

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesor Guía**

Dr. Leopoldo Gutiérrez

**Ingeniero Supervisor**

Sebastián Fredes Muñoz

**Balance hídrico de procesos metalúrgicos  
Molienda y Flotación en Planta  
Concentradora, Minera Los Pelambres  
ANTOFAGASTA MINERALS**

**FELIPE ALEJANDRO ORMEÑO PUENTES**

Informe de Memoria de Título

Para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Noviembre, 2024

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer inicial y primordialmente a mi familia, por ser el núcleo en esta etapa tan importante de mi vida. A mi madre Patricia por soportarme en los días difíciles, recibirme con una sonrisa a pesar de tener sus propias luchas internas; a mi padre Ricardo por el apoyo, disposición en ayudar y transmitirme valiosos consejos de vida, a mi hermana Camila por la frescura y energías que muchas veces no encuentro en mí y que intento aprender de ella; y a nuestra perrita Luna que se incorporó a nuestra familia hace tan poco y que me entrega paz que sólo ella puede entregarme.

Además, a todo mi grupo familiar que me brindó sus buenos deseos desde el primer día y me hizo sentir apoyado durante este proceso, ya sea preguntando por cómo estaba o intentando aprender acerca del proceso.

A mis amigos que me han entregados sus mejores deseos, que son importantes en mi vida y con los que he pasado hermosos momentos, que me encantaría nombrarlos uno a uno.

A mis amigos creados durante el transcurso de la carrera, con los cuales creé una hermandad que se consagró con la creación del "Club Social y Deportivo Talento Hecho Realidad" que espero que se mantenga a lo largo de nuestras vidas, con los cuales atesoro posiblemente parte de los mejores momentos de mi corta vida.

A Minera Los Pelambres, por brindarme esta oportunidad de desarrollar mi memoria, con la cual pude crecer como persona y como profesional. En especial, a mi tutor Sebastián Fredes que confió en mí y me apoyó en esta etapa, al equipo de Molienda, Don Jorge Olivares, Evelyn Diaz y Felipe Figueroa; a Don Oscar Pereira, del equipo de Flotación que siempre me transmitieron importantes enseñanzas de vida durante estos 6 meses y a mi compañera memorista, Javiera que se transformó en una gran amiga de vida.

Finalmente, al equipo de docentes del Departamento de Ingeniería Civil Metalúrgica que me formó como su futuro colega.

Quizás sus nombres no estén escritos acá, pero siempre los llevo en mi corazón.

**¡Gracias totales!**

## RESUMEN

El estudio desarrollado en esta memoria se llevó a cabo en su totalidad en las instalaciones de la Planta Concentradora, Minera los Pelambres con apoyo de las Superintendencias de Molienda y Flotación. El objetivo del estudio fue identificar oportunidades operacionales en el consumo del recurso hídrico, realizando un balance másico de este en el macrosistema de la Planta Concentradora.

Se realizó un levantamiento de datos operacionales en el periodo de últimos 5 años, desde 30 marzo de 2019 hasta el 30 de marzo de 2024. Esta información recolectada fue sometida a un análisis de datos, filtrando datos anómalos y realizando estudios estadísticos que garantizaran una representatividad en el comportamiento del sistema.

El balance de masa hídrico se planteó considerando el periodo transcurrido entre el 1 de octubre de 2023 y 30 de marzo de 2024, debido a la implementación del Proyecto INCO, que incorporó al sistema una Línea de molienda de nuevas características operacionales y una Línea de flotación Rougher. Inicialmente el sistema desarrollado fue la Planta Concentradora, para luego pasar a los balances de los subprocesos de Molienda y Flotación, con objetivo de detallar y caracterizar la mayor cantidad de flujos en cada una de sus etapas.

Los resultados del balance general indican que la planta concentradora de Minera Los Pelambres reutiliza actualmente un 88% de sus aguas, con un make-up de 0,22 m<sup>3</sup>/ton.

En el circuito de molienda, se identificó una oportunidad de posible ahorro hídrico en la etapa de molienda secundaria, aunque sujeta a observaciones y estudios adicionales debido a la falta de equipos de control. Esta etapa representa el mayor consumo de agua en la planta, con un requerimiento actual de 8.919 m<sup>3</sup>/h.

En el circuito de flotación colectiva, se destacó la necesidad de realizar estudios comparativos entre las diferentes líneas de flotación Rougher con objetivo de evaluar el impacto en la recuperación de cobre al reducir el uso de agua en la alimentación, dado que esta etapa es el segundo mayor consumidor de agua en la planta, con un consumo de 6.021 m<sup>3</sup>/h de agua de procesos. Finalmente, en el circuito de flotación selectiva se detectó la ausencia de datos operacionales que permitiesen caracterizar de manera óptima el proceso que se lleva a cabo.

## **ABSTRACT**

The study developed in this report was carried out entirely at the Concentrator Plant facilities of Minera Los Pelambres, with support from the Grinding and Flotation Superintendencies. The objective of the study was to identify operational opportunities in water resource consumption by conducting a mass balance of water in the plant's macrosystem.

Operational data was collected over the past 5 years, from March 30, 2019, to March 30, 2024. The collected information was subjected to data analysis, filtering out anomalous data and conducting statistical studies to ensure representativeness in system behavior.

The water mass balance was planned for the period between October 1, 2023, and March 30, 2024, due to the implementation of the INCO Project, which introduced a Grinding Line with new operational characteristics and a Rougher Flotation Line to the system. Initially, the developed system encompassed the Concentrator Plant, followed by balances of the Grinding and Flotation subprocesses to detail and characterize the largest number of flows in each of their stages.

The overall balance results indicate that Minera Los Pelambres' Concentrator Plant currently reuses 88% of its water, with a makeup rate of 0.22 m<sup>3</sup>/ton. In the grinding circuit, a potential water-saving opportunity was identified in the secondary grinding stage, though further observations and studies are required due to a lack of control equipment in these processes. This stage represents the highest water consumption in the plant, with a current demand of 8,919 m<sup>3</sup>/h.

In the collective flotation circuit, the need for comparative studies between the different Rougher flotation lines was highlighted. The goal is to assess the impact on copper recovery by reducing water usage in the feed, as this stage is the plant's second largest water consumer, with a process water consumption of 6,021 m<sup>3</sup>/h. Finally, in the selective flotation circuit, a lack of operational data was identified, preventing optimal characterization of the process in this area.

## **NOMENCLATURA**

MLP: Minera los Pelambres.

FE: Feeders.

CV: Correa.

ML: Molino.

TK: Estanque o Espesador.

ST: Chute.

PP: Bomba

CS: Clasificador.

BN: Bin.

BHC: Batería de hidrociclones.

FT: Celda.

%S<sub>w</sub>: Porcentaje de sólidos en peso.

SAG: Semi-autógeno.

Pebbles: Tamaño mineral que no puede ser molido, ni ayuda a la tarea de molienda.

Rougher: Etapa de flotación recuperadora.

Cleaner: Etapa de flotación de limpieza de concentrado.

Scavenger: Etapa de flotación de barrido, recuperación de las colas Cleaner.

TPH: Toneladas por hora.

m<sup>3</sup>/h: Metros cúbicos por hora.

l/s: Litros por segundo.

km: Kilometro.

g/cm<sup>3</sup>: Gramos por centímetro cúbico.

# ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 <i>Objetivos</i> .....	2
1.1.1 Objetivo general .....	2
1.1.2 Objetivos específicos .....	2
2. ANTECEDENTES TEÓRICOS .....	2
2.1 <i>Procesamiento de minerales sulfurados de cobre</i> .....	2
2.2 <i>Conminución</i> .....	2
2.2.1 Chancado.....	2
2.2.2 Molienda .....	3
2.3 <i>Clasificación</i> .....	6
2.3.1 Hidrociclones .....	6
2.5 <i>Concentración</i> .....	6
2.5.1 Flotación .....	6
2.6 <i>Separación sólido – líquido</i> .....	7
2.6.1 Espesamiento .....	7
3. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.....	8
3.1 <i>Antofagasta minerals</i> .....	8
3.2 <i>Minera los Pelambres</i> .....	8
3.2.1 Historia .....	8
3.2.2 Sectores .....	9
3.2.3 Productos.....	9
3.3 <i>Descripción del proceso productivo planta concentradora Minera los Pelambres.</i> 9	
3.3.1 Molienda .....	10
3.3.2 Planta de gravilla y pebbles .....	15
3.3.3 Flotación colectiva.....	16
3.3.4 Flotación selectiva.....	19
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	21
4.2 <i>Levantamiento de datos operacionales</i> .....	22
4.3 <i>Filtrado de datos</i> .....	23
4.4 <i>Cálculos estadísticos de datos</i> .....	23
4.5 <i>Balance hídrico</i> .....	24
4.5.1 Balance general planta .....	24
4.5.2 Molienda .....	24

4.5.3 Flotación colectiva.....	29
4.5.4 Flotación selectiva.....	32
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	33
5.1 <i>Datos operacionales</i> .....	33
5.1.1 Planta concentradora.....	33
5.1.1 Molienda.....	34
5.1.2 Flotación colectiva.....	37
5.1.3 Flotación selectiva.....	39
5.2 <i>Balance hídrico</i> .....	40
5.2.1 Balance general.....	40
5.2.2 Molienda.....	40
5.2.3 Flotación colectiva.....	44
5.2.4 Flotación selectiva.....	46
5.3 <i>Consumos</i> .....	48
5.3.1 Molienda.....	48
5.3.2 Flotación.....	49
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	51
6.1 <i>Conclusiones</i> .....	51
6.2 <i>Recomendaciones</i> .....	52
6.6.1 Evaluación técnico-económica de implementación de instrumentación de control de flujos en molienda.....	52
6.2.2 Implementación de "Reporte de Flujos" en Gerencia Concentradora.....	52
6.2.3 Calibración de equipos.....	53
7. BIBLIOGRAFÍA.....	54
8. ANEXOS.....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. "Molino de bolas" [5].</i>	4
<i>Figura 2. "Estructura Molino SAG" [4].</i>	5
<i>Figura 3. "Diagrama de flujo líneas 1, 2 y 3 Sector Molienda" (Minera Los Pelambres, 2023).</i>	12
<i>Figura 4. "Diagrama de flujo línea 4 Sector Molienda" (Minera Los Pelambres, 2023).</i>	14
<i>Figura 5. "Flotación Rougher planta concentradora" (Minera Los Pelambres, 2023).</i>	17
<i>Figura 6. "Circuitos de Remolienda y Flotación Scavenger planta concentradora" (Minera Los Pelambres, 2023).</i>	18
<i>Figura 7. "Diagrama de Flujo Flotación Selectiva" (Minera Los Pelambres, 2018).</i>	20
<i>Figura 8. "Diseño Experimental del estudio".</i>	21
<i>Figura 9. "Búsqueda datos operacionales en PI SYSTEM".</i>	22
<i>Figura 10. "Diagrama de flujo de circuito de molienda simplificado".</i>	25
<i>Figura 11. "Diagrama de flujo circuito de flotación colectiva simplificado".</i>	30
<i>Figura 12. "Diagrama de flujo circuito de flotación selectiva simplificado".</i>	32
<i>Figura 13. "Balance másico, Línea SAG-1".</i>	41
<i>Figura 14. "Balance másico, Línea SAG-2".</i>	42
<i>Figura 15. "Balance másico, Línea SAG-3".</i>	43
<i>Figura 16. "Balance másico, Línea SAG-4".</i>	44
<i>Figura 17. "Balance másico, Flotación Colectiva".</i>	45
<i>Figura 18. "Balance másico, Flotación Selectiva".</i>	47
<i>Figura 19. "Consumos por línea de molienda".</i>	48
<i>Figura 20. "Consumo de aguas de procesos, Flotación colectiva".</i>	49

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. "Nomenclatura diagrama de flujo simplificado, Molienda".</i>	25
<i>Tabla 2. "Nomenclatura de flujos".</i>	26
<i>Tabla 3. "Nomenclatura diagrama de flujo simplificado, Flotación colectiva".</i>	30
<i>Tabla 4. "Nomenclatura diagrama de flujo simplificado, Flotación selectiva".</i>	32
<i>Tabla 5. "Alimentaciones de agua a Planta Concentradora durante 01-10-2023 y 30-03-2024".</i>	33
<i>Tabla 6. "MAKE UP Planta Concentradora Minera Los Pelambres, 01-10-2023 y 30-03-2024".</i>	34
<i>Tabla 7. "Salidas de agua a Planta Concentradora durante 01-10-2023 y 30-03-2024".</i>	34
<i>Tabla 8. "Alimentación de agua y mineral a circuito de Molienda".</i>	35
<i>Tabla 9. " Porcentaje de sólidos, Molinos SAG".</i>	35
<i>Tabla 10. "Porcentaje de sólidos, Baterías de hidrociclones".</i>	36
<i>Tabla 11. "Alimentaciones de Agua en el circuito de Flotación colectiva".</i>	37
<i>Tabla 12. "Características de flujos pulpa alimentación, Flotación Rougher".</i>	37
<i>Tabla 13. "Características de pulpa alimentación, Flotación columnar".</i>	38
<i>Tabla 14. "Datos recopilados desde Reportes hídricos, Flotación colectiva".</i>	38
<i>Tabla 15. "Adiciones de agua Fresca".</i>	39
<i>Tabla 16. "Datos recopilados desde Reportes Hídricos, flotación selectiva".</i>	39
<i>Tabla 17. "Balance masico de agua Planta Concentradora período 1-10-2023 y 30-03-2024".</i>	40
<i>Tabla 18. "Consumo de agua fresca, Flotación selectiva".</i>	50

## **1. INTRODUCCIÓN**

Minera Los Pelambres y Antofagasta Minerals han priorizado históricamente la gestión eficiente del recurso hídrico como parte de su compromiso con la sostenibilidad. En respuesta a la prolongada sequía que ha afectado a la Región de Coquimbo en los últimos años y las problemáticas socioambientales asociadas, tanto para las comunidades locales como para la operación minera, es por eso que Minera Los Pelambres ha asumido importantes desafíos para convertirse en un proyecto minero sostenible a largo plazo, sin perder el foco en mantener mejoras continuas en la producción.

Un avance significativo en la gestión del agua ha sido la implementación de la primera planta desaladora de la zona, con capacidad de tratamiento de 400 l/s de agua de mar. Esta iniciativa es fundamental para garantizar un suministro confiable de agua y reducir el consumo de agua fresca. La inversión en esta tecnología representa un paso importante hacia la sostenibilidad, al asegurar que una mayor proporción del agua utilizada en los procesos operacionales no provenga de fuentes continentales.

Además de la desalación, Minera Los Pelambres se ha comprometido a mejorar constantemente la eficiencia en los procesos de recuperación y reutilización de aguas con el objetivo de que el agua desalada y reutilizada represente más del 90% de la alimentación total de agua en sus operaciones. Esta estrategia no solo ayuda a conservar los recursos hídricos naturales, sino que también reduce el impacto ambiental y fortalece la resiliencia de la operación ante las condiciones de sequía enfrentadas.

Para asegurar una gestión eficiente del recurso hídrico, la gerencia concentradora de Minera Los Pelambres ha identificado la necesidad de realizar un balance de agua en sus procesos metalúrgicos, especialmente en los subprocesos de Molienda y Flotación, principales consumidores de agua. Este estudio es esencial para identificar oportunidades de mejora operacionales, permitiendo a la empresa implementar medidas más efectivas para reducir el consumo de agua en sus procesos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

- Desarrollar un análisis del balance hídrico en los procesos de Molienda y Flotación en la Planta Concentradora de Minera los Pelambres.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Identificar líneas de suministro de agua.
- Determinar puntos e instrumentos de control para cuantificar flujos de pulpa y su caracterización.
- Realizar balance hídrico de Planta Concentradora Minera los Pelambres.
- Calcular principales consumos agua en el proceso de molienda y flotación.

## **2. ANTECEDENTES TEÓRICOS**

### **2.1 Procesamiento de minerales sulfurados de cobre**

Esta área de estudio describe el conjunto de técnicas y métodos utilizados en la separación y extracción de minerales valiosos con el fin de obtener productos de alto valor comercial.

El desafío principal del procesamiento de minerales sulfurados de cobre, tales como Calcopirita, Bornita, Covelina, entre otros, radica en la necesidad de liberar los minerales valiosos de la matriz mineralógica que los rodea, que frecuentemente corresponde a sulfuros de hierro, como la pirita. Este proceso se lleva a cabo en plantas concentradoras que realizan técnicas, chancado y molienda que corresponden a la conminución del mineral, clasificación mediante harneros e hidrociclones que permiten una selección granulométrica para facilitar la posterior concentración en los circuitos de flotación.

### **2.2 Conminución**

#### **2.2.1 Chancado**

El chancado marca el inicio de la conminución, siendo la fase inicial en la reducción del tamaño de los minerales extraídos desde la mina. Sus principales propósitos son liberar partículas de mineral y lograr una granulometría uniforme. Los equipos empleados, conocidos como chancadores o trituradores, funcionan eléctricamente y reducen el tamaño del mineral principalmente por fricción. Generalmente el proceso de chancado

se realiza en dos grandes etapas, en el chancado primario que generalmente realizada en trituradores de mandíbula o giratorios donde la granulometría es reducida hasta un diámetro aproximado de 8 pulgadas, luego ocurre el chancado secundario, que utiliza principalmente chancadores de conos donde su reduce el tamaño de partícula hasta un diámetro de 3 pulgadas, y en caso de ser necesario se realiza una etapa terciaria de chancado donde se obtiene una granulometría de ½ pulgada [1].

### **2.2.2 Molienda**

Corresponde a la segunda etapa de conminución, es aquí donde se completa la reducción de tamaño y liberación del mineral para la posterior etapa de concentración en celdas de flotación, este proceso se lleva a cabo en grandes equipos eléctricos giratorios o molinos de forma cilíndrica, clasificados como convencionales (molienda de bolas y barras) y no convencionales (molienda autógena y semiaútoгена), que realizan la molienda mediante la combinación de los mecanismos de fragmentación impacto y abrasión [2].

La alimentación tradicional de estos equipos es el mineral previamente chancado, agua, que puede ser recirculada o fresca dependiendo del diseño operacional de la planta y los reactivos necesarios para la etapa de flotación, formando así una pulpa que fluctúa entre los 65 y 80% solidos en peso durante el proceso [2].

### **Molienda Convencional**

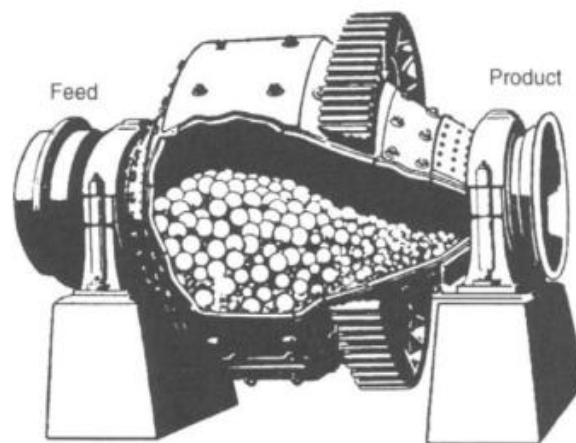
Los molinos convencionales más comunes son los molinos de barras y los molinos de bolas. Estos molinos se caracterizan porque usan como medios de molienda, cuerpos de acero (barras o bolas) que son grandes y pesados en comparación con las partículas de mena, pero pequeños en comparación al diámetro del molino. Estos cuerpos de molienda ocupan menos de la mitad del volumen interno del molino y constituyen la mayoría de la masa en el interior del molino. Las partículas de mena, ya sea como polvo seco o como una pulpa espesa, esencialmente llenan los intersticios entre los medios de molienda [3].

Los molinos de bolas, que tal como su nombre lo indica, utiliza bolas de acero para moler el mineral que ocupan aproximadamente entre el 40 y 45% de capacidad del equipo, la alimentación de estos equipos depende de la configuración del circuito de molienda,

donde este tipo de molino puede abastecer a todo el proceso o ser utilizado (más comúnmente) como molienda secundaria [3].

