarioshidricos.cl/noticia/usuarios-del-agua-en-chile-medir-para-gestionar/>, jun 2022.
- [15] Jennifer Rufat Espinosa. Desalación del agua: métodos, tratamientos y análisis. TRIPLENLACE, dic 2014.
- [16] Lenntech. Desalinización de agua de mar por osmosis inversa. <https://www.aguamarket.com/sql/temas-interes/022.asp>.
- [17] Winterhalter. Equipos de ósmosis inversa Winterhalter: La última tecnología en tratamiento de agua. <https://www.winterhalter.com/cl-es/blog-winterhalter/equipos-de-osmosis-inversa-winterhalter-la-ultima-tecnologia-en-tratamiento-de-agua>, abr 2022.
- [18] Menachem Elimelech and William A. Phillip. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043):712–717, 2011.
- [19] Nikolay Voutchkov. *Seawater desalination: Pretreatment and commissioning*. WQP, LLC, 2018. Fuente autorizada sobre pretratamiento SWRO, apoya el rango de pH 5.5-6.0 para la coagulación férrica.
- [20] Lenntech. ED / EDR – Zero Liquid Discharge, s.f.
- [21] CBR Ingeniería. Desalinización, el futuro para obtener agua potable, February 2024.
- [22] Nikolay Voutchkov. Advances in seawater desalination pretreatment. *Desalination and Water Treatment*, 32(1-3):68–78, 2011.
- [23] Jinming Duan and John Gregory. Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100-102:475–502, 2003. Proporciona la teoría fundamental sobre el pH de mínima solubilidad para hidróxidos metálicos como el hidróxido férrico.

- [24] WesTech Engineering, LLC. *Installation, operation and maintenance for desalination plant Minera Los Pelambres, Chile*, abr 2023. Manual de Operación y Mantenimiento N° 24045A-IOM01, Versión 002; WesTech Job Number: 24045 A. Documento GCP-1001-01-ODC-0140-0583-M-VE-10042[002]-1-67.pdf.
- [25] F. Concha and A. Barrientos. *Solid-liquid separation in the mining industry*. Springer, 2012.
- [26] Antofagasta Minerals. Reporte de sostenibilidad 2025, 2025. Disponible en: <https://www.aminerals.cl/sostenibilidad/reporte-2025>.
- [27] Bechtel Chile Ltda. Criterio de diseño y filosofía de operación de la planta desalinizadora MLP INCO. Reporte Técnico GCP-1001-01-CS-0138-0580-B-CD-10001-r0, Minera Los Pelambres, 2020.
- [28] Seung-Hyun Kim, Choong-Sik Min, and Seockheon Lee. Application of dissolved air flotation as pretreatment of seawater desalination. *Desalination and Water Treatment*, 33(1-3):261–266, 2011.
- [29] Miguel Angel Sanz and Carlos Miguel. The role of swro barcelona-lobregat plant in the water supply system of barcelona area. *Desalination and Water Treatment*, 51(1-3):111–123, 2013.
- [30] Seung-Hyun Kim, Choong-Sik Min, and Seockheon Lee. Application of dissolved air flotation as pretreatment of seawater desalination. *Desalination and Water Treatment*, 33(1-3):261–266, 2011.
- [31] Johannes Haarhoff and James K. Edzwald. Adapting dissolved air flotation for the clarification of seawater. *Desalination*, 311:90–94, 2013.
- [32] Minera Los Pelambres and Veolia. Set de pruebas DAF: Pruebas operacionales y de laboratorio. Presentación técnica interna, 2024. Documento interno que resume los resultados de pruebas de jarra y operacionales para la optimización de la dosificación de coagulante en la planta desaladora MLP.

Anexos A

Análisis de Regresión Adicionales para TSS vs. Turbidez

A continuación, se presentan los gráficos de dispersión con los modelos de regresión que fueron evaluados adicionalmente al modelo lineal, como complemento al análisis presentado en la sección de diagnóstico. Cada modelo se presenta en una subsección dedicada.

A.1 Modelo Logarítmico

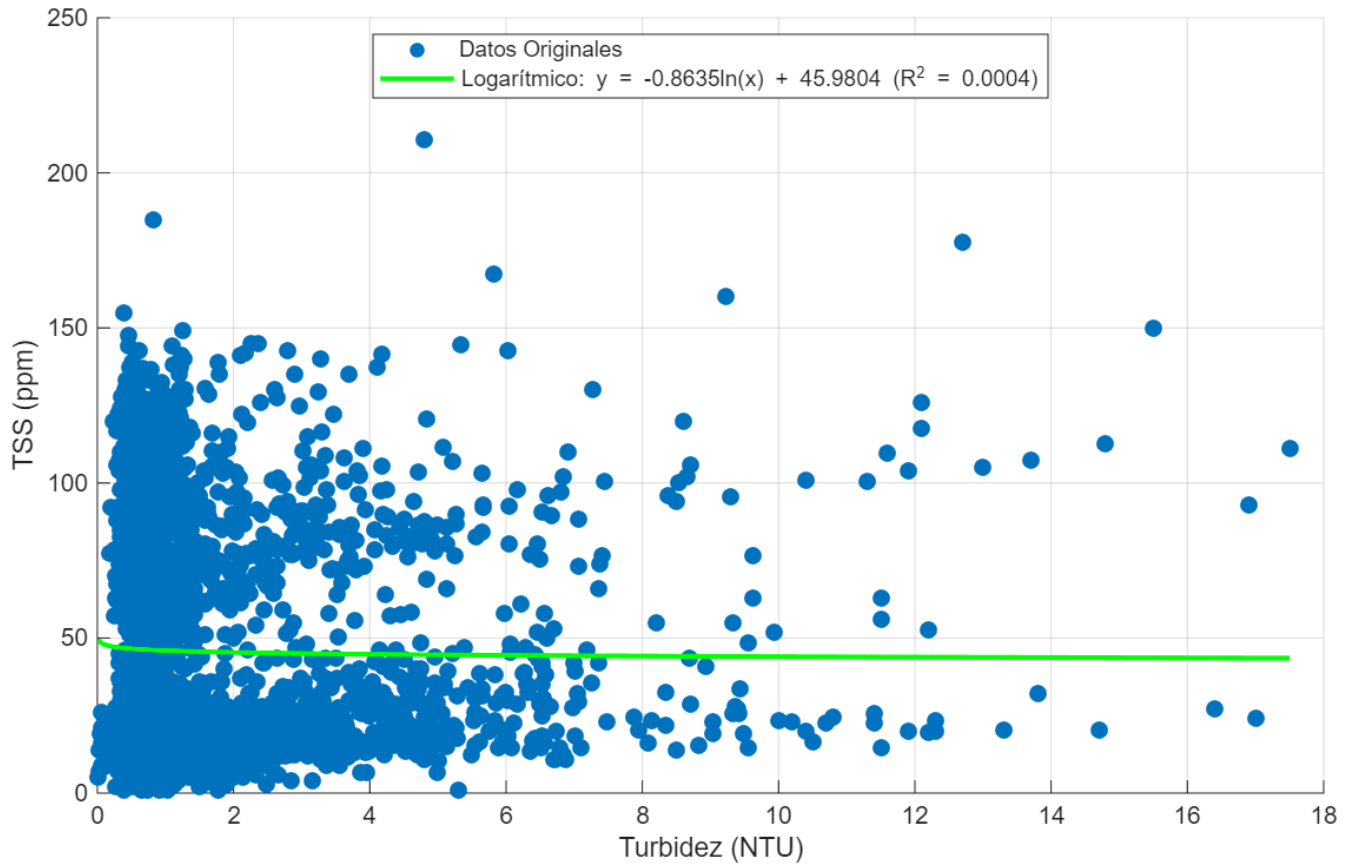


Figura 14: Ajuste de tendencia con modelo logarítmico para la relación TSS vs. Turbidez.