El rango de operación normal de los molinos de bolas es entre 65 a 80% de sólidos en peso, dependiendo de la mena. La viscosidad de la pulpa aumenta con la fineza de las partículas, por lo tanto, los circuitos de molienda fina pueden necesitar densidad de pulpa menor [3].

La estructura general de estos equipos de molienda se puede observar claramente en la Figura 1 que se presenta a continuación:



*Figura 1. "Molino de bolas" [5].*

Estos procesos pueden ocurrir tanto en húmedo, como en seco, siendo más utilizada la primera debido a que posee mayores ventajas operacionales, siendo alguna de estas: un menor consumo de energía específica, facilidad para adicionar reactivos, mayor capacidad de tratamiento y disminución en producción de polvos. Siendo así, necesaria realizar molienda en seca si y sólo sí, se requiere un producto seco o si el mineral presenta problemas al interactuar con el agua [2].

### **Molienda SAG**

En este tipo de equipos la conminución del mineral es llevada a cabo mediante la trituración realizada por bolas de acero, pero a diferencia de los molinos de bolas tradicionales, en este tipo de molinos, el impacto y abrasión entre el mineral también apoya al proceso de molienda, de ahí el nombre "semiautógeno". Generalmente las

bolas ocupan alrededor del 8 al 15 por ciento del volumen total del molino y la carga total ocupa hasta un 30% del volumen total [4].

La alimentación de estos equipos proviene directamente desde chancado primario, recibiendo así mineral con una granulometría mayor con respecto a la molienda convencional que es alimentada con mineral procesado en chancado secundario y terciario. Otra gran diferencia de estos equipos con la molienda de bolas está en sus dimensiones mayores que permiten una caída libre mayor distancia, permitiendo de esta forma obtener un circuito de chancado/molienda más efectivo que el convencional [4].

Estos equipos están diseñados como un circuito cerrado de molienda, es decir, las partículas de mineral no pueden abandonar el equipo hasta que la conminución haya sido la suficiente para que estas puedan avanzar hacia las parrillas de descarga y harneros rotarios "Trommel" en cual el material de mayor tamaño que las aberturas es denominado pebbles, mineral de tamaño intermedio que no logra ser molido dentro del equipo y es enviado hacia circuitos de chancado hasta ser recirculado al circuito de molienda nuevamente [4].

La estructura general de estos equipos de molienda se logra observar la Figura 2 presentada a continuación:

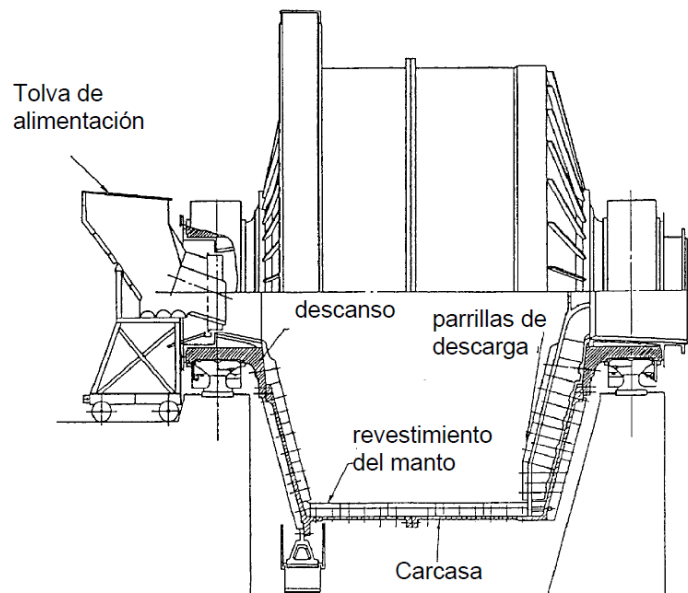


Figura 2. "Estructura Molino SAG" [4].

## **2.3 Clasificación**

Se denomina clasificación a la operación de separación de los componentes de una mezcla de partículas en dos o más fracciones de acuerdo con su tamaño, siendo cada grupo obtenido más uniforme en esta propiedad que la mezcla original. El mecanismo que se utiliza para separar las partículas según su tamaño es la sedimentación. En este caso, también influye la forma de las partículas, las densidades del sólido y fluido y la concentración y viscosidad de la suspensión [6].

### **2.3.1 Hidrociclones**

Este tipo de clasificadores son equipos cilíndricos con fondo cónico, en el cual la alimentación es tangencial en la parte superior produciendo así la fuerza centrífuga que permite la clasificación del mineral. En el centro de la parte cilíndrica del equipo se ubica una salida denominada "vortex", de la cual se obtiene el mineral fino, también posee otra salida en la zona inferior del cono, que recibe el nombre de "ápex", de la cual es clasificado el mineral grueso [6].

Las partículas en la alimentación tangencial deben de romper la resistencia del fluido que se mueve hacia el eje del equipo, debido a esto las partículas más gruesas se acercaran a las paredes del hidrociclón, mientras que las partículas más finas que no logran romper la resistencia serán arrastradas hacia el eje del equipo. Así la corriente axial separa las partículas finas de las gruesas, yendo en sentidos contrarios, las partículas mayores harán un movimiento en espiral cercano a las paredes y descendente que saldrán por el ápex y constituyendo la descarga de gruesos, mientras que los harán un movimiento similar en el eje, pero con sentido ascendente, saliendo del vortex constituyendo el rebalse de finos [6].

## **2.5 Concentración**

### **2.5.1 Flotación**

Proceso fisicoquímico en el cual se aprovechan las propiedades superficiales de las partículas, que pueden ser hidrofílicas o hidrofóbicas de forma natural o inducida, con el objetivo de producir un "concentrado" con un alto contenido del mineral de interés, mientras que la corriente con bajo contenido del mineral valioso recibe el nombre de cola de "flotación" [9].

Durante la flotación, las partículas hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire generadas mediante inyección. Estas partículas ascienden hacia la superficie de la celda, formando el concentrado, mientras que las partículas hidrofílicas, siendo principalmente, el material no deseado se dirige hacia la parte inferior de la celda como colas [9].

Los circuitos de flotación típicamente comprenden tres etapas principales, cada una con funciones distintas. La primera es la etapa Rougher o Primaria, cuya función principal es recuperar la mayor cantidad de mineral posible. Luego está la etapa Cleaner o de Limpieza, que tiene como objetivo purificar el concentrado obtenido en etapas anteriores para aumentar su grado de concentración. Finalmente, la etapa Scavenger o de Barrido busca minimizar las pérdidas de mineral en otras etapas del proceso de flotación. Además de estas etapas, los circuitos suelen incluir una etapa de remolienda, que permite liberar aún más las partículas que lograron flotar en la etapa Rougher pero que no lo lograron en etapas posteriores [10].

Comúnmente en las celdas de flotación se trabaja en un porcentaje de sólidos del orden de 30%, sin embargo, desde los procesos de molienda la pulpa posee un porcentaje de sólidos entre 65 - 80%, lo que para el proceso de concentración se transforma en un problema operacional, ya que debido a la alta viscosidad de la pulpa se produce un efecto adverso en el ascenso del conjunto burbuja-partícula, es por ello que es necesaria la adición de agua con fin de diluir la pulpa y disminuir la viscosidad de la alimentación a los circuitos de flotación [9].

## **2.6 Separación sólido – líquido**

### **2.6.1 Espesamiento**

Proceso utilizado en minería con fin de aumentar el porcentaje de sólidos en una suspensión líquida, se lleva a cabo en equipos llamados espesadores, donde dicha suspensión se ve sometida a un proceso de sedimentación, en el cual los sólidos más pesados se van al fondo del equipo, así recuperando el agua clarificada en parte superior. Dependiendo del diseño del equipo y las características del material a tratar, se pueden adicionar diferentes agentes floculantes para facilitar la aglomeración de las partículas y mejorar el rendimiento en la sedimentación [11].

## **3. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA**

### **3.1 Antofagasta minerals**

Antofagasta minerals es una empresa minera perteneciente al grupo "Antofagasta PLC", siendo una de las diez mayores productoras de cobre en el planeta, con base en nuestro país, Chile. El grupo opera cuatro minas a rajo abierto, siendo estas Minera Centinela, Minera Antucoya y Minera Zaldívar ubicadas en la región de Antofagasta, mientras que Minera los Pelambres se encuentra en la región de Coquimbo. En el año 2023, la empresa produjo 660.600 toneladas de cobre, que superó en un 2% en comparación al año 2022 [13].

### **3.2 Minera los Pelambres**

#### **3.2.1 Historia**

Los inicios de Los Pelambres se remontan al año 1914, cuando se inició la exploración del depósito liderada por William Braden Burford, luego de un periodo largo durante los años 1969 – 1971 ENAMI realizó una exploración con fin de definir el potencial del depósito, posterior a esto Anaconda Minerals adquiere los derechos sobre Los Pelambres en 1978, sin embargo, en el año 1985 Antofagasta Holdings adquiere Anaconda Minerals y sus derechos sobre Los Pelambres [14].

Luego de más de una década en el año 1997 se aprueba Estudio de Impacto Ambiental, además del inicio y construcción del proyecto Minera Los Pelambres con 85 ktpd, donde los japoneses toman una participación de un 40% [14].

Dentro de los últimos hechos históricos, uno que impacta dentro del estudio de esta memoria es la implementación de una planta desalinizadora en 2021 con capacidad de 400 l/s [14].

Actualmente, la empresa se encuentra dentro de los 5 principales productos de cobre en el país, siendo propiedad de Antofagasta Minerals en un 60% y 40% del grupo japonés compuesto por Nippon LP Resources B.V y MM LP Hoding B.B en un 25% y 15% respectivamente [14].

### **3.2.2 Sectores**

#### 1. Área de explotación

El yacimiento de minerales sulfurados se encuentra ubicado en la región de Coquimbo, 45 km al este de la ciudad de Salamanca, Provincia del Choapa, en la cordillera de los Andes a una altura aproximada de 3600 metros sobre el nivel del mar, aquí se lleva a cabo la perforación, tronadura y chancado primario.

#### 2. Planta concentradora

Se encuentra localizada a 35 km de Salamanca, a una altura de 1600 metros sobre el nivel del mar, aquí se encuentra el stock pile, sector molienda, sectores de flotación y espesamiento.

#### 3. Tranque El Mauro

Ubicado a 13 km de Caimanes, comuna de Los Vilos, aquí es donde llegan los relaves provenientes de la planta concentradora mediante relaveductos para así ser tratados y poder recircular agua a planta.

#### 4. Puerto Punta Chungo

Se ubica en la ciudad de Los Vilos, donde el concentrado de cobre es comercializado a diferentes lugares el mundo.

### **3.2.3 Productos**

El producto principal de los Pelambres es el concentrado de cobre con contenido de metales valiosos tales como oro y plata, también se produce un concentrado de molibdeno que es comercializado como subproducto. La producción de cobre durante el año 2023 fue de 300.300 toneladas, para el mismo año la producción de molibdeno fue de 8.100 toneladas. La última década, Los Pelambres ha aportado en 1% del PIB nacional, mientras que en la región de Coquimbo representa más de 20% del PIB nacional [15].

## **3.3 Descripción del proceso productivo planta concentradora Minera los Pelambres**

El proceso productivo de Minera los Pelambres comienza en la mina previamente mencionada, inicia con el proceso de perforación de bancos, donde se colocan

explosivos, a posterior el mineral sulfurado es desprendido a una razón de 150.000 toneladas diarias mediante tronaduras, el cual es cargado con palas y transportado mediante camiones de extracción hacia la etapa de chancado primario, donde se busca una reducción de tamaño de 7 pulgadas [16].

### **3.3.1 Molienda**

El material ya chancado es llevado hacia la planta concentradora mediante correas transportadoras de una extensión de 13 km hacia el Stock Pile con capacidad de 650.000 toneladas donde es depositado, de las cuales aproximadamente 80.000 toneladas del Stock Pile son consideradas "carga viva" que alimenta las 4 líneas SAG mediante 16 feeders [16].

#### **Línea de molienda SAG 1**

Esta línea alimenta con mineral mediante feeders al molino SAG 320-ML-001 desde el Stock Pile y con bolas de 5,5 [pulg], además es adicionada agua de procesos y cal en la boca de alimentación del equipo, obteniéndose dos productos, catalogados como "gruesos" y "finos", estos son clasificados mediante harneros Trommel, el producto grueso es enviado hacia la planta de gravilla y pebbles. El producto fino es enviado hacia los estanques 320-TK-044A y 320-TK-044B, donde se adiciona agua de procesos para diluir la pulpa y los reactivos Xantato, MATCOL, Diésel y MX para acondicionar el mineral para la flotación. Luego, mediante bombas se traslada la pulpa hacia las baterías de hidrociclones 320-CS-001/002. El underflow de los equipos clasificadores es enviado a los molinos de bolas 320-ML-004/005, por otro lado, el overflow es enviado hacia el 320-ST-004 donde se le agrega agua de procesos, espumante y AP404, dicha pulpa es enviada al 330-ST-005 que alimenta a las líneas de flotación [16].

#### **Línea de molienda SAG 2**

Esta línea alimenta con mineral mediante feeders al molino SAG 320-ML-002 desde el Stock Pile y con bolas de 5,5 [pulg], además es adicionada agua de procesos y cal en la boca de alimentación del equipo, obteniéndose dos productos, catalogados como "gruesos" y "finos", estos son clasificados mediante harneros Trommel, el producto grueso es enviado hacia la planta de gravilla y pebbles. El producto fino es enviado hacia los estanques 320-TK-045A y 320-TK-045B, donde se adiciona agua de procesos para diluir la pulpa y los reactivos Xantato, MATCOL, Diésel y MX para acondicionar el mineral

para la flotación. Luego, mediante bombas se traslada la pulpa hacia las baterías de hidrociclones 320-CS-003/004. El underflow de los equipos clasificadores es enviado a los molinos de bolas 320-ML-006/007, por otro lado, el overflow es enviado hacia el 320-ST-704 donde se le agrega agua de procesos, espumante y AP404, dicha pulpa es enviada al 330-ST-701 que alimenta a las líneas de flotación [16].

### **Línea de molienda SAG 3**

Esta línea alimenta con mineral mediante feeders al molino SAG 320-ML-704 desde el Stock Pile y con bolas de 5,5 [pulg], además es adicionada agua de procesos y cal en la boca de alimentación del equipo, obteniéndose dos productos, catalogados como "gruesos" y "finos", estos son clasificados mediante harneros Trommel, el producto grueso es enviado hacia la planta de gravilla y pebbles. El producto fino es enviado hacia el estanque 320-TK-736, donde se adiciona agua de procesos para diluir la pulpa y los reactivos Xantato, MATCOL, Diésel y MX para acondicionar el mineral para la flotación. Luego, mediante bombas se traslada la pulpa hacia las baterías de hidrociclones 320-CS-703/704/705, el underflow de dichas baterías de hidrociclones es enviado al molino de bolas 320-ML-703, por otro lado, el overflow es enviado hacia el 320-ST-861 donde se le agrega agua de procesos, espumante y AP404, dicha pulpa es enviada al 330-ST-709 que alimenta a las líneas de flotación. Por otra parte, el molino de bolas 320-ML-008 funciona como una línea de soporte operacional, donde existe un *by-pass* de finos provenientes del SAG 3 hacia el estanque 320-TK-707, el cual también es alimentado mediante "chimbombos", tuberías que desvían parte del overflow de todas las BHC, a excepción de la 320-CS-702 según lo dicte la planificación de la superintendencia de molienda [16].

En el caso de la BHC 320-CS-702 el underflow es enviado hacia el molino de bolas 320-ML-008, mientras que el overflow es enviado hacia el 330-ST-004 o al 330-ST-704, donde se junta con el material procesado por la primera y segunda línea de molienda respectivamente y avanza hacia las líneas de flotación [16].

En la Figura 3 que se presenta a continuación, detalla el diagrama de flujo de las tres primeras líneas de molienda de la planta concentradora.

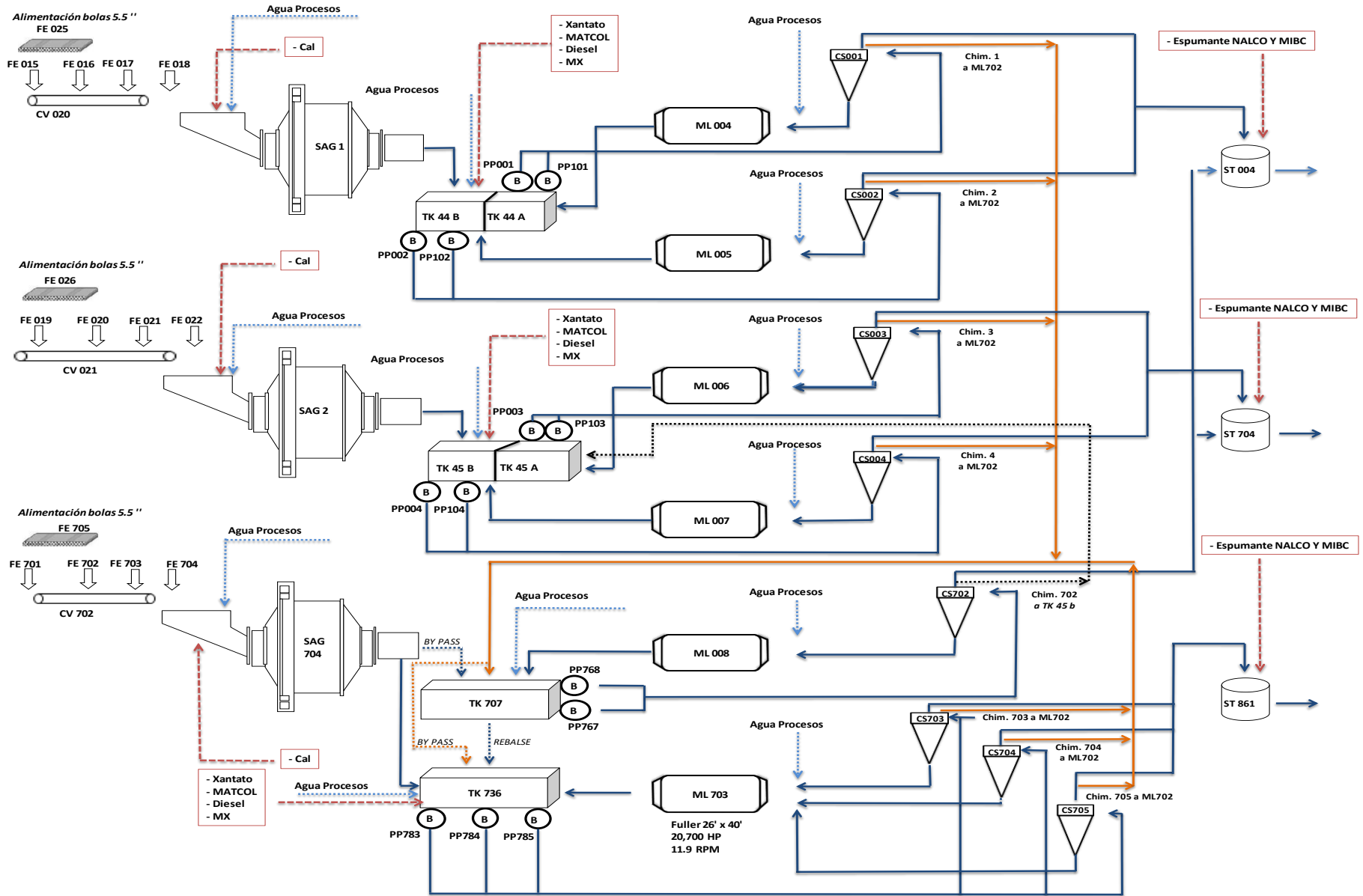


Figura 3. "Diagrama de flujo líneas 1, 2 y 3 Sector Molienda" (Minera Los Pelambres, 2023).

#### **Línea de molienda SAG 4**

Esta línea alimenta con mineral mediante feeders al molino SAG 320-ML-5001 desde el Stock Pile y con bolas de 5,5 [pulg], además es adicionada agua de procesos y cal en la boca de alimentación del equipo, obteniéndose dos productos, catalogados como "gruesos" y "finos", estos son clasificados mediante harneros Trommel, el producto grueso es enviado hacia el circuito de chancado de pebbles, donde son recirculados hacia el molino SAG. El producto fino es enviado hacia el estanque 320-ST-5051, donde se adiciona agua de procesos para diluir la pulpa y los reactivos Xantato, MATCOL, Diésel y MX para acondicionar el mineral para la flotación. Luego, mediante bombas se traslada la pulpa hacia las baterías de hidrociclones 320-CS-5001/5003, el underflow de dichas baterías de hidrociclones es enviado al molino de bolas 320-ML-5002, por otro lado, el overflow es enviado hacia el cajón 320-ST-861 donde se le agrega agua de procesos, espumante y AP404, dicha pulpa es enviada al 330-ST-5030 que alimenta a las líneas de flotación [16].

A continuación, la Figura 4 expone el diagrama de flujo de la cuarta línea de molienda de la planta concentradora:

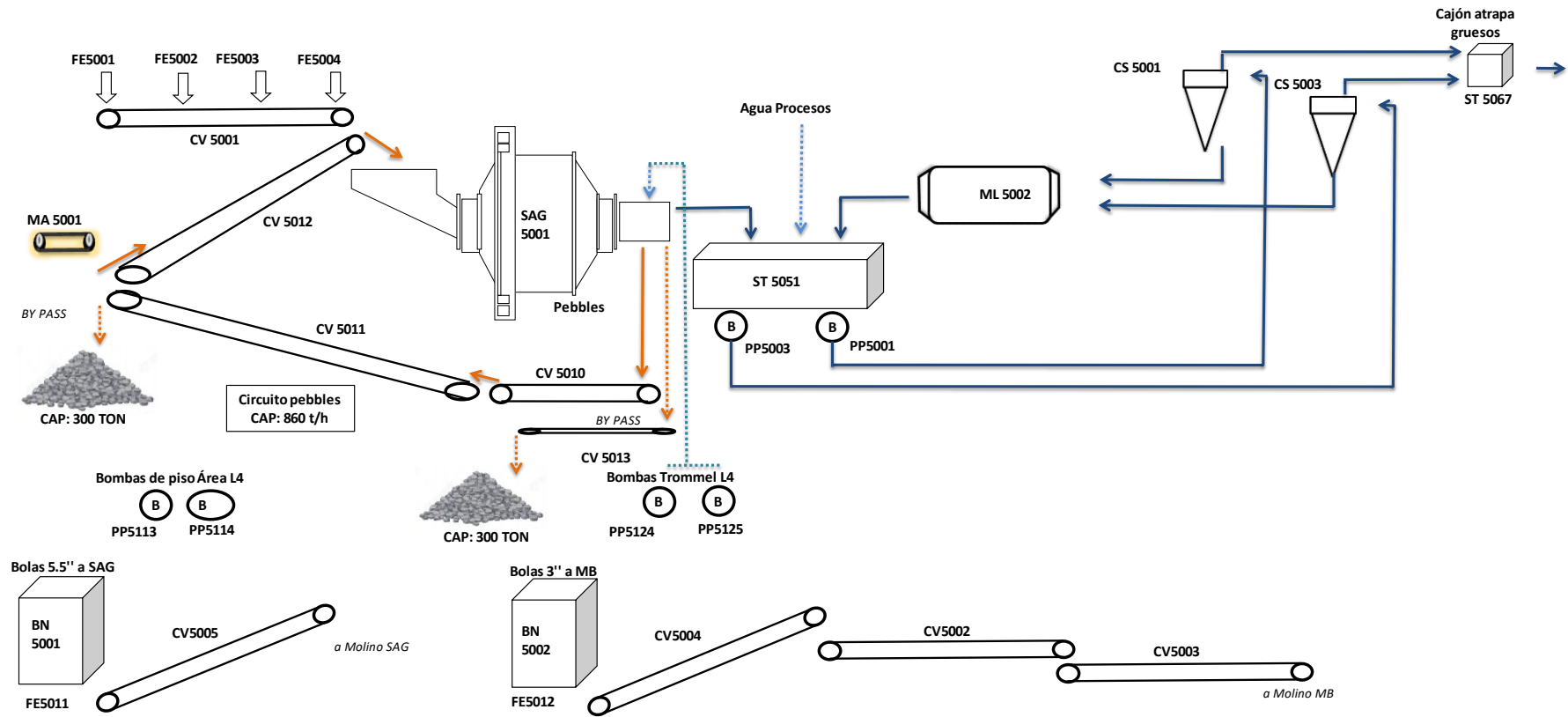


Figura 4. "Diagrama de flujo línea 4 Sector Molienda" (Minera Los Pelambres, 2023).

### **3.3.2 Planta de gravilla y pebbles**

El proceso de chancado de gravilla y pebbles comienza con el sobre tamaño generado por los clasificadores trommel ubicados en la salida de los molinos SAG, estos clasificadores depositan el material con sobre tamaño en la correa 310-CV-125 que puede descargar sobre las correas 310-CV-126 y 310-CV-112, las que alimentan a las plantas de pebbles y gravilla, respectivamente. Para ello hay una compuerta que permite o restringe el flujo hacia la planta de gravilla o hacia la planta de pebbles, la cual es operada manualmente y puede ser abierta o cerrada parcialmente según lo ameriten las condiciones operacionales [16].

En la planta de gravilla, la correa 310-CV-112 alimenta al harnero 313-SC-001, cuyo sobre tamaño es descargado sobre el bin 310-BN-011 que descarga el mineral sobre correas que alimentan de forma directa a los chancadores de cono 310-CR-11/12 y al chancador 310-CR-04 del tipo HP800. Los chancadores descargan el mineral sobre las correas 310-CV-151/152/153. La correa 310-CV-153 descarga sobre un chute que tiene la flexibilidad de alimentar hacia los molinos de Bolas 320-ML-004/005/006/007 mediante correas dispuestas en serie o hacia los Molinos SAG 320-ML-001/002 [16].

La planta de pebbles es abastecida mediante la descarga en serie de las correas 310-CV-126/127/128. Estas correas vierten su contenido sobre un chute en forma de almeja, colocado sobre los dos harneros convencionales con doble bandeja, de los cuales uno está en funcionamiento mientras que el otro está en reserva. El sobre tamaño generado en los harneros descarga en el 310-BN-025, desde donde es transportado por la correa 310-CV-129 hasta el alimentador 310-FE-057, encargado de abastecer al Chancador de cono 310-CR-03, donde la descarga es trasladada por la correa 310-CV-718 que descarga su contenido sobre un chute, desde el cual se puede desviar mineral hacia la correa 310-CV-719, alimentando así al estanque 320-TK-736. Además, el chute también puede dirigir el material hacia la correa 310-CV-130, la cual lleva el mineral hasta el 310-BN-026. Desde este punto, el mineral es descargado sobre correas, que transportan el mineral hasta los molinos SAG 320-ML-001/002/704 [16].

### 3.3.3 Flotación colectiva

El primer proceso de la planta de flotación colectiva es la etapa Rougher, compuesta por 8 líneas de celdas de flotación. Las líneas N° 1, 2, 3 y 4 están formadas por 9 celdas de 128 [m<sup>3</sup>] cada una. Por otra parte, las líneas N° 5 y 6 están compuestas por 6 celdas de 250 [m<sup>3</sup>], en cambio, las líneas N° 7 y 8 están conformadas por 5 celdas de la misma capacidad que las de las líneas 5 y 6 [16].

El ST-005 es alimentado por el producto de la línea SAG - 1 y está distribuye la pulpa hacia las líneas Rougher 2, 3 y 4, además de poseer un *bypass* para alimentar a la línea 1, asimismo el ST-701 es alimentado de la línea SAG - 2 y así suministrando alimentación a las líneas Rougher 1, 5 y 6. En el caso de la línea SAG - 3, el overflow de las BHC CS-703/704/705 alimenta al ST-709 que distribuye la alimentación hacia las líneas Rougher 7 y 8. En el caso de la línea SAG - 4 se alimenta al ST-5030 que abastece a la línea 9 Rougher, además de poseer la flexibilidad de alimentar a línea 8 y al ST 701 mediante *bypass*. Cabe destacar el que overflow producido por la BHC CS-702 puede alimentar a los ST-004 y ST-704 que alimentan a posterior a los ST-005 y ST-701 respectivamente [16].

La flotación en cada línea se lleva a cabo de la siguiente forma, la pulpa es alimentada a la primera celda, donde el material recuperado es extraído por rebalse y enviado hacia la etapa de remolienda, por otra parte, la cola avanza hacia la siguiente celda, repitiéndose de celda en celda, hasta terminar en la última celda de la línea, donde la cola es enviada hacia los espesadores de relaves [16].

El material extraído desde las líneas 1, 2, 3 y 4 es enviado hacia el TK-095, que distribuye el material en el primer circuito de remolienda, por el otro lado lo extraído desde las líneas 6, 7, 8 y 9 alimenta al TK-701, que abastece al segundo circuito de remolienda [16].

A continuación, la Figura 5 presenta la estructura de las líneas de flotación de la etapa Rougher.

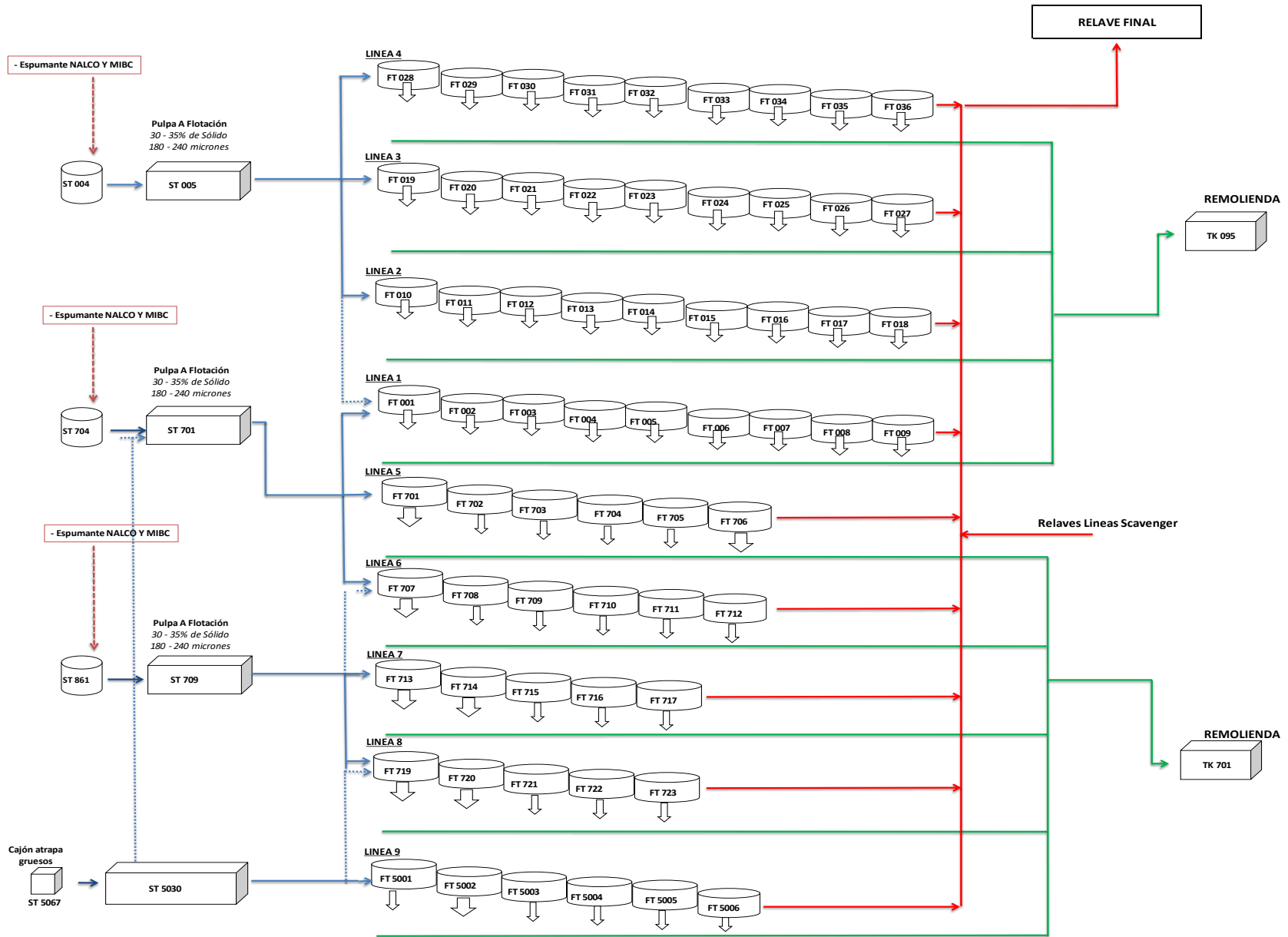


Figura 5. "Flotación Rougher planta concentradora" (Minera Los Pelambres, 2023).

El primer circuito de remolienda es el abastecido con el concentrado Rougher y Scavenger hacia el TK-095 que mediante bombas alimentan a la BHC CS-010, donde el overflow avanza hacia el TK-090 que alimenta a la siguiente etapa de flotación columnar, mientras que el underflow alimenta al ST-292 que distribuye hacia los ML-009/010, donde el material triturado es recirculado hacia el TK-095. El segundo circuito de remolienda el mecanismo es similar al primero, éste es abastecido con el concentrado de las etapas Rougher y Scavenger en el TK-701 que mediante bombas alimenta al CS-701, donde el overflow avana hacia el TK-090 que alimenta a la siguiente etapa de flotación columnar, mientras que underlow alimenta al ST-702 que abastece al ML-701, el cual es recirculado hacia el TK-701 [16].

El circuito de remolienda y flotación Scavenger se puede observar en la Figura 6 que se muestra a continuación.

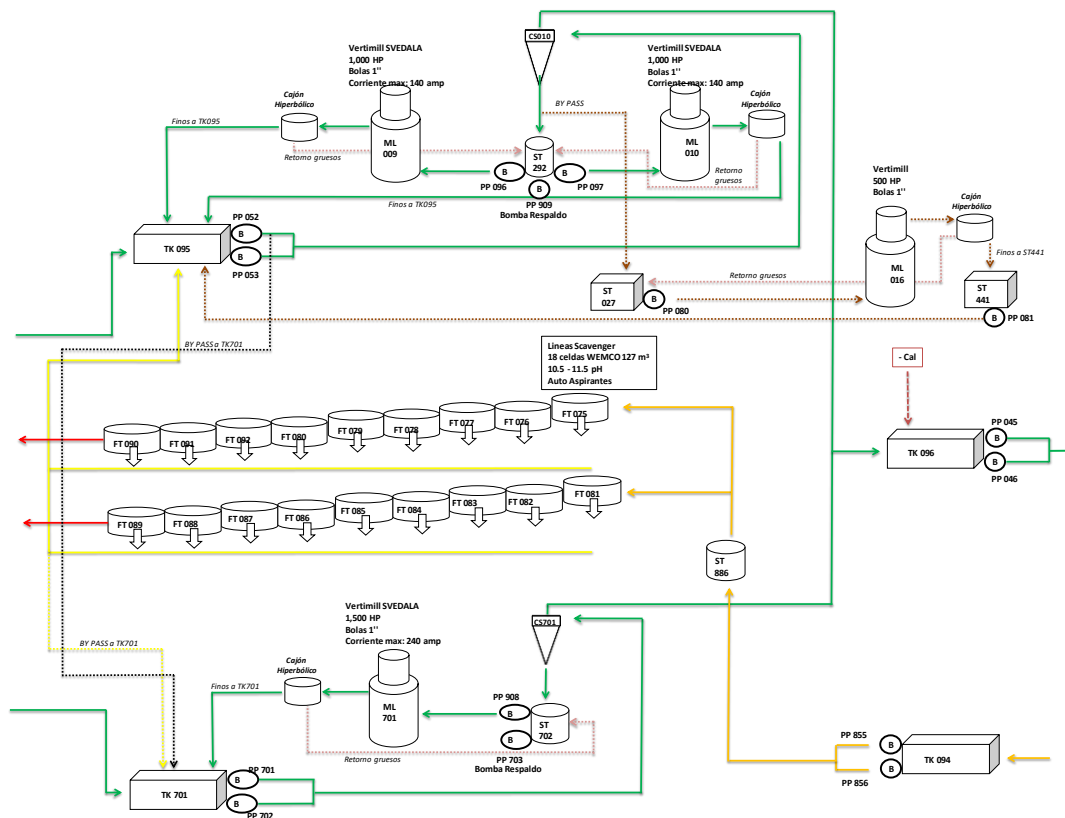


Figura 6. "Circuitos de Remolienda y Flotación Scavenger planta concentradora" (Minera Los Pelambres, 2023).

La etapa de flotación Cleaner o de primera limpieza comienza en el TK-095, que mediante bombas alimenta al ST-860 que distribuye la pulpa en 14 celdas columnares, obteniéndose así el concentrado colectivo que es alimentado hacia el ST-781 que lo envía hacia la planta de flotación selectiva, mientras que las colas son enviadas hacia el TK-094, que mediante bombas alimentan al ST-886 que distribuye la pulpa hacia las 2 líneas Scavenger con 9 celdas cada una, que mediante el mismo mecanismo que la flotación Rougher permite recuperar material valioso que es recirculado hacia la etapa de remolienda, mientras que el material que logró flotar en esta etapa es enviado hacia los espesadores de relaves en conjunto con las colas provenientes de la flotación Rougher [16].

### **3.3.4 Flotación selectiva**

En esta etapa el concentrado colectivo alimenta a los espesadores TK-10 y TK-12, donde el agua de rebose de éstos alimenta al espesador clarificante TK-13 con el fin de eliminar reactivos residuales y recuperar agua de procesos. La descarga de estos espesadores alimenta mediante bombas a los TK-15 y TK-16, en los cuales se les adiciona ácido sulfúrico para disminuir el pH de la pulpa y limpiar la superficie de la molibdenita, sulfhidrato de sodio (NASH) para depresar el cobre, agua fresca y espumante, además de realizar un ajuste en el porcentaje de sólidos [16].

Luego el material es trasladado hacia la etapa de flotación Rougher, el concentrado de molibdeno obtenido es enviado hacia la etapa de primera limpieza, mientras que las colas corresponden al concentrado de cobre que es enviado hacia el espesador TK-711 donde se ajusta el porcentaje de sólidos hasta un aproximado de 60%, posteriormente alimenta los concentraductos que los envía hacia el Puerto Punta Chungo para la comercialización [16].

Luego se realiza la etapa de la primera limpieza en la cual se obtiene un "concentrado intermedio" que es enviado hacia el espesador TK-55, donde se ajusta el porcentaje de sólidos a 40-50% aproximadamente y se lleva al cajón ST-28 en el cual se le adiciona agua fresca en conjunto de ácido sulfúrico, por otro lado, las colas del proceso son recirculadas a los espesadores TK-10 y TK-12 [16].

El concentrado intermedio es el que alimenta a la segunda limpieza de la cual se obtiene un concentrado final de la etapa de flotación selectiva contiene alrededor de un 53% de

molibdeno y 3% cobre, el cual es enviado hacia el espesador TK-56, del cual su descarga alimenta a la planta de lixiviación férrica, mientras que las colas de flotación son recirculadas hacia la etapa de primera limpieza [16].