A.2 Modelo Exponencial

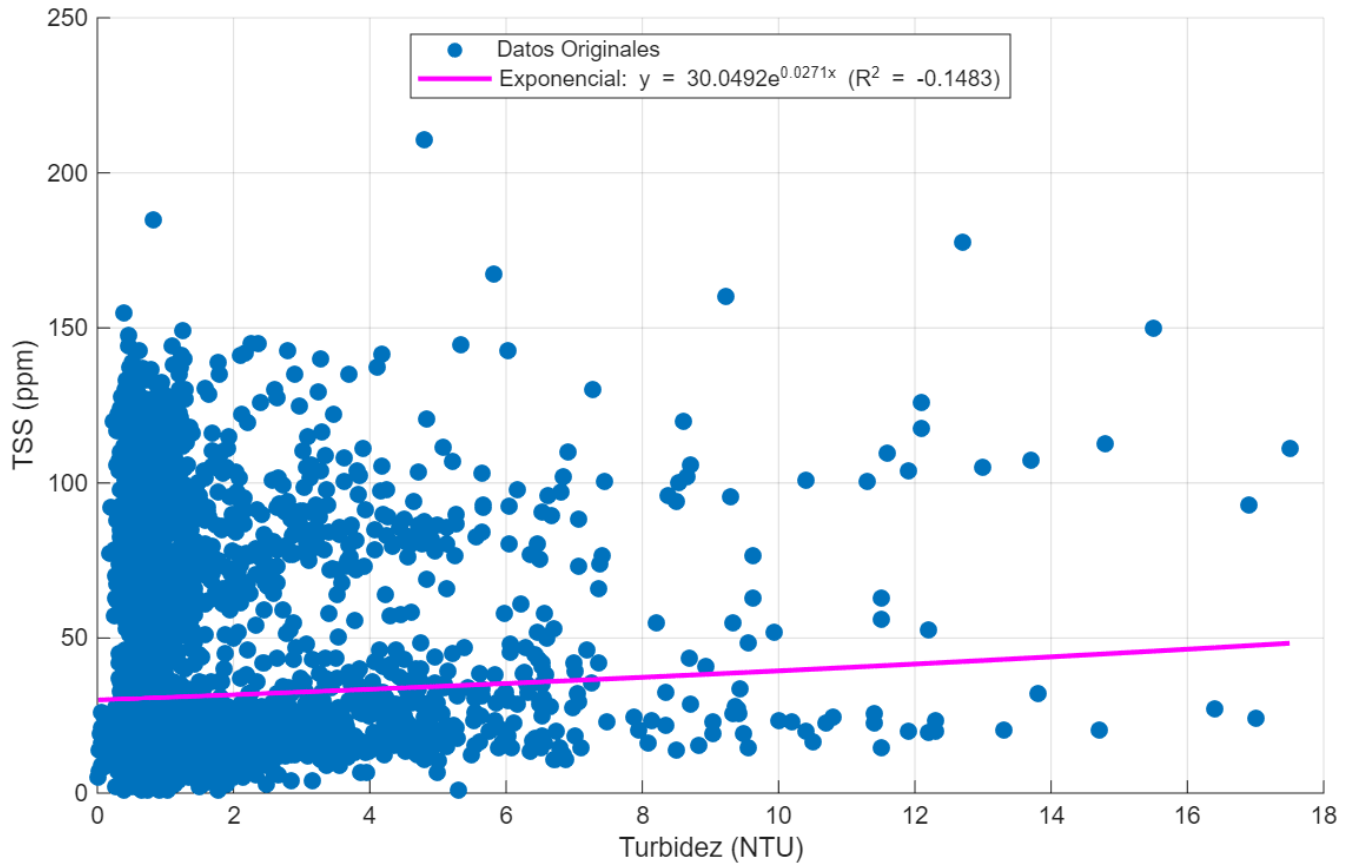


Figura 15: Ajuste de tendencia con modelo exponencial para la relación TSS vs. Turbidez.

A.3 Modelo Polinomial de Grado 2

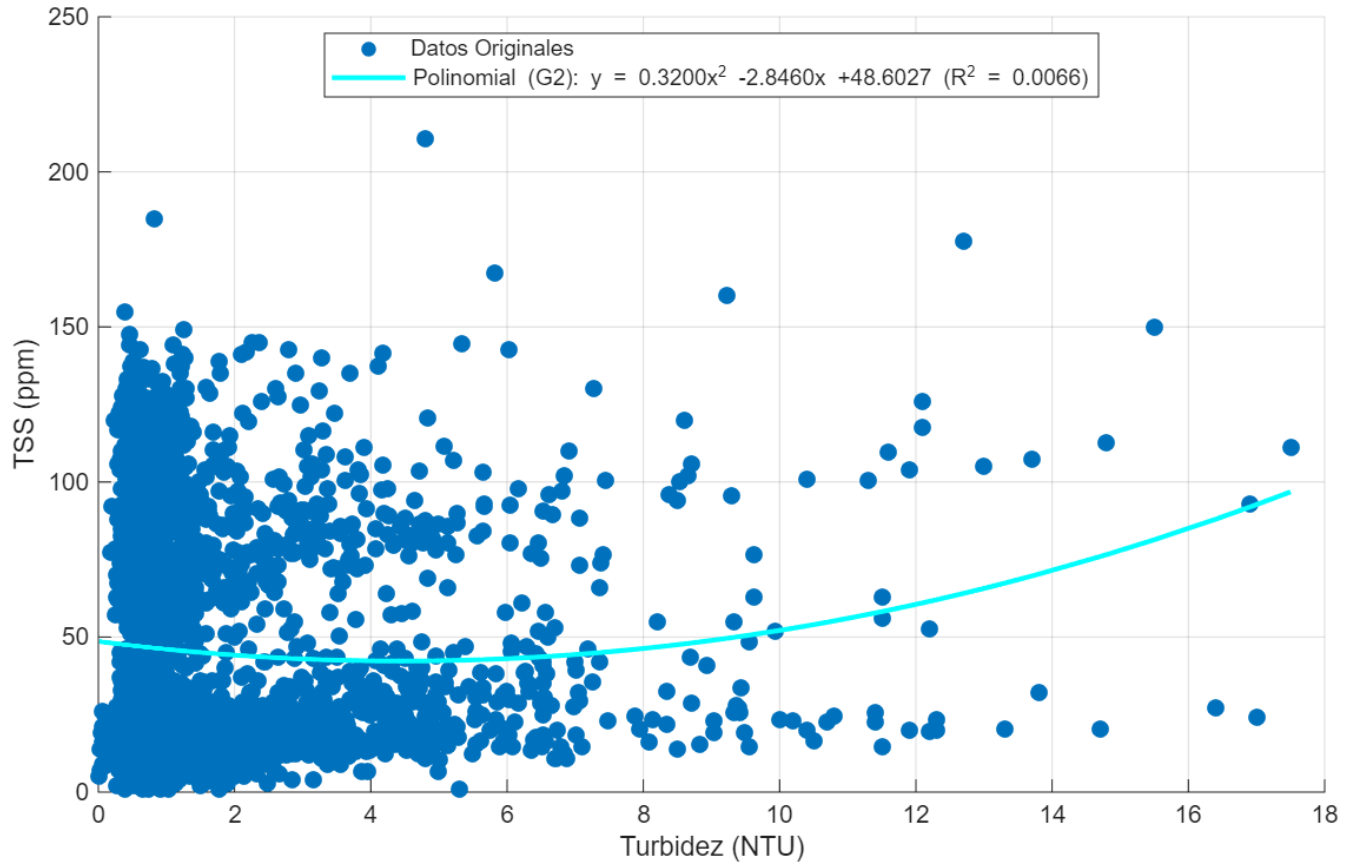


Figura 16: Ajuste de tendencia con modelo polinomial de grado 2 para la relación TSS vs. Turbidez.

Anexos B

Planes de Puesta en Marcha (PEM)

A continuación se presentan los documentos detallados para la puesta en marcha de los equipos de la línea de deshidratación de lodos.

B.1 Plan de Puesta en Marcha - Espesador de Lodos

Formato: Plan de Puesta en Marcha (PEM) – Espesador de Lodos

Equipo: Espesador de Lodos [0583-TH-7001]

Planta: Desaladora MLP

Documento N°: PEM-ESP-[2025]-[2026]

Revisión: 1

Fecha: [29-05-2025]

1. Fase 0: Preparación y Planificación del PEM del Espesador

- **1.1. Objetivo de la Fase:**
 - Asegurar que todos los recursos, documentación, personal y medidas de seguridad estén definidos y disponibles antes de iniciar las actividades de precomisionamiento del espesador.
- **1.2. Documentos de Referencia Específicos para el Espesador:**
 - [Listar: Manual O&M del fabricante del espesador, Planos P&ID relevantes, Hoja de Datos, Filosofía de Control específica, etc.]
- **1.3. Equipo de PEM y Responsabilidades :**
 - [Listar roles y responsables: Líder de PEM, Ing. Mecánico, Ing. Eléctrico, Ing. I&C, Operador Líder, Supervisor de Mantenimiento, Representante del Fabricante, etc.]
- **1.4. Cronograma Específico para PEM del Espesador:**
 - Realizar carta Gantt
- **1.5. Requisitos HSE Específicos para el Espesador:**
 - [Listar: Análisis de riesgos específicos, permisos de trabajo requeridos (PTAR), EPPs obligatorios, procedimientos de bloqueo y etiquetado, etc.]
- **1.6. Recursos Necesarios:**
 - [Listar: Herramientas especiales, equipos de prueba, insumos (agua, energía, floculante para pruebas), personal por disciplina.]