El proceso descrito se puede visualizar en el diagrama expuesto por la Figura 7 a continuación:

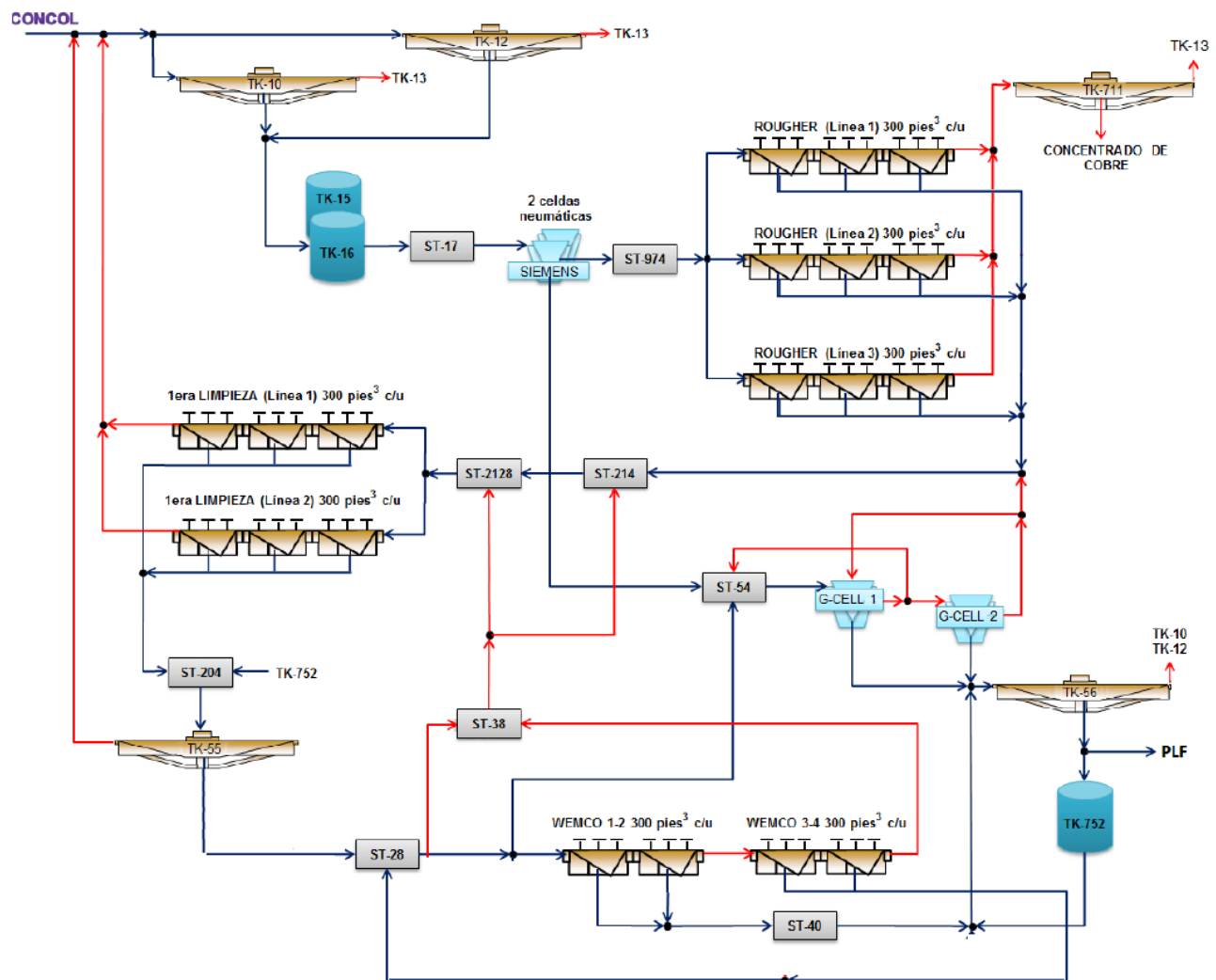


Figura 7. "Diagrama de Flujo Flotación Selectiva" (Minera Los Pelambres, 2018).

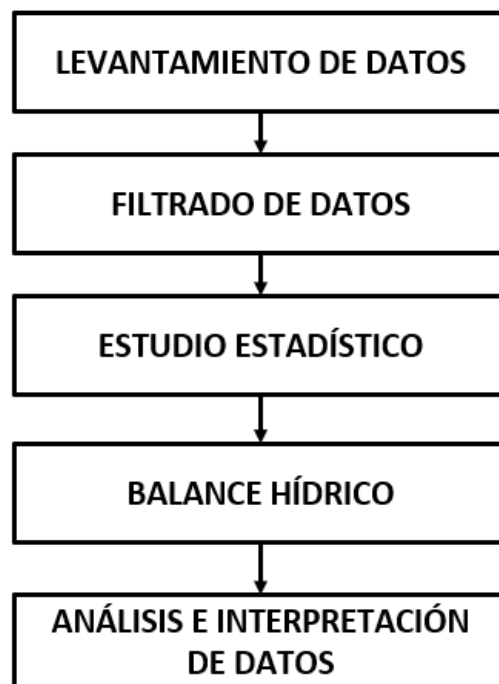
El concentrado de molibdeno pasa un proceso de lixiviación férrica, en el cual se disminuye el contenido de impurezas en este y por consecuencia, aumentando su ley de molibdeno, este concentrado es comercializado mediante sacos. En esta etapa se produce también cemento de cobre [16].

Los relaves de planta concentradora y riles de la planta de lixiviación férricas son enviados a el Tranque a través de un ducto de 50 km, también existe un ducto gemelo que es utilizado para recircular el agua extraída desde el tranque hacia la planta concentradora [16].

#### **4. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

El desarrollo experimental de una investigación científica tiene como objetivo establecer una metodología que garantice obtener resultados precisos y conclusiones válidas del estudio realizado.

El desarrollo en la investigación realizada en esta memoria consistió en un trabajo realizado en etapas secuenciales. Cada fase del estudio fue planificada previamente, lo que permitió que en su posterior ejecución se cumplieran los objetivos de cada una, facilitando así el avance hacia la siguiente etapa. Este enfoque sistemático no solo aseguró un progreso ordenado y coherente, sino que también contribuyó a la recopilación de información confiable. El esquema presentado a continuación en la Figura 8 ilustra la metodología empleada.



*Figura 8. "Diseño Experimental del estudio".*

## 4.2 Levantamiento de datos operacionales

En esta etapa del estudio, se recopiló la toda la información necesaria y disponible sobre el control de flujos de la planta. Para ello se buscó y documentó los TAGs de flujómetros, densímetros y pesómetros. Esto implicó visitas a terreno para observar los equipos de medición y sus códigos, así como la recopilación y verificación de datos en las mesas de control de cada subproceso, con la colaboración del equipo de operaciones.

Con fin de que los datos operacionales fueran lo más representativos para el comportamiento del sistema, se decidió utilizar todos los datos operacionales en periodos de días, meses y años.

Posteriormente, mediante el Software *PI SYSTEM* se inició el levantamiento de datos operacionales, exportándolos a *MICROSOFT EXCEL* para crear una base de datos histórica del periodo entre 30-03-2019 y 30-03-2024. También se recopilaron datos desde las planillas *EXCEL* desarrolladas por la Superintendencia de Aguas, denominadas Reportes Hídricos. A continuación, la Figura 9 muestra parte del desarrollo de la búsqueda de datos operacionales en *PI SYSTEM*.

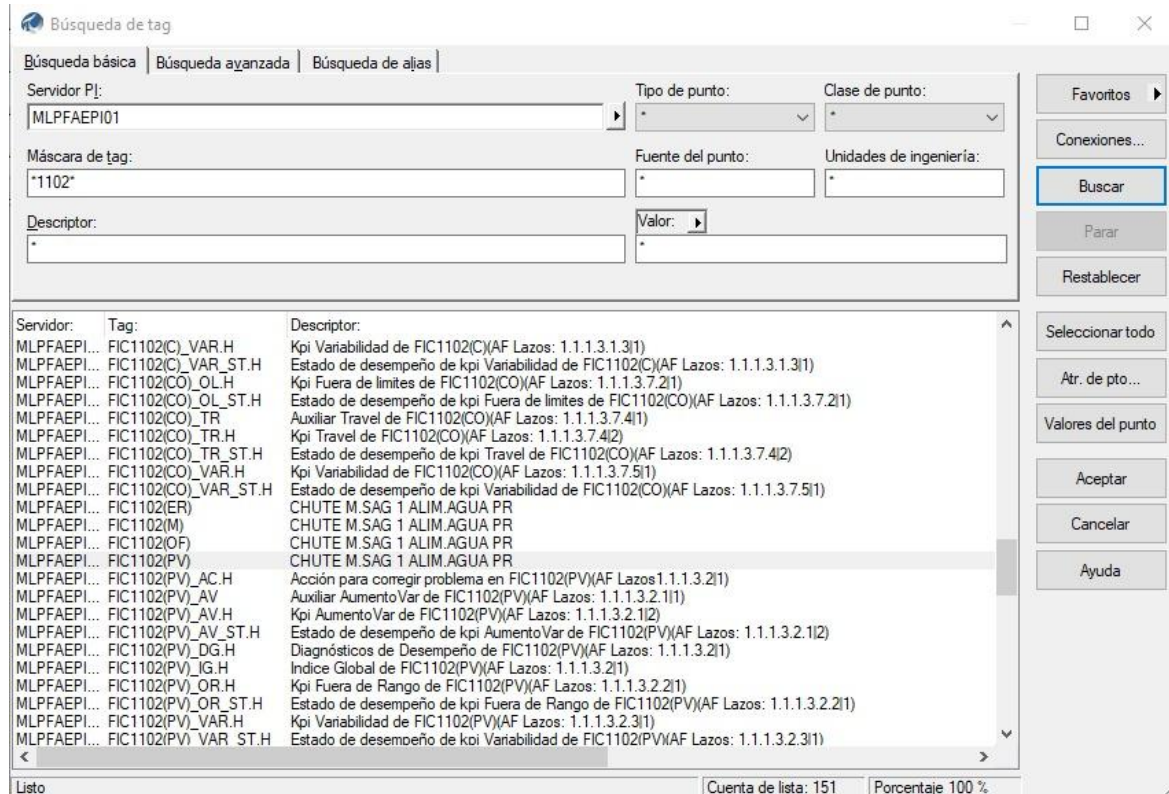


Figura 9. "Búsqueda datos operacionales en PI SYSTEM".

Teniendo en cuenta que la información correspondiente al circuito de la Línea de SAG-4 y Línea 9 Rougher sería poco representativa debido a que, desde su implementación en octubre de 2023 hasta abril de 2024, el periodo es muy corto. Se decidió considerar un periodo distinto para éstas, correspondiente del 1 de octubre al 30 de mayo de 2024.

### **4.3 Filtrado de datos**

La base de datos generada en la etapa anterior contenía una gran cantidad de valores atípicos/anómalos y, en algunos casos, valores extremos. Además, debido a su vinculación directa con el software *PI SYSTEM*, se dificultó el manejo adecuado de la información lo que en consecuencia podría llevar a realizar cálculos erróneos en etapas posteriores y así obtener resultados de baja confiabilidad.

Para abordar esta problemática, se creó una nueva planilla *EXCEL* que permitiese manipular los datos de manera más sencilla y eficiente, donde se ordenaron las alimentaciones hídricas y caracterizaciones de pulpa existentes de cada sub-proceso en tablas en las cuales los valores operacionales obtenidos estuviesen detallados en conjunto de su correspondiente TAG y el periodo que representa.

Finalmente, el filtrado de datos consistió en la transformación de valores anómalos en celdas vacías, con el propósito que estos al ser introducidos no afectaran negativamente en los cálculos posteriores a realizar mediante funciones de *MICROSOFT EXCEL*.

### **4.4 Cálculos estadísticos de datos**

En esta etapa del desarrollo en la investigación, se llevaron a cabo los cálculos de la media aritmética y desviación estándar de flujos de alimentación, flujos de pulpa, porcentajes de sólidos ( $%S_w$ ) y densidades.

Adicionalmente, se realizó una normalización a los datos correspondientes a "Alimentación de Agua de Procesos" en la etapa de molienda, para así facilitar la visualización de tendencias y representar el comportamiento de las principales alimentaciones del recurso hídrico en la planta concentradora.

## 4.5 Balance hídrico

Para desarrollar el balance hídrico teniendo en consideración la información recopilada en las etapas previas, se realizaron los siguientes supuestos:

1. Los subprocesos llevados a cabo dentro de la planta concentradora, Molienda, Flotación colectiva y selectiva se encuentran teóricamente en estado estacionario.
2. La etapa de clasificación y molienda secundaria de cada línea SAG fue considerado como un sistema unitario, esto debido a la inexistencia de información correspondiente a los chimbombos.
3. La humedad en la alimentación del mineral a la planta concentradora corresponde al 2% del flujo másico en [TPH].
4. Los datos operacionales utilizados serán los correspondientes al periodo que transcurre desde 01-10-2023 hasta el 30-03-2024.

### 4.5.1 Balance general planta

Para este balance se utilizó la información recopilada de los reportes hídricos. No obstante, este balance incluye entradas de aguas destinadas a usos diferentes a los procesos metalúrgicos estudiados. Sin embargo, su desarrollo permite entender las magnitudes y volúmenes de aguas utilizadas en planta.

El sistema de ecuaciones que representa este balance de masa es el siguiente:

$$Agua_{fresca} + Agua_{recirculada} + Humedad\ mineral = Agua_{Alimentación} \quad (1)$$

$$Agua_{Conc.\ Cu} + Agua_{Relaves} + Pérdidas = Agua_{salida} \quad (2)$$

$$Agua_{Alimentación} = Agua_{salida} + Pérdidas \quad (3)$$

### 4.5.2 Molienda

De acuerdo con los planteamientos expuestos en los supuestos 2 y 3, sumado al diagrama de flujo previamente presentado en la Figura 3, se realizó una simplificación del circuito de molienda. A continuación, la Figura 10 muestra el diagrama empleado para realizar el balance del subproceso.

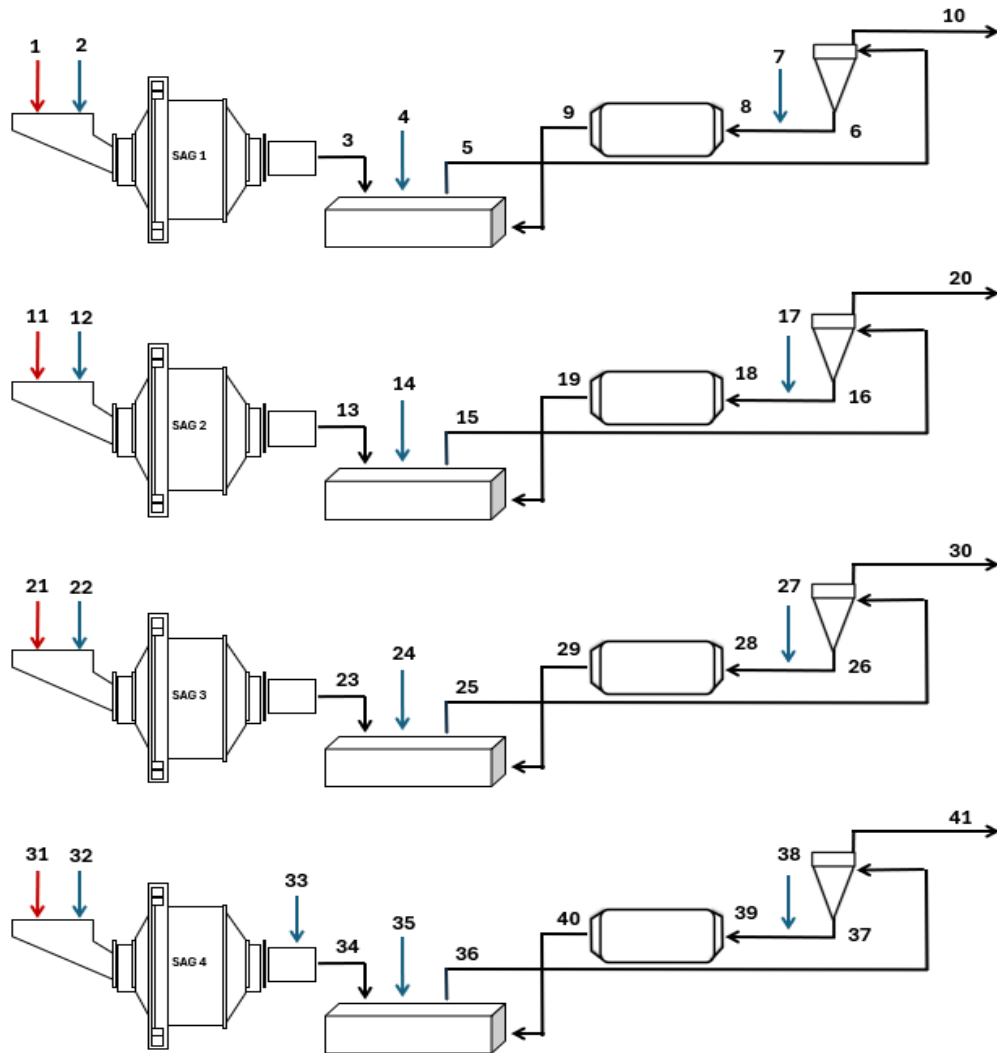





Figura 10. "Diagrama de flujo de circuito de molienda simplificado".

La nomenclatura utilizada en el diagrama presentado se detalla a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. "Nomenclatura diagrama de flujo simplificado, Molienda".

Símbolo	Flujo
	Mineral
	Agua de Procesos
	Pulpa

Posteriormente se planteó el sistema de ecuaciones por cada línea de molienda, el cual permite describir matemáticamente los flujos dentro del circuito de molienda SAG mostrado en la Figura 10, considerando la nomenclatura presentada a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. "Nomenclatura de flujos".

Símbolo	Flujo másico
$\dot{O}$	Pulpa
$\dot{m}$	Sólido
$\dot{w}$	Agua

Teniendo en consideración la nomenclatura presentada por la Tabla 2, el balance de flujo de sólidos para la Línea SAG-1 está descrito por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_3 \quad (4)$$

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_9 = \dot{m}_5 \quad (5)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{10} \quad (6)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_8 \quad (7)$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (8)$$