2. Fase 1: Precomisionamiento del Espesador (Verificaciones Estáticas y en Frío)

- **2.1. Objetivo de la Fase:**
 - Verificar la correcta instalación, completitud mecánica, conexiones eléctricas y de instrumentación del espesador y sus sistemas auxiliares, asegurando que esté listo para pruebas funcionales.
- **2.2. Actividades Típicas y Listas de Verificación (Checklists):**

- **Inspección Mecánica:**
 - [] Conformidad de la instalación con planos y especificaciones.
 - [] Estado del tanque (soldaduras, recubrimientos, limpieza interna).
 - [] Instalación y estado de rastras, puente, sistema de accionamiento.
 - [] Nivelación del tanque y del puente de las rastras.
 - [] Conexión y estado de tuberías de alimentación, descarga de *underflow*, descarga de *overflow*, y dosificación de floculante.
 - [] Verificación de torque de pernos y anclajes.
- **Inspección Eléctrica:**
 - [] Continuidad y aislamiento de cables de motor bombas asociadas.
 - [] Correcta conexión a tierra.
 - [] Verificación de protecciones eléctricas.
- **Inspección de Instrumentación y Control:**
 - [] Verificación de instalación de instrumentos (transmisores de nivel, torque, presión, flujómetros).
 - [] Calibración de instrumentos (presentar certificados).
 - [] Pruebas de lazo (señales desde/hacia PLC/DCS).
 - [] Verificación de válvulas de control y actuadores asociados.
- **Sistemas Auxiliares:**
 - [] Inspección del sistema de dosificación de floculante (tanque, bombas dosificadoras, líneas, puntos de inyección).
 - [] Inspección de bombas de *underflow* y *overflow* (si son dedicadas).
- **Limpieza:**
 - [] Limpieza final del interior del tanque y componentes.
 - [] Flushing de tuberías de alimentación y descarga (si es necesario).
- **2.3. Criterios de Aceptación:**
 - Todas las listas de verificación completadas y firmadas.
 - Ausencia de no conformidades mayores.
 - Confirmación de señales de I&C hacia y desde el sistema de control.
 - Certificados de calibración de instrumentos disponibles.
- **2.4. Entregables/Registros:**
 - Listas de verificación de precomisionamiento completadas.
 - Reporte de inspección mecánica, eléctrica y de I&C.
 - Punch List actualizado.
 - Certificados de calibración.

3. Fase 2: Comisionamiento del Espesador (Pruebas Funcionales con Agua)

- **3.1. Objetivo de la Fase:**

- Verificar el correcto funcionamiento de los componentes móviles, sistemas de control y seguridad del espesador utilizando agua como fluido de prueba.
- **3.2. Actividades Típicas y Procedimientos de Prueba:**
 - **Llenado del Tanque:**
 - [] Llenado controlado del espesador con agua hasta nivel operativo.
 - [] Verificación de estanqueidad del tanque y conexiones.
 - [] Verificación de funcionamiento de indicadores/transmisores de nivel.
 - **Pruebas de Bombas Asociadas (con agua):**
 - [] Pruebas funcionales de bombas de *underflow* (verificación de caudal, presión, consumo de corriente).
 - [] Pruebas funcionales de bombas de *overflow* .
 - **Pruebas del Sistema de Dosificación de Floculante (con agua):**
 - [] Pruebas de bombas dosificadoras (calibración de caudal vs. setpoint).
 - [] Verificación de líneas y puntos de inyección.
 - **Pruebas de Secuencias de Control y Enclavamientos:**
 - [] Verificación de secuencias de arranque/parada desde PLC/DCS.
 - [] Pruebas de alarmas (alto torque, bajo nivel) y enclavamientos de seguridad.
- **3.3. Criterios de Aceptación:**
 - Funcionamiento estable del sistema de rastras según diseño.
 - Bombas y sistema de dosificación operando según especificaciones.
 - Sistemas de control, alarmas y enclavamientos funcionando correctamente.
 - Ausencia de fugas o fallas mecánicas/eléctricas.
- **3.4. Entregables/Registros:**
 - Reportes de pruebas funcionales con agua.
 - Registros de calibración de bombas dosificadoras.
 - Punch List actualizado.

4. Fase 3: Puesta en Marcha del Espesador (Pruebas con Carga Real - Lodo)

- **4.1. Objetivo de la Fase:**
 - Introducir gradualmente el lodo (proveniente de FAD) al espesador y ajustar los parámetros operativos para alcanzar un funcionamiento estable y una separación sólido-líquido eficiente.
- **4.2. Actividades Típicas y Procedimientos de Prueba:**
 - **Introducción Gradual de Lodo:**
 - [] Inicio de alimentación de lodo al espesador a bajo caudal.
 - [] Incremento gradual del caudal de alimentación hasta el valor de diseño o el máximo procesable.

- **Ajuste de Dosificación de Floculante:**
 - [] Inicio de dosificación de floculante.
 - [] Optimización de la dosis de floculante (pruebas de jarra si es necesario o ajustes en línea) para lograr buena floculación y velocidad de sedimentación.
 - [] Monitoreo del punto de dosificación y mezcla.
- **Monitoreo y Ajuste Operativo:**
 - [] Monitoreo de la claridad del *overflow* (TSS ppm).
 - [] Monitoreo de la concentración de sólidos en el *underflow* (% sólidos).
 - [] Ajuste de la tasa de extracción del *underflow*.
- **Toma de Muestras:**
 - [] Muestreo regular de alimentación, *overflow* y *underflow* para análisis de laboratorio (% sólidos, TSS).
- **4.3. Criterios de Aceptación:**
 - Operación continua y estable durante un período definido a la carga de diseño o máxima alcanzable.
 - Cumplimiento preliminar de los parámetros de rendimiento (claridad del *overflow*, % sólidos del *underflow*).
 - Sistema de rastras y descarga de *underflow* operando sin problemas.
- **4.4. Entregables/Registros:**
 - Registros de operación durante la puesta en marcha (flujos, dosis de floculante, niveles).
 - Resultados de análisis de laboratorio preliminares.
 - Informe de ajustes realizados y problemas encontrados.

5. Fase 4: Pruebas de Rendimiento del Espesador y Optimización Inicial

- **5.1. Objetivo de la Fase:**
 - Verificar formalmente que el espesador cumple con las especificaciones de diseño y los objetivos de rendimiento bajo condiciones operativas normales y representativas. Identificar parámetros operativos óptimos.
- **5.2. Actividades Típicas y Procedimientos de Prueba:**
 - **Definición de Condiciones de Prueba:**
 - [Establecer el flujo de alimentación, características del lodo de entrada (TSS, tipo), y dosis de floculante para las pruebas de rendimiento.]
 - **Realización de Pruebas de Rendimiento:**
 - [] Operación continua bajo las condiciones de prueba definidas.
 - [] Medición sistemática y frecuente de:
 - Caudal de alimentación de lodo.

- Concentración de TSS en la alimentación.
 - Dosis de floculante (kg/ton lodo seco).
 - Caudal y TSS del *overflow*.
 - Caudal y % sólidos del *underflow*.
 - Consumo de energía (si es medible).
- **Análisis de Resultados:**
 - [] Cálculo de la eficiencia de recuperación de sólidos.
 - [] Cálculo de la tasa de carga de sólidos (kg/m²·h).
 - [] Comparación de los resultados con los valores de diseño y/o garantías del fabricante.
- **Optimización Inicial:**
 - [] Realización de ajustes finos en la dosis de floculante, tasa de extracción de *underflow*, etc., para maximizar el rendimiento.
- **5.3. Criterios de Aceptación (KPIs):**
 - [Definir KPIs y valores objetivo, : % sólidos en *underflow* ≥ [Valor Esperado] ; TSS en *overflow* ≤ [Valor Esperado] ppm; Recuperación de sólidos ≥ [Valor Esperado] ; Consumo específico de floculante ≤ [Valor Esperado] kg/ton lodo seco.]
- **5.4. Entregables/Registros:**
 - Reporte final de pruebas de rendimiento del espesador.
 - Curvas de operación (si se generan).
 - Parámetros operativos optimizados recomendados.
 - Certificado de aceptación de rendimiento (si aplica).

6. Documentación Final y Protocolos de Entrega del Espesador

- **6.1. Compilación del Dossier del PEM:**
 - [Listar todos los documentos que conformarán el dossier final del PEM del espesador.]
- **6.2. Procedimiento para Manejo de No Conformidades (Punch Lists):**
 - [Describir cómo se cierran los ítems pendientes.]
- **6.3. Protocolo de Aceptación y Entrega a Operaciones:**
 - [Definir los criterios y el proceso formal para la entrega del equipo al departamento de Operaciones.]
- **6.4. Capacitación (si es parte del alcance):**
 - [Registro de capacitación a operadores y personal de mantenimiento sobre el espesador.]

B.2 Plan de Puesta en Marcha - Centrífuga

Formato: Plan de Puesta en Marcha (PEM) – Centrifuga de Lodos

Equipo: Centrifuga Decantadora [0583-CF-7110]

Planta: Desaladora MLP

Documento N°: PEM-CENT-[2025]-[2026]

Revisión: 1

Fecha: [29-05-2025]

1. Fase 0: Preparación y Planificación del PEM de la Centrifuga

- **1.1. Objetivo de la Fase:**

- Asegurar que todos los recursos, documentación, personal y medidas de seguridad estén definidos y disponibles antes de iniciar las actividades de precomisionamiento de la centrifuga.