Mientras que el sistema de ecuaciones que describe los caudales agua del circuito está dado por:

$$\dot{w}_2 = \dot{w}_3 \quad (9)$$

$$\dot{w}_3 + \dot{w}_4 + \dot{w}_9 = \dot{m}_5 \quad (10)$$

$$\dot{w}_5 = \dot{w}_6 + \dot{w}_{10} \quad (11)$$

$$\dot{w}_6 + \dot{w}_7 = \dot{w}_8 \quad (12)$$

$$\dot{w}_8 = \dot{w}_9 \quad (13)$$

Así, el sistema de ecuaciones que describe el flujo másico de pulpa de la Línea SAG-1 está dado por:

$$\dot{m}_1 + \dot{w}_2 = \dot{O}_3 \quad (14)$$

$$\dot{O}_5 = \dot{O}_6 + \dot{O}_{10} \quad (15)$$

$$\dot{O}_6 + \dot{w}_7 = \dot{O}_8 \quad (16)$$

$$\dot{O}_8 = \dot{O}_9 \quad (17)$$

El balance de flujo de sólidos para la Línea SAG-2 está descrito por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{13} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{13} + \dot{m}_{19} = \dot{m}_{15} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} + \dot{m}_{20} \quad (20)$$

$$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{18} \quad (21)$$

$$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19} \quad (22)$$

Mientras que el sistema de ecuaciones que describe los caudales agua del circuito está dado por:

$$\dot{w}_{12} = \dot{w}_{13} \quad (23)$$

$$\dot{w}_{13} + \dot{w}_{14} + \dot{w}_{19} = \dot{m}_{15} \quad (24)$$

$$\dot{w}_{15} = \dot{w}_{16} + \dot{w}_{20} \quad (25)$$

$$\dot{w}_{16} + \dot{w}_{17} = \dot{w}_{18} \quad (26)$$

$$\dot{w}_{18} = \dot{w}_{19} \quad (27)$$

Así, el sistema de ecuaciones que describe el flujo másico de pulpa de la Línea SAG-2 está dado por:

$$\dot{m}_{11} + \dot{w}_{12} = \dot{O}_{13} \quad (28)$$

$$\dot{O}_{15} = \dot{O}_{16} + \dot{O}_{20} \quad (29)$$

$$\dot{O}_{16} + \dot{w}_{17} = \dot{O}_{18} \quad (30)$$

$$\dot{O}_{18} = \dot{O}_{19} \quad (31)$$

El balance de flujo de sólidos para la Línea SAG-3 está descrito por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{23} \quad (32)$$

$$\dot{m}_{23} + \dot{m}_{29} = \dot{m}_{25} \quad (33)$$

$$\dot{m}_{25} = \dot{m}_{26} + \dot{m}_{30} \quad (34)$$

$$\dot{m}_{26} = \dot{m}_{28} \quad (35)$$

$$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29} \quad (36)$$

Mientras que el sistema de ecuaciones que describe los caudales agua del circuito está dado por:

$$\dot{w}_{22} = \dot{w}_{23} \quad (37)$$

$$\dot{w}_{23} + \dot{w}_{24} + \dot{w}_{29} = \dot{m}_{25} \quad (38)$$

$$\dot{w}_{25} = \dot{w}_{26} + \dot{w}_{30} \quad (39)$$

$$\dot{w}_{26} + \dot{w}_{27} = \dot{w}_{28} \quad (40)$$

$$\dot{w}_{28} = \dot{w}_{29} \quad (41)$$

Así, el sistema de ecuaciones que describe el flujo másico de pulpa de la Línea SAG-3 está dado por:

$$\dot{m}_{21} + \dot{w}_{22} = \dot{O}_{23} \quad (42)$$

$$\dot{O}_{25} = \dot{O}_{26} + \dot{O}_{30} \quad (43)$$

$$\dot{O}_{26} + \dot{w}_{27} = \dot{O}_{28} \quad (44)$$

$$\dot{O}_{28} = \dot{O}_{29} \quad (45)$$

El balance de flujo de sólidos para la Línea SAG-4 está descrito por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\dot{m}_{31} = \dot{m}_{33} \quad (46)$$

$$\dot{m}_{33} + \dot{m}_{39} = \dot{m}_{35} \quad (47)$$

$$\dot{m}_{35} = \dot{m}_{36} + \dot{m}_{41} \quad (48)$$

$$\dot{m}_{36} = \dot{m}_{38} \quad (49)$$

$$\dot{m}_{38} = \dot{m}_{39} \quad (50)$$

Mientras que el sistema de ecuaciones que describe los caudales agua del circuito está dado por:

$$\dot{w}_{32} + \dot{w}_{33} = \dot{w}_{34} \quad (51)$$

$$\dot{w}_{34} + \dot{w}_{35} + \dot{w}_{40} = \dot{m}_{36} \quad (52)$$

$$\dot{w}_{36} = \dot{w}_{37} + \dot{w}_{41} \quad (53)$$

$$\dot{w}_{37} + \dot{w}_{38} = \dot{w}_{39} \quad (54)$$

$$\dot{w}_{39} = \dot{w}_{40} \quad (55)$$

Así, el sistema de ecuaciones que describe el flujo másico de pulpa de la Línea SAG-4 está dado por:

$$\dot{m}_{21} + \dot{w}_{22} = \dot{O}_{23} \quad (56)$$

$$\dot{O}_{25} = \dot{O}_{26} + \dot{O}_{30} \quad (57)$$

$$\dot{O}_{26} + \dot{w}_{27} = \dot{O}_{28} \quad (58)$$

$$\dot{O}_{28} = \dot{O}_{29} \quad (59)$$

#### **4.5.3 Flotación colectiva**

Para el circuito de flotación colectiva, que incluye etapas Rougher, de Remolienda, Flotación Columnar y Scavenger, se simplificó el diagrama de flujo aplicando la misma estrategia empleada en molienda, considerando que desde la superintendencia de flotación se estima que las líneas alimentadas desde un mismo cajón distribuidor poseen las mismas características. Es decir, en las líneas 2, 3 y 4, que son alimentadas desde el cajón ST-005, estas poseen las características medidas en la alimentación de la línea 2. Del mismo modo, las líneas 1, 5 y 6, que son alimentadas desde el ST-701, presentan las características medidas en la alimentación de la línea 5. En el caso de las líneas 7 y 8, que son alimentadas desde el cajón ST-709, tienen las características medidas en la alimentación de la línea 8. Por otro lado, la línea 9 no posee mediciones de estas características.

Según lo mencionado se logró realizar una representación del sistema que entrega visualización más clara de los principales caudales de pulpa y agua, como se muestra en el diagrama presentado en la Figura 11.

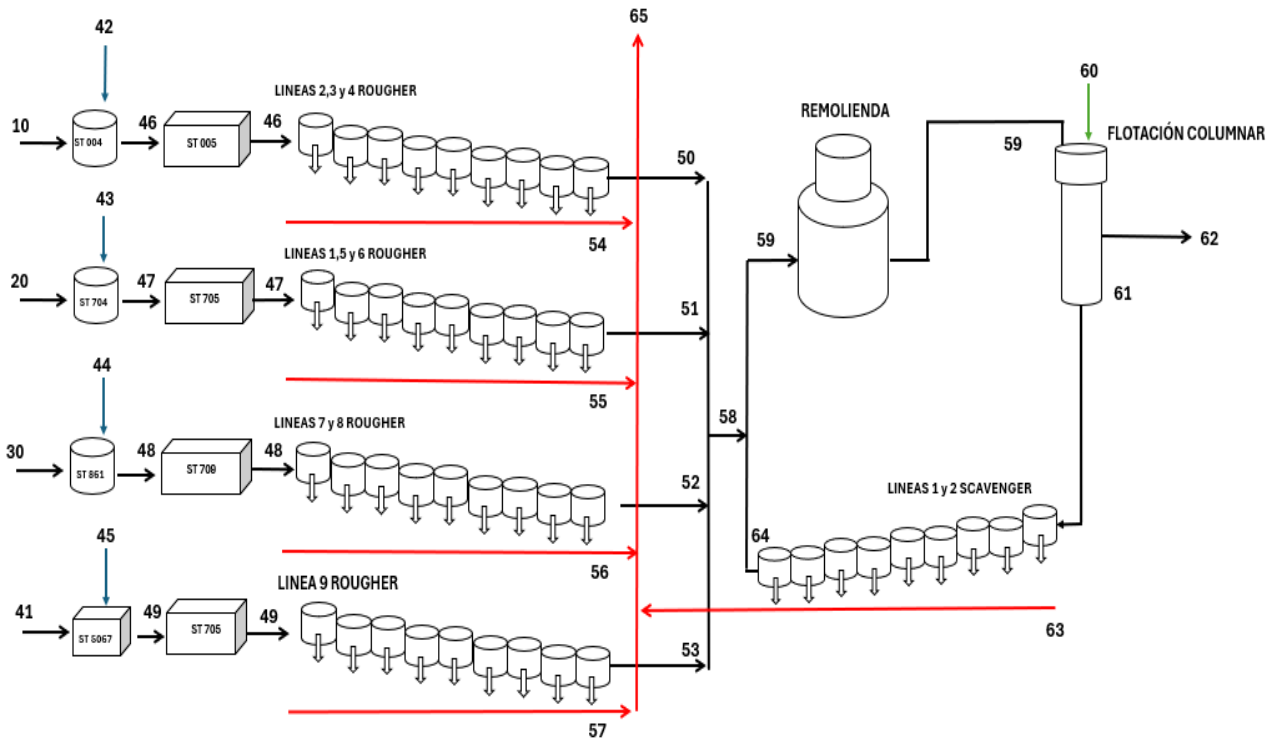


Figura 11. "Diagrama de flujo circuito de flotación colectiva simplificado".

La nomenclatura utilizada en el diagrama presentado se detalla a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. "Nomenclatura diagrama de flujo simplificado, Flotación colectiva".

Símbolo	Flujo
	Agua Fresca
	Agua de Procesos
	Pulpa
	Colas hacia espesamiento

Posteriormente se planteó el sistema de ecuaciones, el cual permite describir matemáticamente los flujos cuantificados dentro del circuito de flotación colectiva mostrado en la Figura 11.

El balance de flujo de sólidos para el circuito de flotación colectiva está descrito por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{46} \quad (60)$$

$$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{47} \quad (61)$$

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{48} \quad (62)$$

$$\dot{m}_{41} = \dot{m}_{49} \quad (63)$$

$$\dot{m}_{59} = \dot{m}_{61} + \dot{m}_{62} \quad (64)$$

$$\dot{m}_{46} + \dot{m}_{47} + \dot{m}_{48} + \dot{m}_{49} + \dot{m}_{60} = \dot{m}_{62} + \dot{m}_{65} \quad (65)$$

Asimismo, el balance de flujos de agua para el circuito de flotación colectiva está descrito por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\dot{w}_{10} + \dot{w}_{42} = \dot{w}_{46} \quad (66)$$

$$\dot{w}_{20} + \dot{w}_{43} = \dot{w}_{47} \quad (67)$$

$$\dot{w}_{30} + \dot{w}_{44} = \dot{w}_{48} \quad (68)$$

$$\dot{w}_{41} + \dot{w}_{45} = \dot{w}_{49} \quad (69)$$

$$\dot{w}_{59} + \dot{w}_{60} = \dot{w}_{61} + \dot{w}_{62} \quad (70)$$

$$\dot{w}_{46} + \dot{w}_{47} + \dot{w}_{48} + \dot{w}_{49} + \dot{w}_{60} = \dot{w}_{62} + \dot{w}_{65} \quad (71)$$

Teniendo en consideración los de sistemas de ecuaciones para los balances de sólidos y de agua, se planteó el balance de flujos de pulpa del circuito:

$$\dot{O}_{10} + \dot{w}_{42} = \dot{w}_{46} \quad (72)$$

$$\dot{O}_{20} + \dot{w}_{43} = \dot{w}_{47} \quad (73)$$

$$\dot{O}_{30} + \dot{w}_{44} = \dot{w}_{48} \quad (74)$$

$$\dot{O}_{41} + \dot{w}_{45} = \dot{w}_{49} \quad (75)$$

$$\dot{O}_{59} + \dot{w}_{60} = \dot{w}_{61} + \dot{w}_{62} \quad (76)$$

$$\dot{O}_{46} + \dot{O}_{47} + \dot{O}_{48} + \dot{O}_{49} + \dot{O}_{60} = \dot{O}_{62} + \dot{O}_{65} \quad (77)$$

#### 4.5.4 Flotación selectiva

Siguiendo la estrategia empleada en las etapas previas, se aplicó una simplificación a este circuito para visualizar de forma más efectiva los flujos más relevantes dentro del subproceso, lo cual resultó en el diagrama de flujo que se presenta a continuación en la Figura 12.

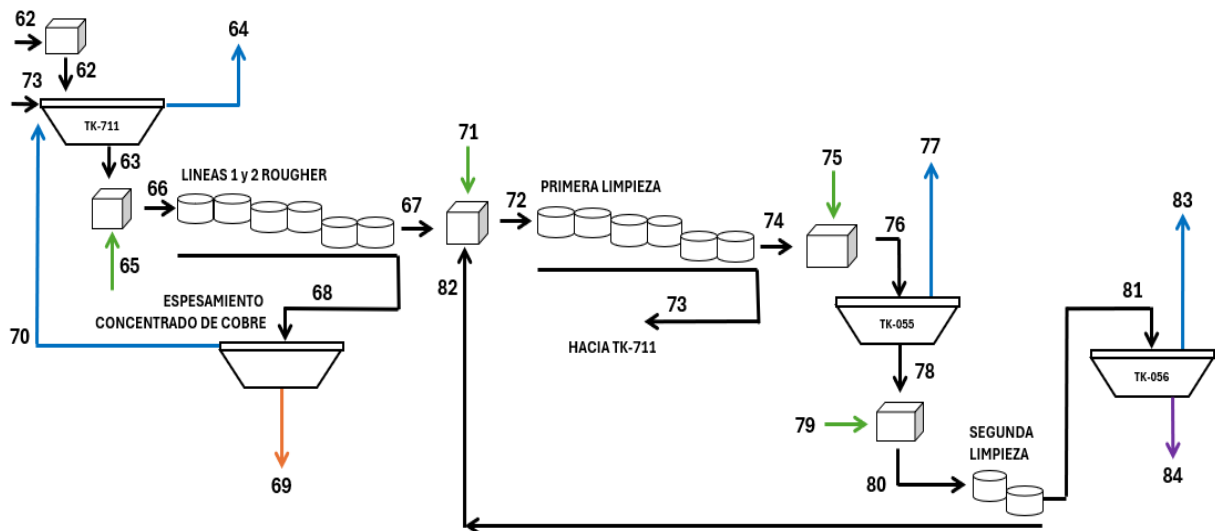


Figura 12. "Diagrama de flujo circuito de flotación selectiva simplificado".

La nomenclatura utilizada en el diagrama presentado se detalla a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. "Nomenclatura diagrama de flujo simplificado, Flotación selectiva".

Símbolo	Flujo
	Agua Fresca
	Agua de Procesos
	Pulpa
	Concentrado de cobre
	Concentrado de molibdeno

En este circuito, es importante señalar que el balance realizado fue de carácter general, debido a la notable ausencia de información disponible. Bajo estas circunstancias, el balance general de flujos de sólidos y de agua se muestra en el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\dot{m}_{62} = \dot{m}_{72} + \dot{m}_{87} \quad (78)$$

$$\dot{W}_{62} + \dot{W}_{68} + \dot{W}_{74} + \dot{W}_{78} + \dot{W}_{82} = \dot{W}_{67} + \dot{W}_{72} + \dot{W}_{87} \quad (79)$$

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 5.1 Datos operacionales

Como se mencionó en el apartado anterior, los datos operacionales fueron extraídos desde dos fuentes, Software PI SYSTEM, donde se recopilaron datos históricos y desde Reportes Hídricos facilitados desde la Superintendencia de Aguas. Estos datos con tal de ser los más representativos de la actualidad sistema, fueron tratados según la metodología explicada anteriormente y considerando el periodo entre 01-10-2023 y 30-03-2024.

#### 5.1.1 Planta concentradora

En esta fase del estudio se utilizó solamente información proveniente desde los Reportes Hídricos que realizan mensualmente en la Superintendencia de Aguas. Es de suma importancia mencionar que esta información considera el sistema de la planta concentradora como uno global, es decir, no solo el uso metalúrgico del agua, sino que también usos como el agua para necesidades humanas, red de incendios, bombas de sellado, entre otros.

Las entradas de agua a la planta cuantificadas incluyen tanto el suministro de agua fresca como el agua recirculada desde los circuitos de espesadores y tranques de relaves. A continuación, la Tabla 5 muestra el promedio y desviación estándar de las alimentaciones de agua a la Planta Concentradora en el periodo del estudio:

Tabla 5. "Alimentaciones de agua a Planta Concentradora durante 01-10-2023 y 30-03-2024".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Agua Fresca	[m <sup>3</sup> /h]	1.840	238
Agua Recirculada	[m <sup>3</sup> /h]	13.644	1.527

Notar que, el suministro de agua de la planta está principalmente constituido por agua recirculada, denominada agua de procesos, siendo un 88% del total alimentando, distribuyéndose en usos metalúrgicos, usos en bombas de sellado para transportar fluidos, entre otros. Con esta información también se estimó el MAKE-UP de la Planta Concentradora, como se puede observar en la Tabla 6:

*Tabla 6. "MAKE UP Planta Concentradora Minera Los Pelambres, 01-10-2023 y 30-03-2024".*

	Unidad de medida	Promedio	Desviación
MAKE UP	[m <sup>3</sup> /ton]	0,22	0,01

Vale mencionar que el MAKE UP obtenido es considerablemente positivo si se compara al 0,45 m<sup>3</sup>/ton que reportó Collahuasi en el año 2022, que recirculó un 77% del agua utilizada [17]. Además, supera al catalogado por el Consejo Minero como: "EL MAKE UP MÁS BAJO DE LA MINERÍA" que poseía Minera Caserones con un promedio entre 0,25-0,30 m<sup>3</sup>/ton en año 2022 [18].

Por otro lado, las salidas cuantificadas de la Planta Concentradora corresponden al agua contenida en el concentrado de cobre y el agua que alimenta el sistema de espesadores de relaves. A continuación, la Tabla 7 muestra el promedio y desviación estándar de las salidas de agua en Planta Concentradora en el periodo del estudio:

*Tabla 7. "Salidas de agua a Planta Concentradora durante 01-10-2023 y 30-03-2024".*

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Agua en concentrado de cobre	[m <sup>3</sup> /h]	80	7
Agua Espesadores de Relaves	[m <sup>3</sup> /h]	14.573	1.611

Es importante considerar que el agua contenida en las colas del proceso de flotación que alimenta a los espesadores de relaves es recuperada principalmente en estos equipos, recirculando a la planta 10.155 m<sup>3</sup>/h de agua, sumando a los 3.061 m<sup>3</sup>/h de agua que son recuperados desde los tranques de relaves. Cabe destacar que existe una tercera fuente de recirculación de aguas correspondiente al sistema de espesadores de concentrado que recircula al sistema 428 m<sup>3</sup>/h de agua.

### **5.1.1 Molienda**

En esta fase del estudio, empleando la metodología explicada previamente y utilizando exclusivamente la información recopilada desde Software PI SYSTEM, se obtuvieron las siguientes alimentaciones de agua y alimentación de mineral al circuito de molienda, presentadas a continuación en la Tabla 8.

Tabla 8. "Alimentación de agua y mineral a circuito de Molienda".

Medición	Unidad de medida	Promedio
Alimentación Agua	[m <sup>3</sup> /h]	8.919
Alimentación Mineral	[TPH]	8.180

En base a esta información, se observa que el circuito de molienda es alimentado de un 65% del suministro de agua recirculada hacia la planta concentradora, siendo el mayor y principal consumo hídrico en la planta concentradora.

Dentro de los datos operacionales obtenidos se destacó el porcentaje de sólidos de cada molino SAG, que se logran observar en la Tabla 9 presentada a continuación:

Tabla 9. " Porcentaje de sólidos, Molinos SAG".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
S <sub>w</sub> SAG-1	%	72,2	3,2
S <sub>w</sub> SAG-2	%	67,4	11,8
S <sub>w</sub> SAG-708	%	69,3	7,8
S <sub>w</sub> SAG-4	%	76,6	9,1

Se destaca que el porcentaje de sólidos de trabajo en los molinos SAG de la planta concentradora se ubica dentro del rango operacional que fundamenta el estudio, sin embargo, es importante destacar que el molino SAG-2 presenta un porcentaje operacional de sólidos más bajo respecto a su par SAG-1 de igual diseño, lo que inicialmente se presenta como una oportunidad de ahorro hídrico aumentando la tasa de mineral tratado o disminuyendo el caudal de agua alimentado, que podría estar sujeto a estudios posteriores.

Asimismo, se observaron los diferentes porcentajes de sólidos de cada batería de hidrociclones de cada línea, como se muestra a continuación en la Tabla 10.

*Tabla 10. "Porcentaje de sólidos, Baterías de hidrociclones".*

Línea SAG	Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
1	S <sub>w</sub> CS-001	%	70,4	14,8
	S <sub>w</sub> CS-002	%	55,3	13,0
2	S <sub>w</sub> CS-003	%	50,1	14,5
	S <sub>w</sub> CS-004	%	64,8	11,7
3	S <sub>w</sub> CS-702	%	46,3	14,8
	S <sub>w</sub> CS-703	%	32,8	15,25
	S <sub>w</sub> CS-704	%	42,5	17,3
	S <sub>w</sub> CS-705	%	30,4	17,7
4	S <sub>w</sub> CS-5001	%	54,4	20,4
	S <sub>w</sub> CS-5003	%	63,8	16,2

En base a lo obtenido, se logró detectar que en las líneas SAG-1 y 2 que poseen dos baterías donde existe una que se lleva la principal carga de sólidos con diferencia a su par, en el caso de la línea 1 la batería CS-001 supera en 15% a su par CS-002, esto inicialmente sugiere que el porcentaje de sólidos de la pulpa que alimenta ML-004 debiese ser mayor a la pulpa que alimenta al ML-005. Situación similar se presentó para la línea 2, donde la batería CS-004 se lleva la principal carga de sólidos del circuito en contra parte de su par CS-003.

En la línea SAG-4, que también cuenta con dos baterías de hidrociclones, la distribución de sólidos no presenta una diferencia tan pronunciada como en las líneas SAG-1 y SAG-2. La carga de sólidos en esta línea se reparte de manera más equitativa entre las dos baterías, lo que sugiere un comportamiento más equilibrado en la distribución de pulpa dentro del circuito.

En lo que respecta a la línea SAG-3 se identificaron porcentajes de sólidos en las pulpas de alimentación a las BHC considerablemente inferiores al de las demás líneas. Esta diferencia se asocia principalmente al diseño del circuito de esta línea, lo cual podría explicar el menor porcentaje de sólidos en la pulpa.

También, se obtuvo información de caudales volumétricos de pulpa y densidades de pulpa en diferentes etapas dentro del circuito presentados en el apartado de Anexos.

### 5.1.2 Flotación colectiva

En el estudio de este subproceso, en primera instancia se recopiló información desde *PI SYSTEM* del cual se detectaron los dos puntos de suministro del recurso hídrico cuantificados, el primero correspondiente al agua de dilución previa a la flotación Rougher, siendo sólo agua de procesos y el segundo correspondiente al agua de lavado adicionado en las celdas columnares de flotación Cleaner abastecido de agua fresca. Dichos flujos de alimentación se presentan a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11. "Alimentaciones de Agua en el circuito de Flotación colectiva".

Punto de Adición	Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Desviación [m <sup>3</sup> /h]
ST- 004	430	58
ST- 704	66	21
ST- 861	39	13
ST- 5067	43	13
Agua de lavado	130	16

Se logra observar que la alimentación de agua hacia los cajones de dilución es notoriamente bajas considerando principalmente que la pulpa proveniente desde molienda posee un porcentaje de sólidos elevado para un desarrollo correcto del proceso de flotación. Esta situación se evaluó considerando el orden de magnitud de las alimentaciones de agua y sólido previamente observados en el circuito de molienda.

Asimismo, se obtuvo información sobre las características de pulpa en diferentes etapas del circuito. En primer lugar, se determinó el porcentaje de sólidos y la densidad de la pulpa alimentada a la flotación Rougher, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. "Características de flujos pulpa alimentación, Flotación Rougher".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
S <sub>w</sub> Línea 2 Rougher	%	31	16
ρ <sub>pulpa</sub> Línea 2 Rougher	g/cm <sup>3</sup>	1,2	0,2
S <sub>w</sub> Línea 5 Rougher	%	34	13
ρ <sub>pulpa</sub> Línea 5 Rougher	g/cm <sup>3</sup>	1,3	0,1
S <sub>w</sub> Línea 8 Rougher	%	38	18
ρ <sub>pulpa</sub> Línea 8 Rougher	g/cm <sup>3</sup>	1,3	0,2

Se logró visualizar que las 3 principales alimentaciones al circuito de flotación poseen rangos de operación similares, además de destaca la ausencia del porcentaje de sólidos medidos previo a la alimentación Rougher de la Línea 9, esto debido a que por diseño esta nueva línea de flotación no posee equipo medidor posterior al cajón distribuidor ST-705.

Además, se obtuvo información de las características de alimentación en flotación columnar, desde densímetros colocados posteriormente a las dos bombas que distribuyen la pulpa desde el cajón ST-860, como se puede observar la Tabla 13 presentada a continuación.

*Tabla 13. "Características de pulpa alimentación, Flotación columnar".*

Medición	Unidad de medida	Promedio
Pulpa alimentación	m <sup>3</sup> /h	3.766
S <sub>w</sub> alimentación	%	20
ρ <sub>pulpa</sub> alimentación	g/cm <sup>3</sup>	1,2

Se logra observar que en comparación al porcentaje de sólidos utilizado en la etapa Rougher esta etapa trabaja a un porcentaje de sólidos menor, lo que inicialmente induce a que se debiese agregar agua para diluir la pulpa desde etapas previas.

La segunda fuente de información para este subproceso fueron los reportes hídricos, de los cuales se extrajo valores de flujos correspondientes a los relaves del circuito y el concentrado colectivo que alimenta a la etapa de flotación selectiva. Como se muestra en la Tabla 14 presentada a continuación.

*Tabla 14. "Datos recopilados desde Reportes hídricos, Flotación colectiva".*

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Sólido alimentación Espesadores Relaves	TPH	7.271	878
S <sub>w</sub> Alimentación Espesadores Relaves	%	34	1
Sólido en Concentrado Colectivo	TPH	122	13
S <sub>w</sub> Concentrado Colectivo	%	18	3

De esta fuente de información se logra intuir inicialmente como correcta, ya que los porcentajes de sólidos y sólidos de los flujos medidos cuadran en magnitud con valores y características de flujos recopilados en etapas previas.

### 5.1.3 Flotación selectiva

En el estudio de esta etapa la colección de información inició con la extracción desde el Software PI las adiciones cuantificadas de agua fresca expuestas a continuación a través de la Tabla 15.

*Tabla 15. "Adiciones de agua Fresca".*

Punto de adición	Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Desviación [m <sup>3</sup> /h]
ST-28	29	42
ST-17	31	14
ST-39	22	5
ST-202	8	6

Se observa que las adiciones de agua en esta etapa son significativamente menores a las etapas de molienda y flotación, esto asociado principalmente, a que el volumen de pulpa y concentrado tratado esta etapa es más acotado respecto a sus etapas predecesoras.

Por otro lado, también se obtuvieron datos operacionales desde reportes hídricos, correspondiente al concentrado de cobre que sale de la descarga del espesador TK – 711, rebose de agua del espesador clarificador TK – 013. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 16 a continuación.

*Tabla 16. "Datos recopilados desde Reportes Hídricos, flotación selectiva".*

Medición	Unidad de Medida	Promedio	Desviación
Sólido en Concentrado de Cobre	TPH	109	52
%S <sub>w</sub> Concentrado de Cobre	%	57	5
Rebose TK – 013	m <sup>3</sup> /h	428	86

Esta información es de suma relevancia, ya que confirma lo indicado en la Tabla 15, al evidenciar que el volumen de control en este subproceso es significativamente menor en comparación con los demás subprocesos.

## 5.2 Balance hídrico

Una vez recopilada la información disponible relacionada a flujos, se desarrolló el balance general de la planta concentradora y de los subprocesos estudiados.

### 5.2.1 Balance general

En primera instancia, para desarrollar el balance de la planta concentradora, realizó el cálculo de agua contenida en el mineral. Este cálculo se basó en el supuesto número 3 que estima una humedad del 2% de la alimentación:

$$Agua_{\text{mineral}} = \text{Flujo mineral alimentado} \cdot \% \text{Humedad mineral} \cdot \rho_{\text{agua}} \quad (80)$$

De esta forma se desarrolló el balance general de la planta, entregado por la Tabla 17:

Tabla 17. "Balance masico de agua Planta Concentradora período 1-10-2023 y 30-03-2024".

	Flujo	Valor
FEED	Agua fresca, m <sup>3</sup> /h	1.840
	Agua recirculada, m <sup>3</sup> /h	13.644
	Agua contenida en mineral, m <sup>3</sup> /h	157
	<b>TOTAL, m<sup>3</sup>/h</b>	<b>15.641</b>
OUT	Agua en concentrado de cobre, m <sup>3</sup> /h	80
	Agua Espesadores de Relaves, m <sup>3</sup> /h	14.573
	<b>TOTAL, m<sup>3</sup>/h</b>	<b>14.640</b>
	<b>Δ (FEED – OUT), m<sup>3</sup>/h</b>	<b>1.001</b>

El balance hídrico general realizado en la planta muestra resultados según lo esperado (Feed > Out). Esto se debe a que la superintendencia de aguas no considera pérdidas en el balance de la planta, además que las salidas controladas solo están asociadas a los procesos metalúrgicos, mientras que las alimentaciones de agua fresca y de procesos también se distribuye en otros usos previamente mencionados.

### 5.2.2 Molienda

Con el diagrama de flujo presentado en la Figura 10 del apartado anterior, se realizó el balance por cada línea de molienda de forma independiente, utilizando los datos operacionales obtenidos.

A continuación, se expone el balance de masa correspondiente a la Línea SAG-1, ilustrado en la Figura 13:

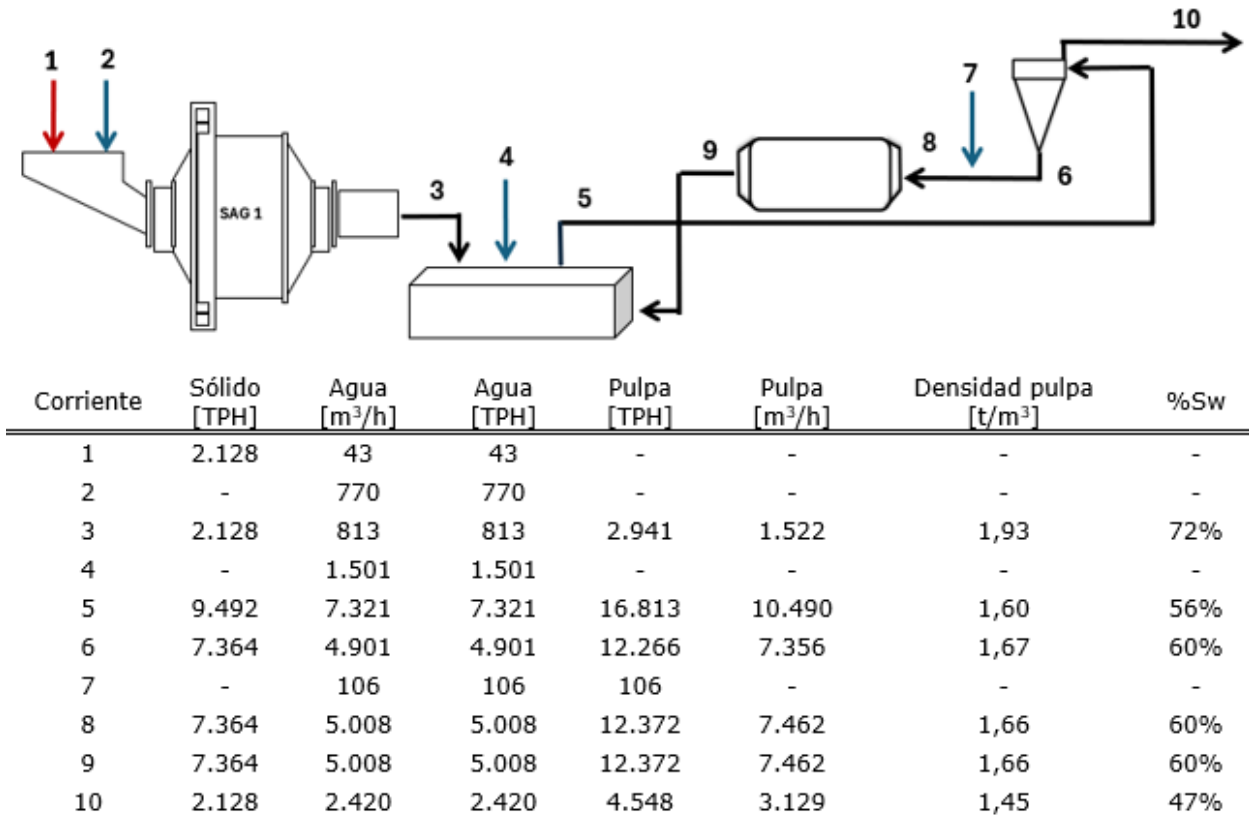


Figura 13. "Balance másico, Línea SAG-1".

Se logra visualizar que el porcentaje de sólidos obtenido correspondiente a la molienda secundaria, inicialmente se ubica en rango bajo de operación en lo que corresponde a los equipos de molienda de bolas, según las bases teóricas de este estudio, lo que inicialmente sugiere una oportunidad de ahorro hídrico dentro del circuito, disminuyendo o eliminando el flujo de agua correspondiente a la corriente 7, esto aumentaría en un 0,5% el porcentaje de sólidos, pero que sin embargo habilitaría un ahorro de aproximadamente 1.000.000 m<sup>3</sup> de aguas de procesos cada año.

Asimismo, se expone el balance de masa realizado para la línea SAG-2 a través de la Figura 14.

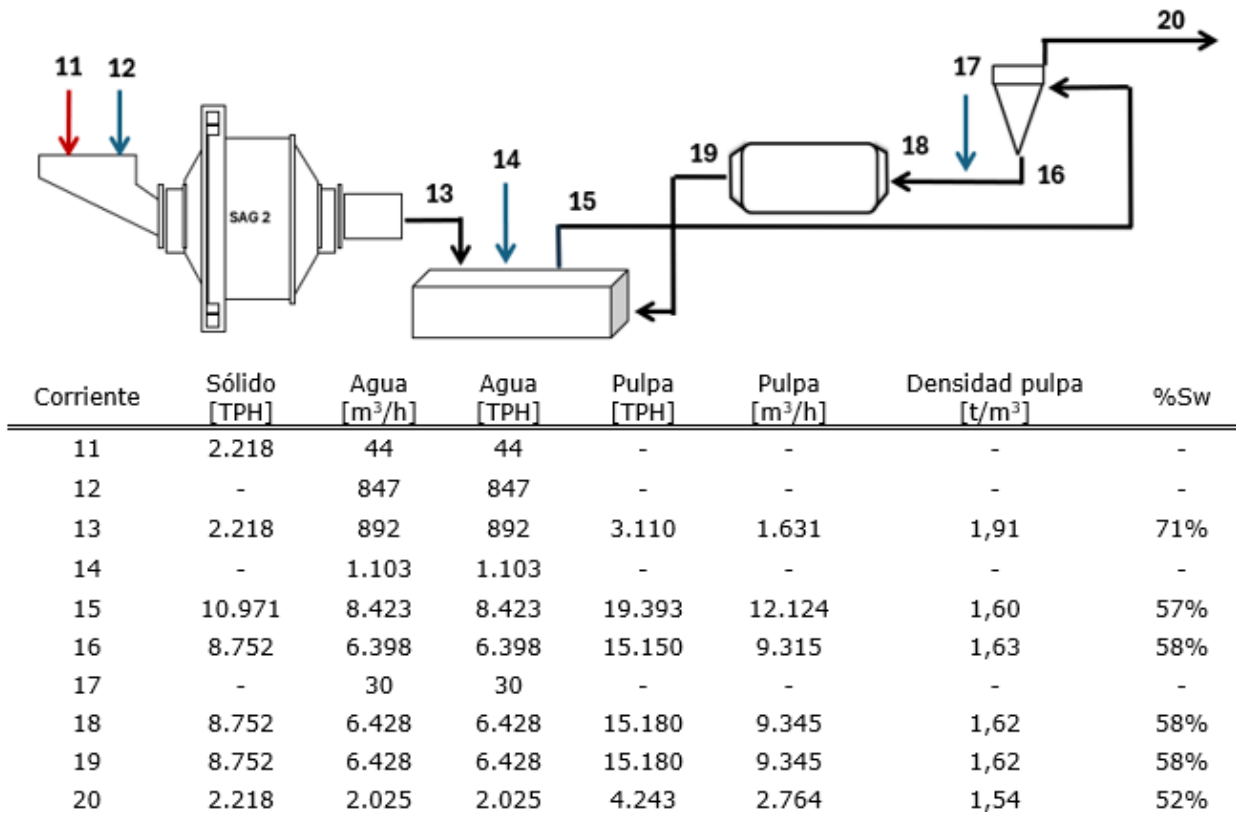


Figura 14. "Balance másico, Línea SAG-2".

Con los resultados del balance masico del circuito de molienda SAG-2 y comparándolos con los obtenidos del circuito SAG-1, que tiene el mismo diseño, se observa que la línea SAG-2 presenta un mejor rendimiento en el tratamiento de mineral, ya que procesa en promedio 90 TPH más. Además, requiere una alimentación de agua menor, lo cual se debe principalmente a que la línea SAG-2 alimenta 398 m<sup>3</sup>/h menos de agua de procesos al estanque de dilución posterior al molino SAG. Asimismo, como para la línea SAG-1, en este circuito igual se presenta la oportunidad de un ahorro hídrico disminuyendo o eliminado la adición de agua previa a los molinos de bolas.

Siguiendo la metodología, se realizó el balance másico realizado para el circuito de la Línea SAG-3, ilustrado a través de la Figura 15 presentada a continuación.

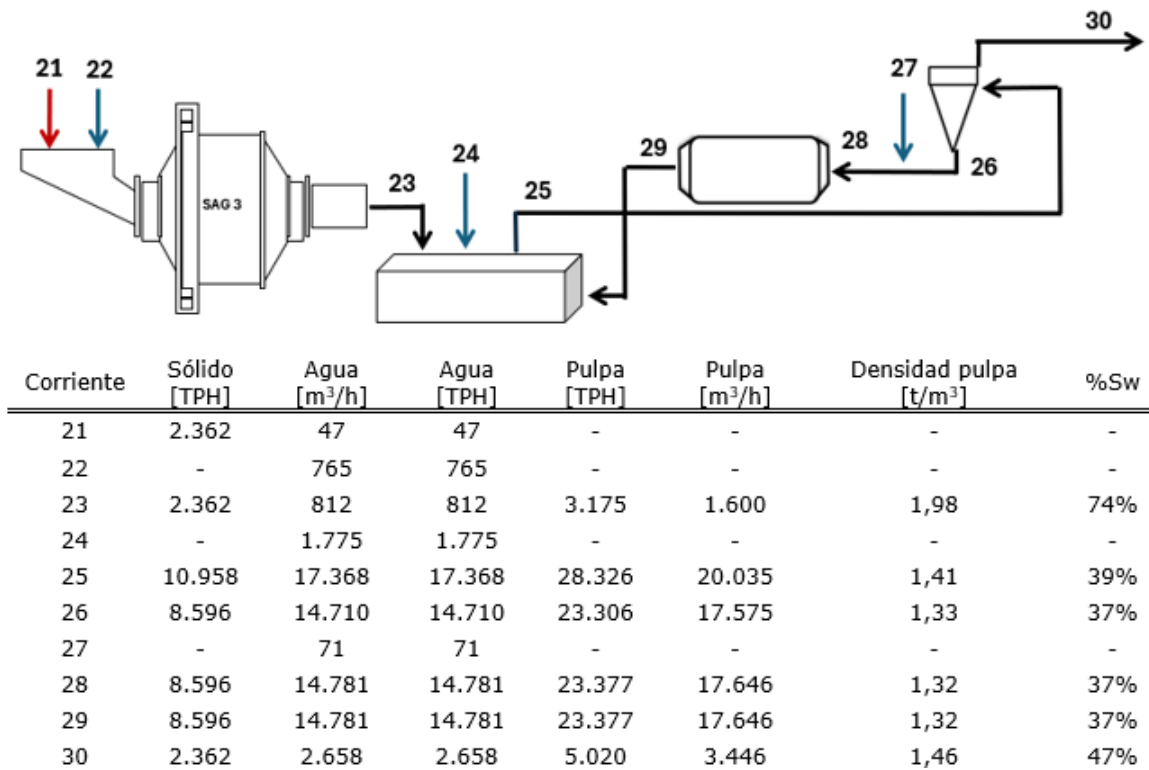
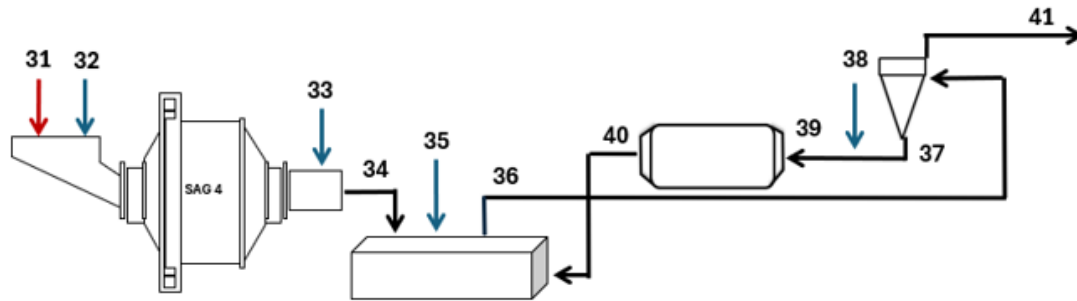


Figura 15. "Balance másico, Línea SAG-3".

Se logra observar claramente que el porcentaje de sólidos de las corrientes 25 y 28 correspondientes a la alimentación del sistema de hidrociclones y de molienda de bolas respectivamente son considerablemente bajos si se comparan con las otras líneas de molienda, esto se explica inicialmente a que debido que no se consideraron en el balance las líneas de flujo correspondiente a chimbombos que forman parte de la alimentación de estos equipos y que valores operacionales de porcentajes de sólidos de estos flujos de pulpa son menores debido a su diseño operacional. Este sistema fue el que más se alteró con la simplificación, ya que en la realidad posee cuatro baterías de hidrociclones que fueron sintetizadas en una.