- **1.2. Documentos de Referencia Específicos para la Centrifuga:**

- Filosofía de control (GCP-1001-01-CS-0138-0000-J-CD-00008-r3)
- Criterio de diseño (GCP-1001-01-CS-0138-0580-B-CD-10001-r0)
- SISTEMA DE DESHIDRATACIÓN DE LODOS PID (GCP-1001-01-CS-0138-0583-M-PID-00021)

- **1.3. Equipo de PEM y Responsabilidades :**

- [Listar roles y responsables: Líder de PEM, Ing. Mecánico, Ing. Eléctrico, Ing. I&C, Operador Líder, Supervisor de Mantenimiento, Representante del Fabricante , Técnico especialista en vibraciones , etc.]

- **1.4. Cronograma Específico para PEM de la Centrifuga:**

Realizar carta Gantt

- **1.5. Requisitos HSE Específicos para la Centrifuga:**

- [Listar: Análisis de riesgos específicos (riesgo de atrapamiento por partes móviles, proyección de partes, ruido elevado, contacto con lodos/químicos), permisos de trabajo requeridos (PTAR), EPPs obligatorios (protección auditiva, facial, guantes), procedimientos de bloqueo y etiquetado para múltiples fuentes de energía, procedimientos de emergencia, delimitación de áreas, etc.]

- **1.6. Recursos Necesarios:**

- [Listar: Herramientas especiales (para torque de pernos de anclaje y componentes críticos, alineación láser si aplica), equipos de prueba (vibrómetro, tacómetro, analizador de calidad de energía), insumos (agua

limpia para pruebas, energía eléctrica, polímero para pruebas, lubricantes específicos según manual), personal por disciplina y turnos.]

2. Fase 1: Precomisionamiento de la Centrifuga (Verificaciones Estáticas y en Frío)

• 2.1. Objetivo de la Fase:

- Verificar la correcta instalación, completitud mecánica, conexiones eléctricas, de instrumentación y sistemas auxiliares (lubricación, refrigeración si aplica, dosificación de polímero) de la centrifuga, asegurando que esté lista para pruebas funcionales.

• 2.2. Actividades Típicas y Listas de Verificación (Checklists):

- **Inspección Mecánica:**
 - [] Conformidad de la instalación con planos, especificaciones del fabricante y recomendaciones de montaje (base, anclaje).
 - [] Nivelación precisa de la máquina.
 - [] Inspección del tambor (bowl), tornillo sinfín (scroll), caja de engranajes (gearbox) o sistema de accionamiento diferencial, rodamientos principales y de soporte.
 - [] Verificación de holguras, tolerancias y ajustes críticos según manual del fabricante.
 - [] Conexión y estado de tuberías de alimentación de lodo, descarga de torta (sólidos), descarga de centrado (líquido), y dosificación de polímero.
 - [] Inspección y llenado inicial del sistema de lubricación (verificación de niveles, tipo y calidad de lubricante, funcionamiento de bombas de lubricación si existen).
 - [] Verificación de guardas de seguridad y protecciones de partes móviles.
 - [] Pruebas de giro libre manual del tambor y scroll (si es posible y seguro, siguiendo procedimiento del fabricante).
- **Inspección Eléctrica:**
 - [] Continuidad, aislamiento y correcta conexión de cables de motor principal y motor de accionamiento diferencial (backdrive o similar, si aplica).
 - [] Correcta conexión a tierra de todos los componentes.
 - [] Verificación de protecciones eléctricas (térmicas, sobrecorriente) y configuración del variador de frecuencia (VFD) según especificaciones.
- **Inspección de Instrumentación y Control:**
 - [] Verificación de instalación y correcta conexión de instrumentos

(sensores de vibración, temperatura de rodamientos, torque del scroll, velocidad del tambor y diferencial, flujómetros de alimentación y polímero).

- [] Calibración de instrumentos (presentar/verificar certificados).
- [] Pruebas de lazo (verificación de señales desde/hacia PLC/DCS para cada instrumento y actuador).
- **Sistemas Auxiliares:**
 - [] Inspección y pruebas funcionales (sin carga) del sistema de dosificación de polímero (bombas, líneas, punto de inyección en la centrífuga).
 - [] Inspección de la bomba de alimentación de lodo a la centrífuga y su sistema de control de flujo.
 - [] Verificación del sistema de lavado interno de la centrífuga .
- **2.3. Criterios de Aceptación:**
 - Todas las listas de verificación de precomisionamiento completadas y firmadas por los responsables.
 - Ausencia de no conformidades mayores.
 - Confirmación de la correcta operatividad de todas las señales de instrumentación y control.
 - Sistema de lubricación verificado, lleno con el lubricante correcto y listo para operar.
 - Documentación de calibración de instrumentos disponible y aprobada.
- **2.4. Entregables/Registros:**
 - Listas de verificación de precomisionamiento (mecánicas, eléctricas, I&C) completadas.
 - Reporte de inspección detallado.
 - Punch List actualizado y categorizado.
 - Certificados de calibración de instrumentos.
 - Registros de pruebas de aislamiento y continuidad eléctrica.

3. Fase 2: Comisionamiento de la Centrífuga (Pruebas Funcionales con Agua)

- **3.1. Objetivo de la Fase:**
 - Verificar el correcto funcionamiento dinámico de la centrífuga, sus motores, sistemas de transmisión, control y seguridad utilizando agua limpia como fluido de prueba, antes de la introducción de lodo.
- **3.2. Actividades Típicas y Procedimientos de Prueba:**
 - **Pruebas del Sistema de Lubricación en Operación:**
 - [] Puesta en marcha y verificación del sistema de lubricación durante la

- operación con agua (flujo, presión, temperatura del aceite).
- **Pruebas de Motores y Arranque Secuencial:**
 - [] Arranque del motor principal y motor de accionamiento diferencial sin carga de proceso (solo con agua en el interior si el procedimiento lo requiere).
 - [] Verificación de sentido de giro correcto de todos los motores.
 - [] Medición del consumo de corriente en vacío y con la centrífuga llena de agua.
 - [] Incremento gradual de la velocidad del tambor hasta la velocidad de operación nominal, según las recomendaciones del fabricante.
 - [] Monitoreo continuo de niveles de vibración (sensores dedicados y/o mediciones portátiles) y temperaturas de rodamientos durante el arranque y operación estable con agua.
- **Pruebas de Secuencias de Control y Enclavamientos (con agua):**
 - [] Verificación de secuencias de arranque y parada automáticas desde PLC/DCS.
 - [] Pruebas funcionales de todas las alarmas (alta vibración, alta temperatura de rodamientos, alto torque del scroll, falla de lubricación) y paradas de emergencia (locales y remotas).
 - [] Verificación de la lógica de control para la velocidad diferencial (si es variable).
- **Pruebas del Sistema de Dosificación de Polímero (con agua):**
 - [] Pruebas de las bombas dosificadoras de polímero, bombeando agua a través del sistema hasta el punto de inyección en la centrífuga (calibración de caudal vs. setpoint del VFD o señal de control).
- **Pruebas de la Bomba de Alimentación (con agua):**
 - [] Verificación del caudal y presión de la bomba de alimentación de lodo (usando agua) a diferentes puntos de operación.
- **3.3. Criterios de Aceptación:**
 - Funcionamiento estable de la centrífuga a velocidad nominal con agua durante un período definido.
 - Niveles de vibración y temperatura de rodamientos dentro de los límites aceptables especificados por el fabricante.
 - Sistemas de control, alarmas y enclavamientos de seguridad funcionando correctamente y según diseño.
 - Ausencia de fugas, ruidos o comportamientos anómalos.
 - Consumo de corriente de motores dentro de lo esperado.

- **3.4. Entregables/Registros:**

- Reportes de pruebas funcionales con agua.
- Registros detallados de vibración y temperatura durante las pruebas.
- Registros de consumo de corriente de motores.
- Verificación de la lógica de control y enclavamientos.
- Punch List actualizado.

4. Fase 3: Puesta en Marcha de la Centrífuga (Pruebas con Carga Real - Lodo Espesado)

- **4.1. Objetivo de la Fase:**

- Introducir gradualmente el lodo espesado (proveniente del espesador) a la centrífuga y ajustar los parámetros operativos para lograr una deshidratación eficiente, estable y segura.

- **4.2. Actividades Típicas y Procedimientos de Prueba:**

- **Preparación Final y Verificaciones Pre-arranque con Lodo:**

- [] Asegurar que el espesador esté operando de manera estable y proveyendo lodo con características consistentes.
- [] Verificar disponibilidad y preparación del sistema de dosificación de polímero (solución preparada y lista para dosificar).

- **Introducción Gradual de Lodo:**

- [] Inicio de alimentación de lodo espesado a la centrífuga a un caudal bajo (25-50% del nominal).
- [] Arranque de la dosificación de polímero a una tasa inicial recomendada o basada en pruebas de jarra.
- [] Incremento gradual y escalonado del caudal de alimentación de lodo, monitoreando la respuesta de la máquina.

- **Ajuste y Optimización de Dosificación de Polímero:**

- [] Observación de la formación de flóculos en el lodo alimentado (si es visible) o del comportamiento de la torta y el centrado.
- [] Ajuste de la dosis de polímero (kg de polímero activo / tonelada de lodo seco) para lograr la mejor calidad de torta y claridad del centrado, minimizando el consumo de polímero.

- **Ajuste de Parámetros Operativos de la Centrífuga:**

- [] Ajuste de la velocidad diferencial entre el tambor y el scroll (si es variable) para optimizar la sequedad de la torta y la recuperación de sólidos.
- [] Monitoreo y ajuste del torque del scroll (puede ser un indicador de la carga de sólidos interna).

- [] Ajuste del nivel de estanque (pond level) dentro de la centrífuga, si esta opción está disponible y es ajustable.
 - **Monitoreo Continuo de Rendimiento y Estabilidad:**
 - [] Monitoreo visual y/o mediante análisis rápido de la sequedad de la torta (% sólidos).
 - [] Monitoreo visual y/o mediante análisis rápido de la claridad del centrado (TSS ppm).
 - [] Monitoreo continuo de vibraciones, temperaturas de rodamientos, torque y consumo de energía de los motores.
 - **Toma de Muestras Sistemática:**
 - [] Muestreo regular y representativo de: alimentación de lodo a la centrífuga, torta de sólidos descargada, y líquido centrado.
 - [] Envío de muestras al laboratorio para análisis de % sólidos, TSS, y otros parámetros relevantes si es necesario.
- **4.3. Criterios de Aceptación:**
 - Operación continua y estable de la centrífuga durante un período definido a una carga de proceso representativa.
 - Cumplimiento preliminar de los parámetros de rendimiento clave (% sólidos en la torta).
 - Niveles de vibración, temperatura y torque dentro de los límites operativos seguros y estables.
 - Sistema de dosificación de polímero operando correctamente y con dosis ajustada.
- **4.4. Entregables/Registros:**
 - Registros de operación durante la puesta en marcha con lodo (caudales, dosis de polímero, parámetros de la centrífuga, observaciones).
 - Resultados de análisis de laboratorio preliminares de las muestras tomadas.
 - Informe de los ajustes realizados, problemas encontrados y soluciones implementadas.

5. Fase 4: Pruebas de Rendimiento de la Centrífuga y Optimización Inicial

- **5.1. Objetivo de la Fase:**
 - Verificar formalmente que la centrífuga cumple con las especificaciones de diseño y los objetivos de rendimiento (garantías del fabricante, si aplican) bajo condiciones operativas normales y sostenidas. Identificar y establecer los parámetros operativos óptimos para diferentes condiciones de alimentación si es necesario.
- **5.2. Actividades Típicas y Procedimientos de Prueba:**

- **Definición de Condiciones de Prueba de Rendimiento:**
 - [Establecer el flujo de alimentación de lodo, concentración de sólidos del lodo de entrada, tipo y dosis de polímero para las pruebas de rendimiento formal. Se pueden definir varios puntos de prueba si se quiere evaluar el rendimiento en un rango de operación.]
- **Realización de Pruebas de Rendimiento (durante un período de 1, 4 o 5 horas por condición de prueba):**
 - [] Operación continua de la centrífuga bajo las condiciones de prueba definidas, manteniendo la estabilidad de los parámetros.
 - [] Medición sistemática y frecuente (con registro) de:
 - Caudal y % sólidos de la alimentación de lodo.
 - Dosis de polímero (kg/ton lodo seco).
 - Caudal (o peso acumulado durante un tiempo) y % sólidos de la torta descargada.
 - Caudal y TSS (o % sólidos) del centrado.
 - Consumo de energía de la centrífuga.
 - Parámetros operativos de la centrífuga (velocidad del tambor, velocidad diferencial, torque).
- **Análisis de Resultados y Cálculos de Rendimiento:**
 - [] Cálculo de la recuperación de sólidos (% sólidos capturados en la torta respecto a los alimentados).
 - [] Cálculo de la capacidad de procesamiento de sólidos secos (kg de sólidos secos/hora).
 - [] Comparación de los resultados obtenidos con los valores de diseño, especificaciones del fabricante y/o garantías de proceso.
- **Optimización Inicial y Mapeo de Operación (si aplica):**
 - [] Realización de ajustes finos en la dosis de polímero, velocidad diferencial, tasa de alimentación, etc., para diferentes tipos de lodo o condiciones de operación, con el fin de construir una base de conocimiento para la operación óptima.
- **5.3. Criterios de Aceptación (KPIs):**
 - [Definir KPIs y valores objetivo/mínimos aceptables: % sólidos en torta \geq [Valor Esperado] ; Recuperación de sólidos \geq [Valor Esperado] ; TSS en centrado \leq [Valor Esperado] ppm; Consumo específico de polímero \leq [Valor Esperado] kg/ton lodo seco; Capacidad de procesamiento de sólidos secos \geq [Valor Esperado] kg/h.]
- **5.4. Entregables/Registros:**

- Reporte final de pruebas de rendimiento de la centrífuga, incluyendo todos los datos brutos, cálculos y comparaciones.
- Curvas de operación (% sólidos en torta vs. dosis de polímero; recuperación de sólidos vs. velocidad diferencial).
- Recomendaciones de parámetros operativos optimizados para diferentes escenarios.
- Certificado de aceptación de rendimiento (si aplica, firmado por las partes involucradas).

6. Documentación Final y Protocolos de Entrega de la Centrífuga

- **6.1. Compilación del Dossier del PEM:**
 - [Listar todos los documentos que conformarán el dossier final del PEM de la centrífuga: listas de verificación, reportes de prueba, registros de calibración, manuales actualizados con parámetros de operación, etc.]
- **6.2. Procedimiento para Manejo de No Conformidades:**
 - [Describir el proceso para el seguimiento y cierre de los ítems pendientes identificados durante todas las fases del PEM.]
- **6.3. Protocolo de Aceptación y Entrega a Operaciones:**
 - [Definir los criterios y el proceso formal para la entrega del equipo y su documentación al departamento de Operaciones para su operación rutinaria.]
- **6.4. Capacitación (si es parte del alcance):**
 - [Registro de la capacitación impartida a operadores y personal de mantenimiento sobre la operación y mantenimiento específico de la centrífuga.]

Anexos C

Balance de Masa de Diseño (INCO)

A continuación se presentan las tablas de propiedades del balance de masa de diseño proporcionadas por la ingeniería del proyecto.

NÚMERO DE LÍNEA DE FLUJO STREAM NUMBER		1	2A	2B	3A	3B
DESCRIPCIÓN		AGUA DE MAR	ALIMENTACIÓN A LAS CELDA S FAD 1 - 4	ALIMENTACIÓN A LAS CELDA S FAD 5-8	ALIMENTACIÓN A PRE FILTROS 1 Y 2	ALIMENTACIÓN A PRE FILTROS 3 Y 4
DESCRIPTION		RAW SEA WATER	DAF FEED TO CELLS 1 - 4	DAF FEED TO CELLS 5 - 8	PRE FILTERS FEED 1 AND 2	PRE FILTERS FEED 3 AND 4
PROPIEDADES PROPERTIES	UNIDADES UNITS					
FLUJO (CONTINUO)	m ³ /h	3,002	3,002	NA	3,192	NA
FLOW RATE (CONTINUOS)	m ³ /d	72,054	72,054	NA	76,619	NA
FLUJO (INTERMITENTE)	m ³ /h	NA	NA	NA	NA	NA
FLOW RATE (INTERMITTENT)	m ³ /d	NA	NA	NA	NA	NA
TEMPERATURA						
TEMPERATURE	°C	12	12	NA	12	NA
PRESIÓN						
PRESSURE	bar	1.2	4.1	NA	6.5	NA
TDS	mg/L	36,640	36,640	NA	36,640	NA
TSS	mg/L	60	60	NA	3.5	NA
	kg/h (DS)	180	180	NA	11	NA
	kg/d (DS)	4,323	4,323	NA	265	NA
pH		8.30	8.30	NA	7.50	NA

Figura 17: Tabla de propiedades del balance de masa de diseño (Corrientes 1 a 3B).

22A	22B	23A	23B	24	25A	25B	26	27A
RETROLAVADOS COMBINADOS UF 1-10 Y PREFILTROS 1 Y 2 COMBINED BACKWASH UF 1-10 AND PREFILTERS 1 AND 2	RETROLAVADOS COMBINADOS UF 11-20 Y PREFILTROS 3 Y 4 COMBINED BACKWASH UF 11-20 AND PREFILTERS 3 AND 4	RESIDUOS DE LA LIMPIEZA CEB DE TRENES UF 1-10 AL TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN UF TRAINS 1-10 CLEANING WASTE TO NEUTRALIZATION TANK	RESIDUOS DE LA LIMPIEZA CEB DE TRENES UF 11-20 AL TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN UF TRAINS 11-20 CLEANING WASTE TO NEUTRALIZATION TANK	AGUA MOTRIZ PARA SHOCK DE CLORACIÓN INTERMITENTE EN LA CAPTACIÓN MOTIVE WATER FOR INTERMITTENT INTAKE NaOCI SHOCK CHLORINATION	LODOS DESDE CELDAS FAD 1 - 4 FLOATS FROM DAF CELLS 1 -4	LODOS DESDE CELDAS FAD 5-8 FLOATS FROM DAF CELLS 5- 8	LODOS DEL ESPESADOR THICKENER UNDERFLOW	LODOS DESHIDRATADOS DEWATERING PACKAGE UNDERFLOW
NA	NA	NA	NA	NA	6.4	NA	4.2	NA
NA	NA	NA	NA	NA	154	NA	100	NA
197	NA	120	NA	10	NA	NA	NA	3.2
4,719	NA	700	NA	6.78	NA	NA	NA	16
12	NA	12	NA	12	12	NA	12	12
2.5	NA	1.2	NA	5.5	1.0	NA	1.0	1.0
36,640	NA	36,767	NA	36,640	36,640	NA	36,640	36,640
36	NA	244	NA	-	32,810	NA	50,000	300,000
7	NA	29	NA	-	210	NA	208	975
170	NA	170	NA	-	5,038	NA	4,987	4,873
7.50	NA	7.00	NA	7.50	7.50	NA	7.50	7.50

Figura 18: Tabla de propiedades del balance de masa de diseño (Corrientes 21B a 27A).