Finalmente, se obtuvo el balance másico de la Línea SAG-4, el cual se presenta a continuación en la Figura 16.



Corriente	Sólido [TPH]	Agua [m <sup>3</sup> /h]	Agua [TPH]	Pulpa [TPH]	Pulpa [m <sup>3</sup> /h]	Densidad pulpa [t/m <sup>3</sup> ]	%Sw
31	1.471	23	23	-	-	-	-
32	-	456	456	-	-	-	-
33	-	59	59	-	-	-	-
34	1.471	537	537	2.009	1.028	1,95	73%
35	-	1.279	1.279	-	-	-	-
36	5.949	4.733	4.733	10.682	6.671	1,60	56%
37	4.477	2.917	2.917	7.394	4.409	1,68	61%
38	-	-	-	-	-	-	-
39	4.477	2.917	2.917	7.394	4.409	1,68	61%
40	4.477	2.917	2.917	7.394	4.409	1,68	61%
41	1.471	1.817	1.817	3.288	2.307	1,43	45%

Figura 16. "Balance másico, Línea SAG-4".

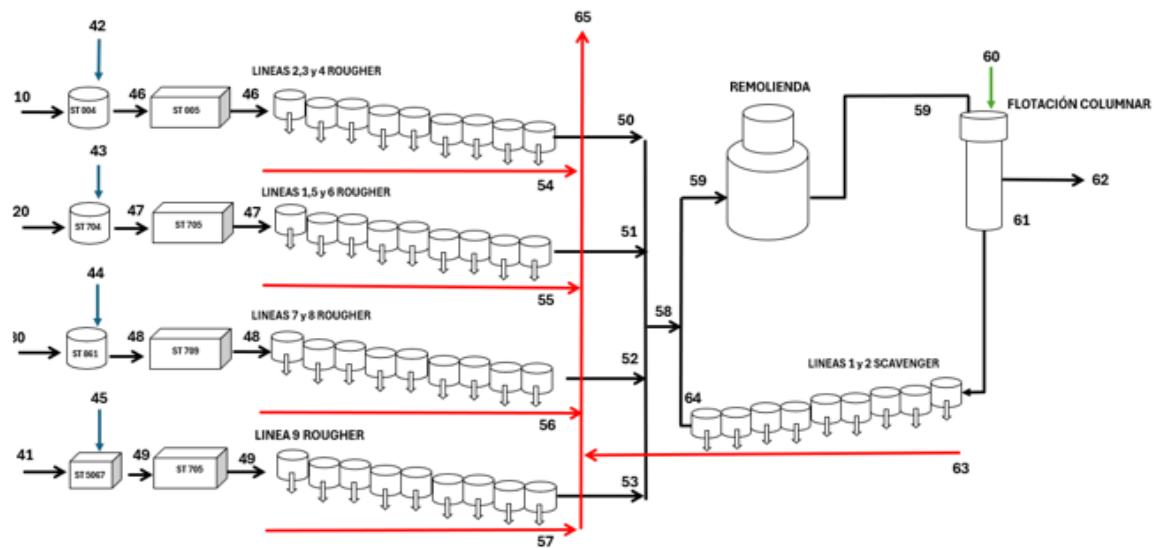
A diferencia de las otras líneas, el balance realizado para la molienda secundaria de este circuito es más representativo del comportamiento de este. Esto se debe a que esta línea es la única que actualmente posee sólo un molino de bolas. Además, la pulpa de salida de esta línea (corriente 41) presenta el menor porcentaje de sólidos (45%) respecto a las otras, lo que inicialmente se presenta como una ventaja de ahorro hídrico aguas abajo.

### 5.2.3 Flotación colectiva

En esta etapa, previo realizar el balance hídrico, se identificaron inicialmente dos fuentes de información sobre la alimentación de pulpa a la etapa Rougher: Las presentadas en las tablas 11 y 12. Se esperaba que estos datos fueran consistentes dentro de un cierto rango; sin embargo, no fue así. La información proporcionada por los flujómetros de agua de dilución no se ajusta al balance general de agua de la planta concentradora. En esta situación, se estimaría que la planta recibe 9.498 m<sup>3</sup>/h de agua de procesos, considerando las etapas de molienda y flotación, lo cual contrasta significativamente con

los 13.644 m<sup>3</sup>/h de agua de procesos de alimentación reportados por la Superintendencia de Aguas. Ante esto, se generó la suposición de un mal estado de los equipos de medición de agua de dilución y se tomó la decisión de determinar el agua de dilución utilizando las características de la pulpa proveniente desde molienda y el porcentaje de sólidos medido antes de las celdas Rougher.

Teniendo en consideración lo mencionado previamente, se realizó el balance másico del circuito de flotación colectiva como se expone a continuación en la Figura 17.



Corriente	Sólido [TPH]	Agua [m <sup>3</sup> /h]	Agua [TPH]	Pulpa [TPH]	Pulpa [m <sup>3</sup> /h]	Densidad pulpa [t/m <sup>3</sup> ]	%Sw
10	2.128	2.420	2.420	4.548	3.129	1,45	47
20	2.218	2.025	2.025	4.243	2.764	1,54	52
30	2.362	2.658	2.658	5.020	3.446	1,46	47
41	1.471	1.817	1.817	3.288	2.307	1,43	45
42	-	2.327	2.327	-	-	-	-
43	-	2.369	2.369	-	-	-	-
44	-	1.132	1.132	-	-	-	-
45	-	192	192	-	-	-	-
46	2.128	4.747	4.747	6.875	5.544	1,24	31
47	2.218	4.394	4.394	6.612	5.165	1,28	34
48	2.362	3.791	3.791	6.153	4.634	1,33	38
49	1.471	2.009	2.009	3.481	2.500	1,39	42
59	874	3.495	3.495	4.369	3.766	1,16	20
60	-	130	130	-	-	-	-
61	752	3.089	3.089	3.711	3.340	1,11	20
62	122	536	536	658	577	1,14	18
63	-	-	-	-	-	-	-
64	-	-	-	-	-	-	-
65	7.271	14.234	14.234	21.505	16.658	1,29	34

Figura 17. "Balance másico, Flotación Colectiva".

En primer lugar, es importante señalar que la ausencia de equipos de control ha impedido desarrollar un balance más profundo de las etapas Rougher, de remolienda y Scavenger. Como consecuencia, no es posible realizar un análisis comparativo entre las distintas líneas de flotación en las etapas Rougher y Scavenger a diferencia de lo que se desarrolló en molienda.

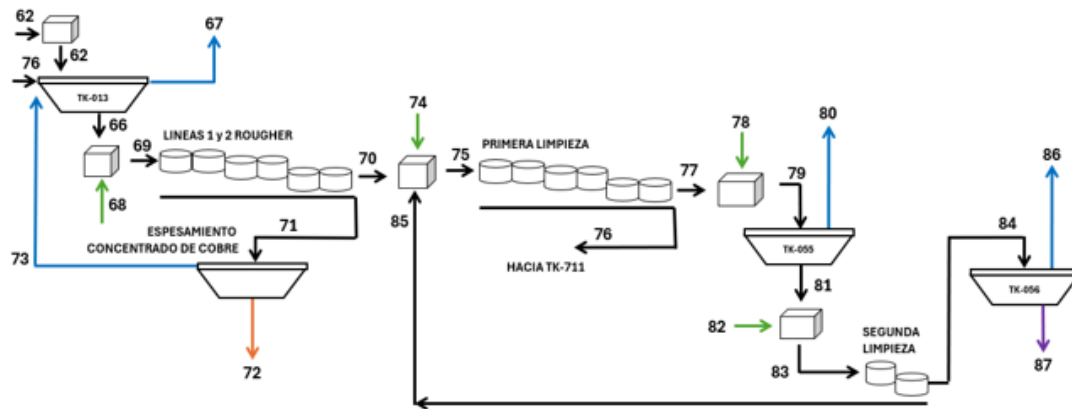
Los resultados del balance confirmaron que el criterio empleado para determinar la alimentación de agua de dilución al sistema fue adecuado. Se obtuvo una alimentación global de agua de 15.071 m<sup>3</sup>/h, siendo mayor en 301 m<sup>3</sup>/h el flujo total de las salidas. Esta diferencia es esperable debido a varios factores, principalmente a que el planteamiento del balance no estimó pérdidas ni acumulaciones de materia dentro del circuito y que el balance fue desarrollado utilizando flujos promedio, lo cual introduce un margen de variación respecto a los valores reales de los flujos.

Además, se ha observado que el cajón ST 861 alimentado por la corriente 44 consume aproximadamente un 45% menos de agua que los demás cajones de dilución ST 004 y ST 704 alimentados por las corrientes 42 y 43 respectivamente, operando a un porcentaje de sólidos más alto que las dos primeras líneas.

Es importante señalar que la adición de agua al cajón ST-5067 es de 192 m<sup>3</sup>/h (corriente 45), significativamente menor que en otros cajones. Sin embargo, esta línea requiere observación, ya que no cuenta con un densímetro antes de la alimentación hacia la línea 9 de flotación Rougher; por ello, se ha utilizado el valor del caudal de agua de dilución, en lugar de los datos obtenidos mediante el porcentaje de sólidos medido. Adicionalmente, cabe considerar que la línea 9 Rougher tiene un volumen de control menor y un porcentaje de sólidos más alto. Esto sugiere que se necesita una menor adición de agua para reducir el porcentaje de sólidos en comparación con las demás líneas.

#### **5.2.4 Flotación selectiva**

Antes de realizar el balance del circuito, se observó la falta de datos operacionales suficientes para una caracterización adecuada del proceso. se optó en conjunto del equipo de operaciones de flotación realizar un balance general de esta etapa, el cual se presenta a continuación en la Figura 18.



Corriente	Sólido [TPH]	Agua [m <sup>3</sup> /h]	Agua [TPH]	Pulpa [TPH]	Pulpa [m <sup>3</sup> /h]	Densidad pulpa [t/m <sup>3</sup> ]	%Sw
62	122	536	536	658	577	1,14	18
67	-	428	428	-	-	-	-
68	-	6	6	-	-	-	-
72	109	82	82	191	118	1,61	57
74	-	54	54	-	-	-	-
78	-	17	17	-	-	-	-
82	-	5	5	-	-	-	-
87	13	27	27	40	31	1,27	32

Figura 18. "Balance másico, Flotación Selectiva".

En esta etapa se observa una recuperación del 80% del agua proveniente del concentrado colectivo antes de pasar a las etapas de flotación. Esta recuperación permite que la pulpa procesada en el circuito tenga una menor dilución. Las adiciones de agua en esta fase se utilizan principalmente para realizar pequeños ajustes en el porcentaje de sólidos de la pulpa; sin embargo, en comparación con los flujos de agua empleados en etapas anteriores, el consumo de agua en esta etapa es mínimo.

Es relevante destacar que en esta etapa la utilización de agua fresca es indispensable con la tecnología que se posee actualmente dentro de Minera los Pelambres, ya que los aditivos que posee el agua de procesos afectarían negativamente la flotación selectiva de molibdeno

## 5.3 Consumos

### 5.3.1 Molienda

En base a los resultados obtenidos del balance másico del circuito de molienda se determinaron los consumos de hídricos específicos de cada línea, graficados en la Figura 19 que se presenta a continuación.

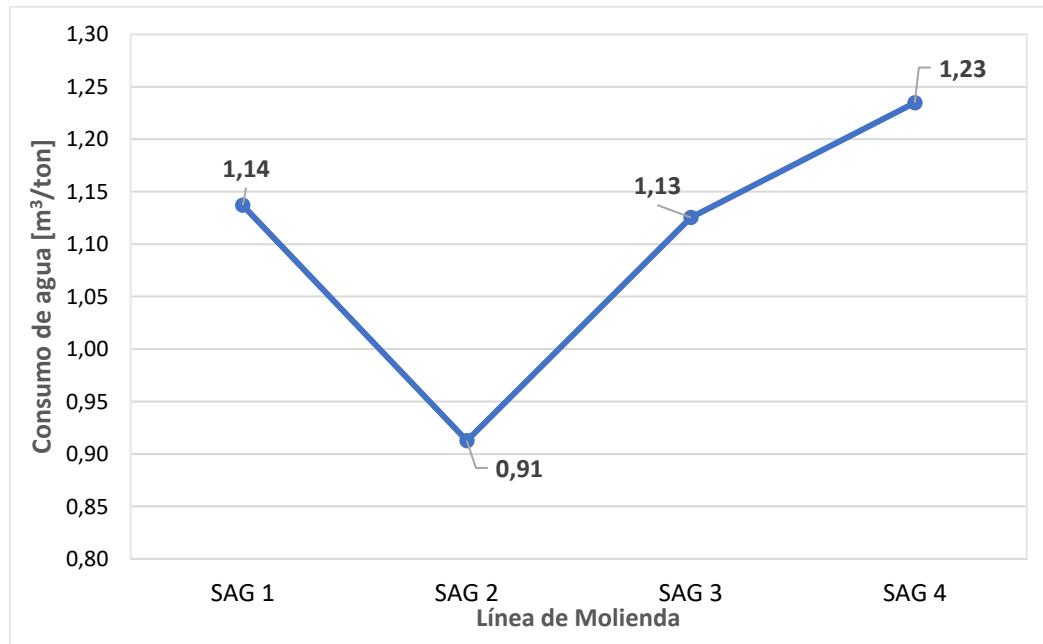


Figura 19. "Consumos por línea de molienda".

Se logra observar claramente que las líneas SAG-1 y SAG-3 poseen actualmente consumos hídricos con una diferencia mínima, esto resulta esperando, ya que ambas líneas entregan una pulpa de salida con un porcentaje de sólidos aproximado del 47% según lo mostrado en las Figuras 13 y 15.

Por otra parte, se logra visualizar que la línea SAG-2 presenta el menor consumo hídrico del subproceso, lo cual resulta fuera de lo esperado, ya que, comparado con la primera línea de molienda, estas son iguales en diseño y equipos, pero con comportamientos operacionales distintos ya que la segunda línea procesa 91 TPH más de mineral utilizando 395 m³/h menos de agua. Lo que se traduce en un rendimiento de tratamiento de mineral mejor con un ahorro de agua considerable.

En lo correspondiente a la línea SAG-4, se logró detectar que su consumo hídrico se escapa de sus pares, lo que concuerda con el antecedente proporcionado desde la

Superintendencia de Aguas. Esta información es de vital importancia, ya que actualmente se encuentra tratando aproximadamente la mitad de mineral que pudiese tratar a máxima capacidad, lo que se traduce en algo alarmante, ya que si se extrapola un aumento en el tratamiento de aproximadamente 2000 TPH esta línea necesitaría 2.161 m<sup>3</sup>/h de agua que con los parámetros operacionales utilizados actualmente, dispararía el consumo de agua de la planta, afectando negativamente en las pretensiones de aumentar la producción de concentrado de Minera los Pelambres.

### 5.3.2 Flotación

Para esta etapa se determinó como el principal consumo de agua el proceso de dilución de pulpa previa a la flotación Rougher en la cual se suministra 6.021 m<sup>3</sup>/h de agua de procesos, siendo el segundo consumo más importante después de la molienda.

A continuación, se presenta a través de la Figura 20 el consumo de agua específico de cada cajón de dilución.

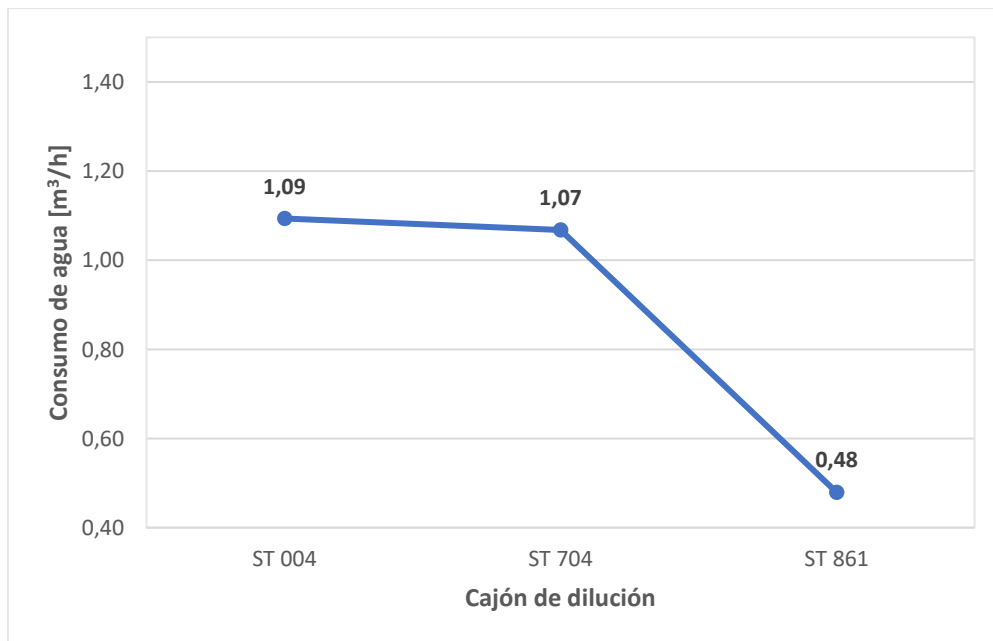


Figura 20. "Consumo de aguas de procesos, Flotación colectiva".

De acuerdo con los resultados obtenidos en el consumo de agua en molienda, se esperaba que la adición de agua en el cajón ST 004 fuera significativamente menor en comparación con el cajón ST 704. Sin embargo, los registros muestran que la adición fue de 2.327 m<sup>3</sup>/h y 2.369 m<sup>3</sup>/h para los cajones ST 004 y ST 704, respectivamente.

Siendo así importante de destacar que las líneas Rougher alimentadas del cajón ST 004 presentan un menor porcentaje de sólidos (31%), sumado a que actualmente no se cuenta con mediciones que permitan evaluar si estas líneas tienen un rendimiento superior en la recuperación de cobre frente a las que se alimentan desde el ST 704 o del ST-861. Esta situación sugiere la necesidad de realizar estudios comparativos para analizar la eficiencia en la recuperación en esta etapa, especialmente considerando la posibilidad de aumentar el porcentaje de sólidos en el proceso, lo cual podría contribuir a reducir el consumo de agua.

Finalmente, se estimó el consumo de agua fresca para el circuito de flotación selectiva, como se logra visualizar en la Tabla 18 a continuación:

*Tabla 18. "Consumo de agua fresca, Flotación selectiva".*

Agua fresca utilizada [m <sup>3</sup> /h]	Consumo [m <sup>3</sup> /ton]
82	0,68

Si bien en magnitud el agua utilizada en esta es tan sólo un 4% del suministro total de agua fresca y es considerablemente menor al agua recirculada utilizada en otros procesos, es relevante caracterizar este proceso, ya que actualmente no se puede reemplazar la alimentación hídrica de esta etapa.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

El estudio reveló que la planta concentradora de Minera Los Pelambres actualmente reutiliza el 88% de su agua, logrando un make up de 0,22 m<sup>3</sup>/h, lo cual es un indicador positivo, ya que se acerca a la meta de reducir el consumo de agua fresca a niveles inferiores al 10%.

Asimismo, se identificaron los principales consumos de agua dentro de la planta: el subproceso de molienda, que utiliza 8.919 m<sup>3</sup>/h de agua de procesos, y la etapa de flotación Rougher, que requiere 6.021 m<sup>3</sup>/h de la misma fuente. Además, se determinó que el proceso de flotación selectiva utiliza únicamente agua fresca, que, aunque sólo representa un 4% del agua proveniente de fuentes continentales no debe ser descuidada en el contexto de escasez que se encuentra la región de Coquimbo.

Se identificó una oportunidad de ahorro hídrico en la molienda secundaria, donde eliminar el agua de procesos añadida podría reducir el consumo en 206 m<sup>3</sup>/h, logrando un ahorro anual de 1.783.457 m<sup>3</sup> de agua. Sin embargo, para implementar esta medida, se requieren equipos de control para medir el consumo con mayor precisión. Además, se concluyó que la línea de molienda SAG-2 tiene el menor consumo hídrico del subproceso, ya que procesa 91 TPH más que la SAG-1 con 395 m<sup>3</sup>/h menos de agua. Es urgente recalcar la necesidad de investigar los parámetros operacionales de la línea SAG-4, cuyo consumo de agua es significativamente mayor procesando menos mineral que las otras líneas.

También se observó que el equipo de operaciones de flotación carece de un conocimiento detallado sobre los flujos de agua de dilución en la etapa previa a la flotación Rougher, ya que se detectó una diferencia significativa de 5.442 m<sup>3</sup>/h entre dos fuentes de datos relacionadas en el agua de procesos utilizada en este circuito, evidenciando problemas estructurales en el traspaso de información.

Considerando lo mencionado previamente, se identificaron grandes e importantes oportunidades de mejora para la planta concentradora de Minera Los Pelambres, que incluyen optimizar el control de sus procesos mediante la implementación de mejoras en la medición de flujos, la calibración de equipos de control y la creación de bases de datos informativas sobre el desarrollo de los procesos.

## **6.2 Recomendaciones**

### **6.6.1 Evaluación técnico-económica de implementación de instrumentación de control de flujos en molienda.**

Con base en los resultados obtenidos del balance y ante la falta de información sobre los flujos de alimentación a la molienda secundaria, se propone la implementación estratégica de equipos de control, como flujómetros y densímetros, en el underflow de los hidrociclones BHC, CS-001, CS-003 y CS-702. Estos equipos permitirían medir con precisión tanto el caudal como la densidad de la pulpa.

El principal objetivo de esta implementación radica en mejorar el control y seguimiento de flujos de pulpa en el circuito, e implementar el control en los flujos de pulpa en los chimbombos dentro del circuito de molienda.

La implementación de estos equipos aprovecha la oportunidad de caracterizar individualmente a los equipos de molienda de bolas con miras a disminuir el consumo de agua en estos equipos, ya que inicialmente con la información recopilada se puede intuir una posible disminución o incluso eliminar la adición de agua en esta etapa, pero sin embargo no es suficiente para sustentarse.

También se sugiere la instalación de flujómetros para el agua de arrastre que se alimenta en los chimbombos, recomendando en conjunto con operarios del área de molienda. Actualmente, no se dispone de datos precisos sobre la cantidad de agua añadida en estas líneas, esta información es relevante, ya que permitiría caracterizar adecuadamente una parte del circuito de la Línea SAG-3 que se alimenta desde estas líneas de pulpa.

### **6.2.2 Implementación de "Reporte de Flujos" en Gerencia Concentradora**

En base al balance realizado y la ante ausencia de catastros informativos acerca del comportamiento de los flujos en la planta, se sugiere la implementación de una base de datos denominada "*Reporte de Flujos*", que garantice que los avances logrados en esta investigación se mantengan y se desarrollen por personal capacitado a lo largo del tiempo basado en el documento EXCEL que fue creado para realizar los cálculos de este estudio.

Las ventajas de la implementación de este sistema sugieren principalmente, encontrar continuamente oportunidades de mejora en la optimización del consumo de agua,

mejoras en rendimiento de mineral procesado, determinar posibles cuellos de botella ante posibles cambios. También mejorará la conexión de información entre las diferentes superintendencias de la planta concentradora, como para minera en general.

### **6.2.3 Calibración de equipos**

Cabe destacar la necesidad actual de calibrar los equipos de medición de flujo, especialmente aquellos que miden la alimentación de agua de dilución previa a la etapa de flotación Rougher. Hasta la fecha, estos equipos no proporcionan información precisa, afectando así el control del proceso y, en consecuencia, las posibilidades de realizar un ahorro real de agua dentro de la planta concentradora.

También se sugiere calibración de los densímetros dispuestos en el circuito de flotación colectiva, en las etapas: flotación Rougher, remolienda y flotación Cleaner. Esto debido a que el proceso de levantamiento de datos realizado, se obtuvieron cantidades considerables de datos sin sentido físico, lo que puede llevar a tomar decisiones incorrectas por el equipo de control en tiempo real.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CODELCO EDUCA. *Proceso de chancado del cobre*. (2024). En línea, disponible en: <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/chancado.html>. Acceso el 27 de julio de 2024.
- [2] VEGA, Denis. *Molienda*. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 2019.
- [3] RUIZ, Maria Cristina. *Reducción de tamaño*. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- [4] VEGA, Denis. *Molienda no convencional*. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 2022.
- [5] WILLS, Barry A., and James A. FINCH. *Mineral Processing Technology*. 8<sup>th</sup> ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.
- [6] AUSTIN, L., y CONCHA, F. *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación*, CYTED, 1994.
- [7] SEPULVEDA, J. *Guía Práctica para la optimización de la eficiencia energética en la molienda de minerales*, 2022.
- [8] PINTO, C. *Simulador en estado estacionario de circuitos de molienda SAG, para etapas tempranas de ingeniería*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería de Minas, 2021.
- [9] GUTIERREZ, L. *Introducción a la Flotación*. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 2023.
- [10] GUTIERREZ, L. *Diseño y dimensionamiento de circuitos de flotación*. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 2023.
- [11] CONCHA, F. *Manual de filtración & separación*. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 2001.
- [12] GOODING, N. *Balance de Materia*. 7<sup>a</sup> ed. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2009.
- [13] ANTOFAGASTA MINERALS. *Nosotros*. (2024). En línea, disponible en: <https://www.aminerals.cl/nosotros>. Acceso el 27 de julio de 2024.
- [14] MINERA LOS PELAMBRES. *Historia*. (2024). En línea, disponible en: <https://web.pelambres.cl/nosotros/quienes-somos/historia>. Acceso el 27 de julio de 2024.

- [15] ANTOFAGASTA MINERALS. Productos. (2024). En línea, disponible en: <https://www.aminerals.cl/nosotros/que-hacemos/nuestros-productos>. Acceso el 27 de julio de 2024.
- [16] AROS, F. Descripción del proceso productivo de la Planta Concentradora de Minera Los Pelambres. Minera los Pelambres, 2022.
- [17] COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI. Reporte de Sustentabilidad 2023. (2024). En línea, disponible en: <https://collahuasi.cl/sustentabilidad/reportes-de-sustentabilidad/> . Acceso el 25 de octubre de 2024.
- [18] CONSEJO MINERO. Make Up Más Bajo de la Minería. (2024). En línea, disponible en: <https://consejominero.cl/plataforma-social/make-up-mas-bajo-de-la-mineria/>. Acceso el 25 de octubre de 2024.

## 8. ANEXOS

El diagrama general que se consideró para el balance del circuito de molienda está dado en la siguiente Figura:



Figura 21. "Diagrama General de Agua, Molienda".

El diagrama general que se consideró para el balance del circuito de flotación colectiva está dado en la siguiente Figura:



Figura 22. "Diagrama General de Agua, Flotación colectiva".

El diagrama general que se consideró para el balance del circuito de flotación selectiva está dado en la siguiente Figura:



Figura 23. "Diagrama General de Agua, Flotación selectiva".

Parte del estudio estadístico realizado se puede observar en las 3 siguientes gráficas:

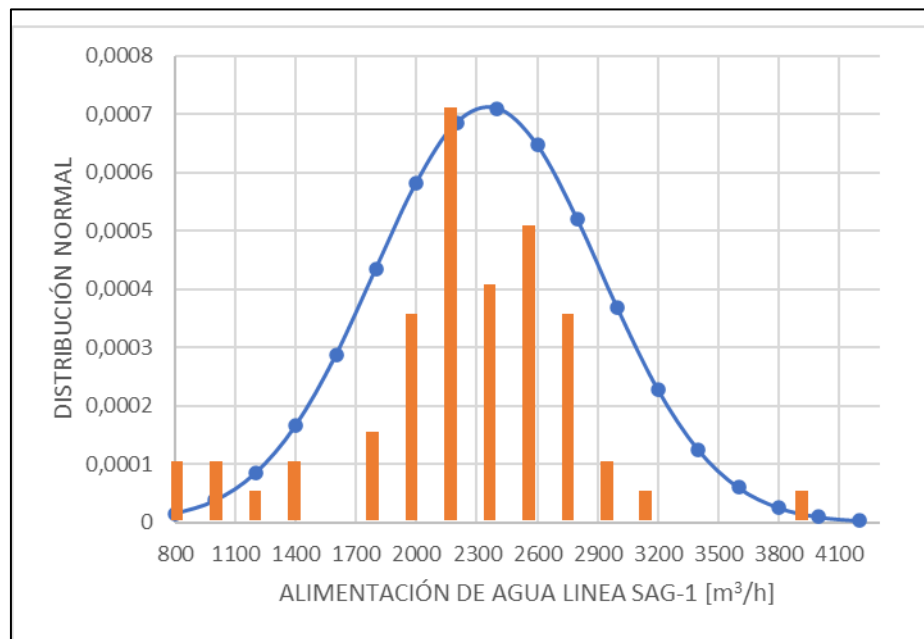


Figura 24. "Campana de Gauss con alimentaciones de agua, Línea SAG-1".

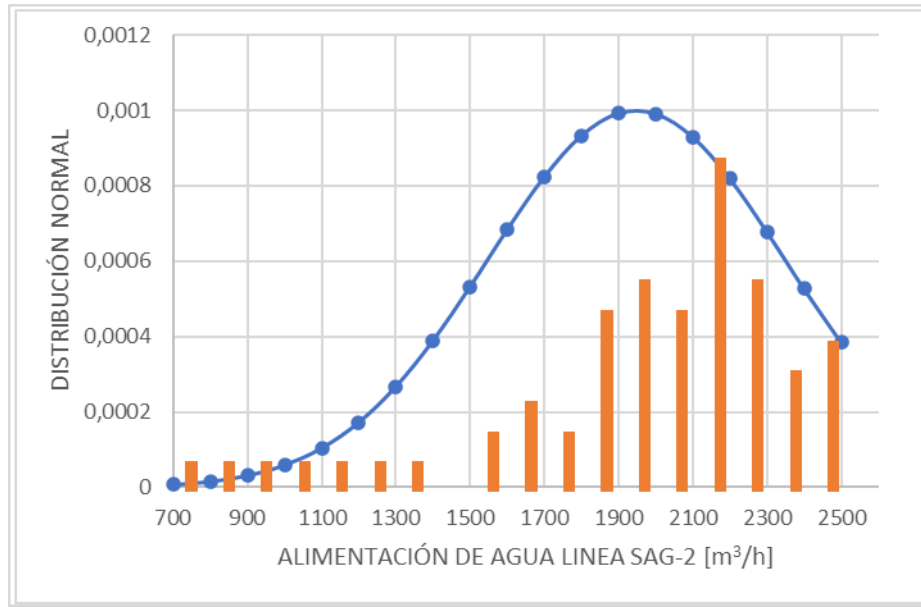


Figura 25. "Campana de Gauss con alimentaciones de agua, Línea SAG-2".

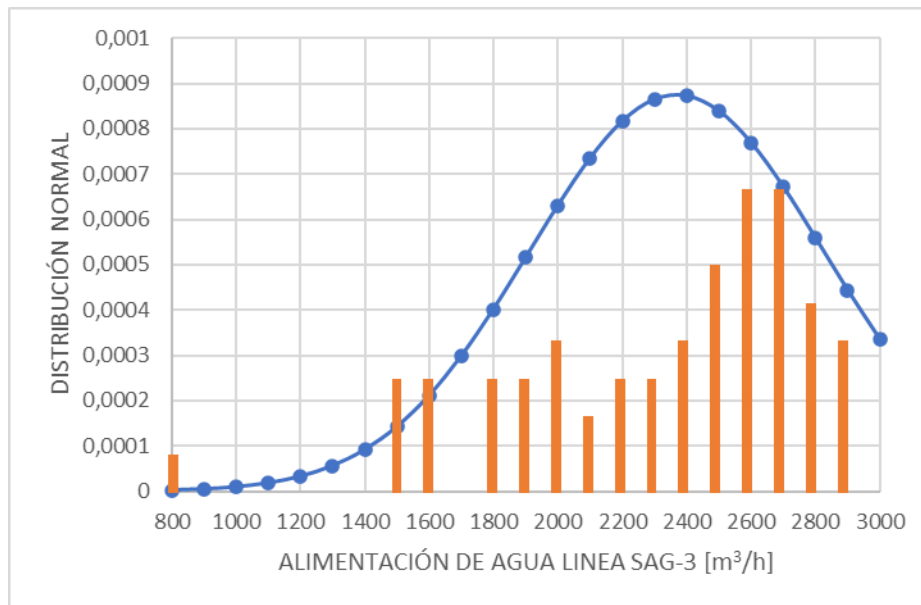


Figura 26. "Campana de Gauss con alimentaciones de agua, Línea SAG-3".

Las siguientes tablas presentan las alimentaciones de agua y mineral para las distintas líneas de molienda estudiadas:

Tabla 19. "Alimentaciones de agua y mineral Línea SAG-1, entre 30-03-2019 y 30-03-2024".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Alimentación Agua	[m <sup>3</sup> /h]	2.356	560
Alimentación Mineral	[tph]	2.109	403

Tabla 20. "Alimentaciones de agua y mineral Linea SAG-2, entre 30-03-2019 y 30-03-2024".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Alimentación Agua	[m <sup>3</sup> /h]	1.948	399
Alimentación Mineral	[TPH]	2.127	419

Tabla 21. "Alimentaciones de agua y mineral Linea SAG-3, entre 30-03-2019 y 30-03-2024".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Alimentación Agua	[m <sup>3</sup> /h]	2.369	456
Alimentación Mineral	[TPH]	2.378	401

Tabla 22. "Alimentaciones de agua y mineral Linea SAG-4, entre 01-10-2019 y 30-05-2024".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Alimentación Agua	[m <sup>3</sup> /h]	1.902	578
Alimentación Mineral	[TPH]	1.536	357

Tabla 23. "Características de flujos en Linea SAG-1".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Pulpa alimentación CS-001	m <sup>3</sup> /h	5.355	1.229
Pulpa alimentación CS-002	m <sup>3</sup> /h	5.024	1.219
$\rho_{\text{pulpa}}$ CS-002	g/cm <sup>3</sup>	1,61	0,20

Tabla 24. "Características de flujos en Linea SAG-2".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Pulpa alimentación CS-003	m <sup>3</sup> /h	5.212	1.466
Pulpa alimentación CS-004	m <sup>3</sup> /h	5.953	1.332
$\rho_{\text{pulpa}}$ CS-003	g/cm <sup>3</sup>	1,50	0,19
$\rho_{\text{pulpa}}$ CS-004	g/cm <sup>3</sup>	1,77	0,16

Tabla 25. "Características de flujos en Linea SAG-3".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Pulpa alimentación CS-702	m <sup>3</sup> /h	6.277	19.45
Pulpa alimentación CS-703	m <sup>3</sup> /h	6.117	751
Pulpa alimentación CS-704	m <sup>3</sup> /h	6.095	683
Pulpa alimentación CS-705	m <sup>3</sup> /h	4.053	2.097
$\rho_{\text{pulpa}}$ CS-702	g/cm <sup>3</sup>	1,45	0,17

Tabla 26. "Características de flujos en Línea SAG-4".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Pulpa alimentación CS-5001	m <sup>3</sup> /h	3.582	4300
Pulpa alimentación CS-5003	m <sup>3</sup> /h	3.689	4.444
$\rho_{pulpa}$ CS-5001	g/cm <sup>3</sup>	1,6	0,2
$\rho_{pulpa}$ CS-5003	g/cm <sup>3</sup>	1,7	1,1

En las siguientes tablas se detallan los puntos de alimentación de agua de procesos en cada línea de molienda:

Tabla 27. "Puntos de alimentación de agua Línea SAG-1, 30-03-2019 y 30-03-2024"

Medición	Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Desviación [m <sup>3</sup> /h]
Molino SAG-1	808	157
Dilución TK-44 (A)	728	303
Dilución TK-44 (B)	794	196
Adición ML- 004	40	28
Adición ML- 005	47	61

Tabla 28. "Puntos de alimentación de agua Línea SAG-2, 30-03-2019 y 30-03-2024"

Medición	Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Desviación [m <sup>3</sup> /h]
Molino SAG-2	823	156
Dilución TK-45 (A)	565	162
Dilución TK-45 (B)	566	106
Adición ML- 006	32	25
Adición ML- 007	-	-

Tabla 29. "Puntos de alimentación de agua Línea SAG-3, 30-03-2019 y 30-03-2024"

Medición	Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Desviación [m <sup>3</sup> /h]
Molino SAG-703	765	148
Dilución TK-707	445	161
Dilución TK-736	1.057	194
Adición ML- 008	63	65
Adición ML-703 underflow CS-703	40	45
Adición ML-703 underflow CS-704	38	42
Adición ML-703 underflow CS-705	260	210

Tabla 30. "Puntos de alimentación de agua Línea SAG-4, 01-10-2019 y 30-05-2024"

Medición	Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Desviación [m <sup>3</sup> /h]
Alimentación de agua a Molino SAG-5001	484	180
Agua Trommel SAG-5001	80	72
Agua de dilución ST-5051	1.473	653

Así, finalmente se obtuvieron los diferentes consumos de agua de procesos en cada equipo de molienda de los diferentes circuitos SAG:

Tabla 31. "Consumo de agua en equipos de molienda".

Línea	Equipo	Alimentación agua [m <sup>3</sup> /h]	Mineral Procesado [TPH]	Consumo [m <sup>3</sup> /ton]
SAG-1	ML SAG-1	808	2.113	0,38
	ML-004/005	3.825	8.469	0,45
SAG-2	ML SAG-2	823	2.131	0,39
	ML-006/007	5.663	10.738	0,53
SAG-3	ML SAG-3	765	2.379	0,32
	ML-008/703	17.761	12.662	1,40
SAG-4	ML SAG-4	1.902	11.536	1,24
	ML-5002	2.890	5.451	0,53

La siguiente tabla muestra las características controladas en la alimentación de los molinos verticales:

Tabla 32. "Características de flujos alimentación, molinos verticales".

Medición	Unidad de medida	Promedio	Desviación
Pulpa alimentación ML-009	m <sup>3</sup> /h	290	208
S <sub>w</sub> ML-009	%	30,3	20,1
Pulpa alimentación ML-010	m <sup>3</sup> /h	226	185
S <sub>w</sub> ML- 010	%	31,8	20,5
Pulpa alimentación ML-701 (PP-908)	m <sup>3</sup> /h	946	282
S <sub>w</sub> alimentación ML-701 (PP- 908)	%	49,1	17,0
Pulpa alimentación ML-701 (PP-703)	m <sup>3</sup> /h	16,4	70,0

# UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

## Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

**Título: "Balance hídrico de procesos metalúrgicos Molienda y Flotación en Planta Concentradora, Minera los Pelambres"**

**Nombre Memorista: Felipe Alejandro Ormeño Puentes**

Modalidad	Proyecto	Profesor Guía
Concepto		<b>Dr Leopoldo Gutiérrez Briones</b>
Calificación		
Fecha	13.11.2024	
Prof. <sup>a</sup> Eugenia Araneda H.		
		<b>Ingeniero Supervisor: Sebastián Fredes Muñoz</b>
		<b>Institución: Minera Los Pelambres</b>

### Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Fernando Betancourt	Prof. Luver Echeverry
---------------------------	-----------------------

### Resumen

El estudio fue realizado en la Planta Concentradora de Minera Los Pelambres, con apoyo de las superintendencias de Molienda y Flotación, buscó identificar oportunidades de ahorro en el consumo de agua mediante un balance másico en el macrosistema de la planta. Se recopilaron datos operacionales de los últimos cinco años (2019-2024) y se analizaron para garantizar la representatividad del sistema. El balance de masa hídrico, enfocado en el periodo de octubre de 2023 a marzo de 2024, incluyó los nuevos equipos de molienda y flotación Rougher del Proyecto INCO. Los resultados muestran que la planta reutiliza el 88% del agua, con un MAKE UP de 0,22 m<sup>3</sup>/ton. La etapa de molienda, mayor consumidora de agua (8,919 m<sup>3</sup>/h), presenta oportunidades de ahorro sujetas a mejoras de control. La flotación colectiva, con 6,021 m<sup>3</sup>/h, requiere estudios comparativos entre líneas Rougher para evaluar el impacto en la recuperación de cobre al reducir el uso de agua. En la flotación selectiva, se detectó la falta de datos operacionales para caracterizar a detalle el proceso.