Anexos D

Datos Operacionales para Balances de Materia

TSS_cap (ppm) TSS_outFAD (ppm) TSS_inFAD (ppm) kg/h in

4/20/2025 13:00	12	25	24.50	68.3
4/20/2025 17:00	1	3	14.05	39.2
4/20/2025 21:00	9	19	21.65	60.3
4/21/2025 1:00	18	22	30.20	84.1
4/21/2025 9:00	3	5	15.95	44.4
4/21/2025 13:00	3	2	15.95	44.4
4/21/2025 17:00	9	6	21.65	60.3
4/21/2025 21:00	12	14	24.50	68.3
4/22/2025 1:00	10	19	22.60	63.0
4/22/2025 5:00	4	14	16.90	47.1
4/22/2025 9:00	3	13	15.95	44.4
4/22/2025 13:00	5	13	17.85	49.7
4/22/2025 17:00	6	7	18.80	52.4
4/22/2025 21:00	18	16	30.20	84.1
4/23/2025 1:00	17	27	29.25	81.5
4/23/2025 5:00	15	19	27.35	76.2
4/23/2025 9:00	5	17	17.85	49.7
4/23/2025 13:00	3	9	15.95	44.4
4/23/2025 17:00	5	15	17.85	49.7
4/23/2025 21:00	26	25	37.79	105.3
4/24/2025 1:00	17	22	29.25	81.5
4/24/2025 5:00	18	25	30.20	84.1
4/24/2025 9:00	23	13	34.94	97.4
4/24/2025 13:00	18	21	30.20	84.1
4/24/2025 17:00	30	16	41.59	115.9
4/24/2025 21:00	29.5	40	41.12	114.6
4/25/2025 1:00	12.5	10	24.97	69.6
4/25/2025 5:00	17.5	15	29.72	82.8
4/25/2025 9:00	30	17	41.59	115.9
4/25/2025 13:00	20	29	32.10	89.4
4/25/2025 17:00	20	18.5	32.10	89.4
4/25/2025 21:00	27.5	35	39.22	109.3
4/26/2025 1:00	15	17.5	27.35	76.2
4/26/2025 5:00	18	22.5	30.20	84.1
4/26/2025 9:00	25	22	36.84	102.7
4/26/2025 13:00	15	27	27.35	76.2
4/26/2025 17:00	12.5	19.5	24.97	69.6
4/26/2025 21:00	22.5	35	34.47	96.0
4/27/2025 13:00	30	37.5	41.59	115.9
4/27/2025 17:00	32.5	25	43.97	122.5
4/27/2025 21:00	32.5	40.5	43.97	122.5
4/28/2025 1:00	17.5	22.5	29.72	82.8
4/28/2025 9:00	18	24	30.20	84.1
4/28/2025 13:00	20	32	32.10	89.4
4/28/2025 17:00	30	25	41.59	115.9
4/28/2025 21:00	17.5	25	29.72	82.8
4/29/2025 1:00	20	17.5	32.10	89.4
4/29/2025 5:00	25	37.5	36.84	102.7

4/29/2025 9:00	25	23	36.84	102.7
4/29/2025 13:00	17.5	30	29.72	82.8
4/29/2025 17:00	22.5	25	34.47	96.0
4/29/2025 21:00	27.5	40.5	39.22	109.3
4/30/2025 1:00	12.5	22.5	24.97	69.6
4/30/2025 5:00	17.5	15	29.72	82.8
4/30/2025 9:00	32.5	30	43.97	122.5
4/30/2025 13:00	30	35	41.59	115.9
4/30/2025 17:00	12.5	22	24.97	69.6
4/30/2025 21:00	25	30	36.84	102.7
5/1/2025 1:00	12.5	22.5	24.97	69.6
5/1/2025 5:00	20	25	32.10	89.4
5/1/2025 13:00	22	30	33.99	94.7
5/1/2025 17:00	13	18	25.45	70.9
5/1/2025 21:00	15	25	27.35	76.2
5/2/2025 5:00	4	13	16.90	47.1
5/2/2025 9:00	15	20	27.35	76.2
5/2/2025 17:00	18	23	30.20	84.1
5/2/2025 21:00	7	20	19.75	55.0
5/3/2025 1:00	8	20	20.70	57.7
5/3/2025 9:00	20	33	32.10	89.4
5/3/2025 13:00	15	22	27.35	76.2
5/3/2025 17:00	22	35	33.99	94.7
5/3/2025 21:00	8	15	20.70	57.7
5/4/2025 1:00	4	17	16.90	47.1
5/4/2025 5:00	3	1	15.95	44.4
5/4/2025 9:00	16	22	28.30	78.8
5/4/2025 13:00	30	28	41.59	115.9
5/4/2025 17:00	14	20	26.40	73.6
5/4/2025 21:00	3	14	15.95	44.4
5/5/2025 9:00	14	25	26.40	73.6
5/5/2025 13:00	25	23	36.84	102.7
5/5/2025 17:00	12	18	24.50	68.3
5/5/2025 21:00	13	12	25.45	70.9
5/6/2025 1:00	5	15	17.85	49.7
5/6/2025 5:00	3	16	15.95	44.4
5/6/2025 9:00	12	18	24.50	68.3
5/6/2025 13:00	13	11	25.45	70.9
5/6/2025 17:00	18	25	30.20	84.1
5/6/2025 21:00	6	10	18.80	52.4
5/7/2025 5:00	4	17	16.90	47.1
5/7/2025 9:00	24	30	35.89	100.0
5/7/2025 13:00	22	20	33.99	94.7
5/7/2025 17:00	22	20	33.99	94.7
5/7/2025 21:00	16	29	28.30	78.8
5/8/2025 5:00	11	10	23.55	65.6
5/8/2025 9:00	11	20.5	23.55	65.6
5/8/2025 13:00	13	20	25.45	70.9
5/8/2025 17:00	29	42	40.64	113.2

5/8/2025 21:00	56	32	66.28	184.7
5/9/2025 1:00	21	29	33.04	92.1
5/9/2025 5:00	14.5	20	26.87	74.9
5/9/2025 9:00	23.5	26.5	35.42	98.7
5/9/2025 13:00	16.5	21	28.77	80.2
5/9/2025 17:00	17.5	31	29.72	82.8
5/9/2025 21:00	43.5	35	54.41	151.6
5/10/2025 1:00	24	23.5	35.89	100.0
5/10/2025 5:00	15.5	23	27.82	77.5
5/10/2025 9:00	11	18.5	23.55	65.6
5/10/2025 13:00	17.5	19.5	29.72	82.8
5/10/2025 17:00	18	23.5	30.20	84.1
5/10/2025 21:00	20	28	32.10	89.4
5/11/2025 1:00	20	19	32.10	89.4
5/11/2025 5:00	18.5	23	30.67	85.5
5/11/2025 9:00	17.5	28.5	29.72	82.8
5/11/2025 13:00	35.5	24.5	46.81	130.4
5/11/2025 17:00	12.5	23	24.97	69.6
5/11/2025 21:00	13.5	27	25.92	72.2
5/12/2025 1:00	11	22	23.55	65.6
5/12/2025 5:00	15.5	29	27.82	77.5
5/12/2025 9:00	20	22.5	32.10	89.4
5/12/2025 13:00	25	21.5	36.84	102.7
5/12/2025 17:00	13	15	25.45	70.9
5/12/2025 21:00	12	25	24.50	68.3
5/13/2025 1:00	52.5	22	62.96	175.4
5/13/2025 5:00	15.5	29	27.82	77.5
5/13/2025 9:00	12	25.5	24.50	68.3
5/13/2025 13:00	14.5	18.5	26.87	74.9
5/13/2025 17:00	16.5	24.5	30.35	84.6
5/13/2025 21:00	25.5	24	38.89	108.4
5/14/2025 1:00	28.5	32	41.74	116.3
5/14/2025 5:00	38	25	50.76	141.4
5/14/2025 9:00	21	24.5	34.62	96.5
5/14/2025 13:00	25	17.5	38.42	107.0
5/14/2025 21:00	23	28	36.52	101.8
5/15/2025 1:00	22.5	30	36.04	100.4
5/15/2025 5:00	14	24	27.97	77.9
5/15/2025 9:00	23	37	36.52	101.8
5/15/2025 13:00	22	12	35.57	99.1
5/15/2025 17:00	11	19	25.12	70.0
5/15/2025 21:00	12	22	26.07	72.6
5/16/2025 1:00	27	30	40.32	112.3
5/16/2025 5:00	14	21	28.11	78.3
5/16/2025 9:00	5	3	19.43	54.1
5/16/2025 11:00	7	3	21.32	59.4
5/16/2025 17:00	3	2	17.53	48.8
5/17/2025 9:00	9	3	23.22	64.7
5/17/2025 11:00	14	7	27.97	77.9

5/17/2025 17:00	7	2	21.32	59.4
5/18/2025 9:00	12	6	26.07	72.6
5/18/2025 11:00	9	5	23.22	64.7
5/18/2025 17:00	13	7	27.02	75.3
5/19/2025 9:00	8	6	22.27	62.1
5/19/2025 11:00	4	1	18.48	51.5
5/19/2025 17:00	1	0	15.63	43.5
5/20/2025 9:00	18	10	31.77	88.5
5/20/2025 11:00	14	8	27.97	77.9
5/20/2025 17:00	14	7.6	27.97	77.9
5/21/2025 9:00	10	4.4	24.17	67.4
5/21/2025 11:00	9	5.0	23.22	64.7
5/21/2025 17:00	2	0.7	16.58	46.2
5/22/2025 9:00	6.5	3.2	20.85	58.1
5/22/2025 11:00	11	3.6	25.12	70.0
5/23/2025 9:00	20.5	11.1	34.14	95.1
5/23/2025 11:00	16	9.4	29.87	83.2
5/23/2025 17:00	17.5	9.8	31.30	87.2
5/24/2025 9:00	14	10.0	27.97	77.9
5/24/2025 11:00	14.5	3.4	28.45	79.3
5/24/2025 17:00	25	11.9	38.42	107.0
5/25/2025 9:00	15.5	8.4	29.40	81.9
5/25/2025 11:00	19.5	10.5	33.19	92.5
5/25/2025 17:00	12	6.5	26.07	72.6
5/26/2025 9:00	26	11.5	39.37	109.7
5/26/2025 11:00	40	22.3	52.66	146.7
5/26/2025 17:00	23.5	11.6	36.99	103.1
5/27/2025 9:00	30.5	9.9	43.64	121.6
5/27/2025 11:00	42	22.7	54.56	152.0
5/27/2025 17:00	35.5	19.9	48.39	134.8
5/28/2025 9:00	25	17.9	38.42	107.0
5/28/2025 11:00	55	13.0	66.91	186.4
5/29/2025 9:00	12	6.5	26.07	72.6
5/29/2025 11:00	20	9.8	33.67	93.8
5/29/2025 17:00	21	1.8	34.62	96.5
5/30/2025 9:00	21	1.1	34.62	96.5
5/30/2025 11:00	8	0.7	22.27	62.1
5/30/2025 17:00	3	0.2	17.53	48.8
5/31/2025 9:00	7	1.1	21.32	59.4
5/31/2025 11:00	7	1.0	21.32	59.4
5/31/2025 17:00	5	0.8	19.43	54.1
6/1/2025 9:00	5	0.1	19.43	54.1
6/1/2025 11:00	11	0.2	25.12	70.0
6/1/2025 17:00	4	0.7	18.48	51.5
6/2/2025 9:00	10	1.8	24.17	67.4
6/2/2025 11:00	5	0.6	19.43	54.1
6/2/2025 17:00	10	0.2	24.17	67.4
6/3/2025 9:00	8	0.7	22.27	62.1
6/3/2025 11:00	9	0.8	23.22	64.7

6/3/2025 17:00	10	2.1	24.17	67.4
6/4/2025 9:00	11	2.3	25.12	70.0
6/4/2025 11:00	7	1.6	21.32	59.4
6/4/2025 17:00	8	1.8	22.27	62.1
6/5/2025 9:00	12	2.3	26.07	72.6
6/5/2025 11:00	12	2.6	26.07	72.6
6/5/2025 17:00	11.5	1.8	25.60	71.3
6/6/2025 9:00	18	3.8	31.77	88.5
6/6/2025 11:00	10.5	3.4	24.65	68.7
6/6/2025 17:00	22	4.9	35.57	99.1
6/7/2025 9:00	33	5.5	46.01	128.2
6/7/2025 11:00	14	4.5	27.97	77.9
6/7/2025 17:00	16.5	5.1	30.35	84.6
6/8/2025 9:00	17	5.6	30.82	85.9
6/8/2025 11:00	19	2.9	32.72	91.2
6/8/2025 17:00	13	13.0	27.02	75.3
6/9/2025 9:00	18.5	2.9	32.24	89.8
6/9/2025 11:00	20.5	4.1	34.14	95.1
6/9/2025 17:00	15	0.5	28.92	80.6
6/10/2025 9:00	19.5	0.4	33.19	92.5
6/10/2025 11:00	17	0.3	30.82	85.9
6/10/2025 17:00	21	35	34.62	96.5
6/11/2025 9:00	30	32.5	43.17	120.3
6/11/2025 11:00	24	37.5	37.47	104.4
6/11/2025 17:00	15.5	25.5	29.40	81.9
6/12/2025 9:00	13	24	27.02	75.3
6/12/2025 11:00	14	27	27.97	77.9
6/12/2025 17:00	20	17	33.67	93.8
6/13/2025 9:00	4	8	18.48	51.5
6/13/2025 11:00	11	23	25.12	70.0
6/13/2025 17:00	15	22	28.92	80.6
6/14/2025 9:00	12	20	26.07	72.6
6/14/2025 11:00	34	32	46.96	130.9
6/14/2025 17:00	12	13	26.07	72.6
6/15/2025 9:00	18	11	31.77	88.5
6/15/2025 11:00	27	41	40.32	112.3
6/15/2025 17:00	24	36	37.47	104.4
6/16/2025 9:00	15	22	28.92	80.6
6/16/2025 11:00	39	52	51.71	144.1
6/16/2025 17:00	42	55	54.56	152.0
6/17/2025 9:00	29	43	42.22	117.6
6/17/2025 11:00	31	45	44.11	122.9
6/17/2025 17:00	46	59	58.36	162.6
6/18/2025 9:00	35	38	47.91	133.5
6/18/2025 11:00	31	45	44.11	122.9
6/18/2025 17:00	23	37	36.52	101.8
6/19/2025 9:00	26	38	39.37	109.7
6/19/2025 11:00	31	41	44.11	122.9
6/19/2025 17:00	19	29	32.72	91.2

6/20/2025 9:00	26.5	14	39.84	111.0
6/20/2025 11:00	23.5	37.5	36.99	103.1
6/20/2025 17:00	28.5	38	41.74	116.3
6/21/2025 9:00	41	49	53.61	149.4
6/21/2025 11:00	27.5	41.5	40.79	113.7
6/21/2025 13:00	21	35	34.62	96.5
6/21/2025 15:00	24	29.5	37.47	104.4
6/21/2025 17:00	24	36.5	37.47	104.4

kg/h out	Ef. Remoción	TSS_f6(ppm)			
66.1	3%			49%	9%
7.9	80%			49%	9%
50.3	17%			49%	9%
58.2	31%			49%	9%
13.2	70%			49%	9%
5.3	88%			49%	9%
15.9	74%			49%	9%
37.0	46%			49%	9%
50.3	20%			49%	9%
37.0	21%			49%	9%
34.4	23%			49%	9%
34.4	31%			49%	9%
18.5	65%			49%	9%
42.3	50%			49%	9%
71.4	12%			49%	9%
50.3	34%			49%	9%
45.0	10%			49%	9%
23.8	46%			49%	9%
39.7	20%			49%	9%
66.1	37%			49%	9%
58.2	29%			49%	9%
66.1	21%			49%	9%
34.4	65%			49%	9%
55.6	34%			49%	9%
42.3	63%			49%	9%
105.8	8%			49%	9%
26.5	62%			49%	9%
39.7	52%			49%	9%
45.0	61%			49%	9%
76.7	14%			49%	9%
48.9	45%			49%	9%
92.6	15%			49%	9%
46.3	39%			49%	9%
59.5	29%			49%	9%
58.2	43%			49%	9%
71.4	6%	170		49%	9%
51.6	26%			49%	9%
92.6	4%			49%	9%
99.2	14%			49%	9%
66.1	46%			49%	9%
107.1	13%			49%	9%
59.5	28%			49%	9%
63.5	25%			49%	9%
84.6	5%			49%	9%
66.1	43%			49%	9%
66.1	20%			49%	9%
46.3	48%			49%	9%
99.2	3%			49%	9%

60.8	41%	250	49%	9%
79.4	4%		49%	9%
66.1	31%		49%	9%
107.1	2%	360	49%	9%
59.5	14%		49%	9%
39.7	52%		49%	9%
79.4	35%		49%	9%
92.6	20%		49%	9%
58.2	16%		49%	9%
79.4	23%	110	49%	9%
59.5	14%		49%	9%
66.1	26%		49%	9%
79.4	16%		49%	9%
47.6	33%	200	49%	9%
66.1	13%		49%	9%
34.4	27%		49%	9%
52.9	31%		49%	9%
60.8	28%		49%	9%
52.9	4%		49%	9%
52.9	8%		49%	9%
87.3	2%		49%	9%
58.2	24%		49%	9%
92.6	2%		49%	9%
39.7	31%		49%	9%
45.0	5%		49%	9%
2.6	94%		49%	9%
58.2	26%		49%	9%
74.1	36%		49%	9%
52.9	28%		49%	9%
37.0	17%	250	49%	9%
66.1	10%		49%	9%
60.8	41%		49%	9%
47.6	30%		49%	9%
31.7	55%		49%	9%
39.7	20%		49%	9%
42.3	5%		49%	9%
47.6	30%	238	49%	9%
29.1	59%		49%	9%
66.1	21%	184	49%	9%
26.5	50%		49%	9%
45.0	5%		49%	9%
79.4	21%		49%	9%
52.9	44%		49%	9%
52.9	44%	412	49%	9%
76.7	3%	196	49%	9%
26.5	60%		49%	9%
54.2	17%		49%	9%
52.9	25%	394	49%	9%
111.1	2%		49%	9%

84.6	54%		49%	9%
76.7	17%		49%	9%
52.9	29%		49%	9%
70.1	29%		49%	9%
55.6	31%		49%	9%
82.0	1%		49%	9%
92.6	39%		49%	9%
62.2	38%	180	49%	9%
60.8	22%		49%	9%
48.9	25%		49%	9%
51.6	38%	352	49%	9%
62.2	26%		49%	9%
74.1	17%		49%	9%
50.3	44%		49%	9%
60.8	29%		49%	9%
75.4	9%		49%	9%
64.8	50%		49%	9%
60.8	13%		49%	9%
71.4	1%		49%	9%
58.2	11%		49%	9%
76.7	1%		49%	9%
59.5	33%		49%	9%
56.9	45%		49%	9%
39.7	44%		49%	9%
66.1	3%		49%	9%
58.2	67%		49%	9%
76.7	1%		49%	9%
67.5	1%		49%	9%
48.9	35%		49%	9%
64.8	23%		93%	26%
63.5	41%		93%	26%
84.6	27%	160	93%	26%
66.1	53%		93%	26%
64.8	33%		93%	26%
46.3	57%		93%	26%
74.1	27%		93%	26%
79.4	21%		93%	26%
63.5	19%		93%	26%
97.9	4%		93%	26%
31.7	68%		93%	26%
50.3	28%		93%	26%
58.2	20%		93%	26%
79.4	29%		93%	26%
55.6	29%		93%	26%
7.2	87%		93%	26%
8.2	86%		93%	26%
4.4	91%		93%	26%
8.9	86%		93%	26%
18.2	77%		93%	26%

6.0	90%		93%	26%
17.2	76%		93%	26%
13.9	78%		93%	26%
19.3	74%		93%	26%
15.1	76%		93%	26%
2.5	95%		93%	26%
1.3	97%		93%	26%
25.7	71%		93%	26%
19.9	74%		93%	26%
20.0	74%		93%	26%
11.7	83%		93%	26%
13.3	79%		93%	26%
2.0	96%		93%	26%
8.5	85%		93%	26%
9.5	86%		93%	26%
29.3	69%		93%	26%
24.8	70%		93%	26%
26.0	70%		93%	26%
26.5	66%		93%	26%
9.1	89%		93%	26%
31.6	71%		93%	26%
22.1	73%		93%	26%
27.7	70%		93%	26%
17.2	76%		93%	26%
30.4	72%		93%	26%
59.1	60%		93%	26%
30.6	70%		93%	26%
26.2	78%		93%	26%
60.1	60%		93%	26%
52.7	61%		93%	26%
47.2	56%		93%	26%
34.4	82%		93%	26%
17.1	77%		93%	26%
25.9	72%		93%	26%
4.8	95%		93%	26%
2.9	97%		93%	26%
1.9	97%		93%	26%
0.5	99%		93%	26%
2.9	95%		93%	26%
2.6	96%		93%	26%
2.1	96%		93%	26%
0.4	99%		93%	26%
0.5	99%		93%	26%
1.9	96%		93%	26%
4.7	93%		93%	26%
1.5	97%		93%	26%
0.6	99%		93%	26%
1.9	97%		93%	26%
2.1	97%		93%	26%

5.5	92%		93%	26%
6.2	91%		93%	26%
4.3	93%		93%	26%
4.7	92%		93%	26%
6.0	92%		93%	26%
6.9	91%		93%	26%
4.8	93%		93%	26%
10.0	89%		93%	26%
9.0	87%		93%	26%
12.9	87%		93%	26%
14.6	89%		93%	26%
11.9	85%	244	93%	26%
13.5	84%		93%	26%
14.9	83%		93%	26%
7.8	91%		93%	26%
34.4	54%		93%	26%
7.7	91%		93%	26%
10.9	89%	398	93%	26%
1.4	98%		93%	26%
1.1	99%		93%	26%
0.9	99%		93%	26%
92.6	4%	448	93%	26%
86.0	29%	125	93%	26%
99.2	5%		93%	26%
67.5	18%		93%	26%
63.5	16%	302	93%	26%
71.4	8%		93%	26%
45.0	52%	380	93%	26%
21.2	59%		93%	26%
60.8	13%		93%	26%
58.2	28%	316	93%	26%
52.9	27%	596	93%	26%
84.6	35%		93%	26%
34.4	53%		93%	26%
29.1	67%	268	93%	26%
108.5	3%	312	93%	26%
95.2	9%		93%	26%
58.2	28%		93%	26%
137.6	5%		93%	26%
145.5	4%	216	93%	26%
113.7	3%		93%	26%
119.0	3%		93%	26%
156.1	4%	218	93%	26%
100.5	25%	188	93%	26%
119.0	3%		93%	26%
97.9	4%		93%	26%
100.5	8%		93%	26%
108.5	12%	272	93%	26%
76.7	16%		93%	26%

37.0	67%		93%	26%
99.2	4%	212	93%	26%
100.5	14%		93%	26%
129.6	13%		93%	26%
109.8	3%		93%	26%
92.6	4%		93%	26%
78.0	25%		93%	26%
96.6	8%	173	93%	26%

Post ajuste

Parametros	solidos in (kg) solidos out (k) Eficiencia captura		
promedio	89.20	41.09	59%
desviacion es	27.19	39.47	34%
mediana	84.56	26.10	71%
Minimo	43.54	0.38	3%
Maximo	186.43	156.07	99%
pre ajuste			

Parametros	solidos in (kg) solidos out (k) Eficiencia captura		
promedio	82.08	58.05	29%
desviacion es	24.86	21.18	20%
mediana	81.49	58.20	27%
Minimo	39.16	2.65	1%
Maximo	184.69	111.10	94%

2786.4

	TSS_in	TSS_3
pre	17.2222222	21.9444444
post	18.255102	15.5344881

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: "Descripción técnica y operativa del sistema de tratamiento de lodos planta desaladora MLP"

Nombre Memorista: Jonatan Alexis Fernández Sáez

Modalidad	Proyecto	Profesor(es) Guía (s)
Concepto		
Calificación		
Fecha	29/08/2025	
Prof. Froilán Vergara G.		Prof. Andrés Ramírez Madrid
		Ingeniero Supervisor: Cristian Nanjari Zamora
		Institución: Minera los Pelambres

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Fernando Betacourt Cerda	Prof. Luis Pino Soto
--------------------------------	----------------------

Resumen

Esta memoria de título presenta un análisis técnico y operativo del sistema de tratamiento de lodos de la planta desaladora de Minera Los Pelambres (MLP). El diagnóstico inicial reveló deficiencias críticas: la unidad de Flotación por Aire Disuelto (FAD) operaba con una presión en los saturadores un 22% por debajo de su valor de diseño, y los equipos de deshidratación de lodos estaban fuera de servicio, impidiendo la purga efectiva de sólidos del sistema.

Para cuantificar el impacto de esta desviación, se evaluó el rendimiento del sistema FAD antes y después de corregir la presión al valor de diseño de 4.5 bar. El ajuste generó una mejora radical y estadísticamente significativa: la eficiencia de captura de sólidos aumentó del 27.1% al 52.5%. De manera crucial, el sistema pasó de un estado de alta volatilidad a una operación estable y predecible.

Se concluye que la baja presión de saturación era la causa principal de la ineficiencia e inestabilidad del sistema. La estrategia de optimización propuesta es doble: mantener permanentemente la operación a la presión de diseño y ejecutar los planes de puesta en marcha (PEM) desarrollados para el sistema de deshidratación, asegurando así la gestión global de sólidos de la planta.