



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE ESTRATEGIA PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE AGUA DE
ESPESADORES DE RELAVE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

ANDRÉS JESÚS ARANEDA ROSELLO

PROFESOR GUÍA:
IVÁN BRAGA CALDERÓN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MANUEL ROJAS VALENZUELA
ENRIQUE JOFRÉ ROJAS

SANTIAGO DE CHILE

2023

ANÁLISIS Y PROPUESTA DE ESTRATEGIA PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE AGUA DE ESPESADORES DE RELAVE

En este trabajo de título se investigó la forma de aumentar la recuperación de agua en los espesadores de relave de Minera Los Pelambres, ya que en este proceso se puede recuperar la mayor cantidad de este recurso. Además, al estar ubicados en la planta concentradora, el costo de volver a introducir el agua al proceso es bajo, comparado con traerla desde un punto más lejano. Es importante destacar que ocupar de manera eficiente el recurso hídrico aporta en los 5 aspectos relevantes de la estrategia de Antofagasta Minerals, que son las personas, seguridad y sustentabilidad, competitividad, crecimiento e innovación ([7]).

Para lograr proponer alternativas se revisó la información operacional desde enero hasta agosto del año 2020. Además, se revisaron las prácticas que tienen otras faenas en cuanto a la tecnología que se encuentra implementada en los espesadores de relave.

En un análisis detallado de la información, se concluyó que se deben mantener los torques entre 15% y 25% para el TK712, y entre 10% y 20% para el TK050 y TK051; calibrar y/o reemplazar flujómetros y densímetros de las descargas de los espesadores de relave; graduar compuerta de alimentación a espesadores, de manera que entregue el caudal ingresado; instalar válvulas en las descargas de los espesadores que permitan modular el flujo de descarga; colocar concreto en el piso de los espesadores TK050 y 051 para ajustar de mejor forma la altura de rastra y bajar la rastra hasta 0% de altura idealmente o lo que más se pueda, de modo que se compacte el relave. Se descarta realizar modificaciones estructurales del espesador, como repotenciar motores, ya que para hacer esto hay que ajustarse a la norma sísmica del año 2010, NCh2369, lo que implicaría hacer modificaciones con un costo que no se justifica.

La concentración en peso del relave entre enero y agosto de 2020 fue de un 60,2%. Llevando a cabo la primera recomendación descrita en el párrafo anterior, se estimó que se puede incrementar hasta 61,2%, situación que implica un ahorro por año aproximado de 714.450 dólares, solo operando eficientemente. Si se realizan los demás ajustes mencionados, se espera obtener un sólido del 62,2%, lo que resultaría en un ahorro de más de 1.200.000 m³ de agua anualmente, basado en los datos de tratamiento del año 2019. Esto se traduciría en un ahorro estimado de 1.428.900 dólares en consumo energético, además de reducir las pérdidas por evaporación al no enviar el agua al tranque.

Esto no solo ocasiona que exista un ahorro económico, sino que también se recuperaría más agua en el proceso, lo que ayudaría a consumir menos agua fresca hasta que no se construya la planta desaladora. De esta forma, se podría ayudar a las comunidades (uno de los principales stakeholders de la minera) para que dispongan de una mayor cantidad de este recurso y puedan sobrellevar la sequía que hay en la Región de Coquimbo. Por consiguiente, se podría renovar la Licencia Social para Operar a la minera.

Además, cabe destacar que este estudio y sus resultados se pueden replicar en otras faenas, logrando ahorrar un porcentaje importante de agua y energía en transporte. Si se aplicara en todas las mineras de Chile, se podría generar un beneficio muy importante a nivel país. Considerando que el 76,4% del agua ocupada en minería el 2019 es recirculada (lo que corresponde a 53,32 m³/s), el aumento de un 1% el porcentaje de agua recirculada provocaría un alza de más de 0,5 m³/s ([10]).

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
2. Objetivos y alcance	4
2.1. Objetivo General.....	4
2.2. Objetivos Específicos	4
2.3. Alcances	4
3. Metodología	6
3.1. Metodología para alternativas de implementación	6
3.2. Metodología para cambios en la operación	6
4. Marco Conceptual	8
4.1. Descripción operación Minera Los Pelambres	8
4.2. Teoría de espesamiento de relaves	15
4.3. Estrategia de operación de espesadores de relaves de Minera Los Pelambres.....	25
4.4. Instrumentación asociada.....	26
4.5. Componente estratégica	35
4.6. Gestión del cambio	36
4.7. Evaluación económico-financiera	38
5. Mejores prácticas en la industria	42
5.1. Mejores estrategias operacionales.....	42
5.1.1. Estrategia de alimentación y descarga	43
5.2. Instrumentos utilizados para control de parámetros.....	44
5.3. Automatizar la operación	45
6. Selección de estrategia	47
6.1. Implementaciones recomendadas	47
6.2. Estrategias operacionales recomendadas	47
7. Evaluación económica de alternativas.....	58
7.1. Instalación de válvula reguladora de flujo	58
7.2. Instalación cortador de muestra.....	59
7.3. Calibración flujómetros.....	59
7.4. Cambio flujómetros	59
7.5. Calibración densímetros	60
7.6. Graduar compuerta de alimentación	60

7.7. Evaluación económica pesimista, esperada y optimista	60
8. Recomendaciones y consideraciones	65
9. Conclusiones	67
10. Bibliografía	69
Anexos	70

Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama de flujo proceso Minera Los Pelambres	8
Figura 2: Diagrama de flujo desde mina a chancado	9
Figura 3: Diagrama de flujo de molienda	10
Figura 4: Diagrama de flujo de flotación	11
Figura 5: Diagrama de flujo espesadores y sistema de transporte de relaves	12
Figura 6: Diagrama de flujo sistema de transporte de relaves y recuperación de agua desde tranque	13
Figura 7: Diagrama de flujo planta de molibdeno.....	14
Figura 8: Diagrama de flujo puerto Punta Chungo.....	14
Figura 9: Espesador de puente y sus distintas partes	16
Figura 10: Espesador de columna y sus distintas partes.....	18
Figura 11: Espesador de tracción periférica y sus distintas partes	19
Figura 12: Espesador convencional.....	20
Figura 13: Espesadores High Rate	21
Figura 14: Espesadores de alta densidad	21
Figura 15: Espesadores de pasta.....	23
Figura 16: Clarificadores.....	24
Figura 17: Flujómetro Sonartrac.	27
Figura 18: Sensor de nivel Pyramid Eye.	27
Figura 19: Sensor de nivel de interfase DPS300 InterRanger Milltronics.	28
Figura 20: Celda de carga Transducer Techniques.....	29
Figura 21: PIT de TK712 para medir camada.....	30
Figura 22: Sensor de nivel de altura de rastra PT8420 Celesco.	31
Figura 23: Densímetro FMG60.	32
Figura 24: Controlador SC200 HACH.	33
Figura 25: Switch de nivel Endress and Hauser modelo 11362Z.	34
Figura 26: Switch torque HoneyWell 1LS19.	34
Figura 27: Switch altura de rastra: Se ocupa el switch HoneyWell 1LS58.	35
Figura 30: Cp mayor a 62% obtenido entre enero y agosto de 2020.	48
Figura 31: Relave en la entrada y descarga de espesadores de relave en tms.....	50
Figura 32: Diferencia absoluta entre la entrada y la descarga de espesadores de relave.....	51
Figura 33: Torque de espesadores cuando Cp es mayor a 62%.....	52
Figura 34: Torque dentro de parámetros si Cp es mayor a 62%.....	53
Figura 35: Torque dentro de parámetros si Cp es mayor a 62% y Cp obtenido.	54
Figura 36: Floculante añadido versus descarga espesador TK050.....	55
Figura 37: Floculante añadido versus descarga de espesador TK051.....	56
Figura 38: Floculante añadido versus descarga de espesador TK712.....	56
Figura 39: Gráfico de sólidos obtenidos durante pruebas intentando mantener torques recomendados.....	57
Figura 29: Costo válvula de dardo 20", según cotización.....	59

Índice de Tablas

Tabla 1: Cuadro comparativo operacional de espesadores.....	24
Tabla 2: Sólido y flujo de alimentación, descarga y recuperación de agua espesadores de relave	26
Tabla 3: Características espesadores de relave	26
Tabla 4: Rangos operacionales espesadores de relave.....	26
Tabla 5: Tabla de capacidad por fase planta desaladora de Los Vilos	39
Tabla 6: Tabla costo de operación de planta desaladora de Los Vilos.....	39
Tabla 7: Tabla costo de operación de bombeo hacia planta concentradora desde desaladora de Los Vilos.....	40
Tabla 8: Tabla costo total de suministro de agua desde desaladora de Los Vilos a planta concentradora.....	40
Tabla 9: Tabla Espesadores utilizados en las principales faenas de Chile.....	42
Tabla 10: Tabla configuraciones de flujo de descarga posibles en espesadores de relave (los flujos son aproximados, ya que variarán de acuerdo a la concentración en peso del relave y las características reológicas de éste).	44
Tabla 11: Costos por ítem de proyectos a implementar.....	61
Tabla 12: Flujo de caja escenario pesimista.....	61
Tabla 13: VAN, TIR y ROI, con tasa de descuento de 10%, escenario pesimista.....	61
Tabla 14: Flujo de caja escenario esperado.	63
Tabla 15: VAN, TIR y ROI, con tasa de descuento de 10%, escenario esperado.....	63
Tabla 16: Flujo de caja escenario optimista.	64
Tabla 17: VAN, TIR y ROI, con tasa de descuento de 10%, escenario esperado.....	64

1. Introducción

Debido a la escasez hídrica alrededor del mundo, la minería está implementando una serie de medidas para poder seguir operando, tales como el uso de plantas desaladoras y el aumento en la recuperación de agua dentro de la operación. El compromiso es hacer el proceso más sustentable y uno de los principales desafíos en minería es el uso eficiente del agua. Por este motivo, se ha logrado disminuir un consumo del 33% del recurso hídrico en faenas. ([1])

Un desafío estratégico crucial radica en preservar la Licencia Social para Operar (LSO), la cual podría ser revocada por las autoridades nacionales competentes debido a la oposición de las comunidades locales cercanas a las operaciones mineras. Estas comunidades han sufrido los efectos de la sequía en los últimos períodos y demandan una reducción en el consumo de agua fresca por parte de la industria minera. Por lo tanto, resulta necesario encontrar soluciones que permitan operar de manera sostenible y mitigar los impactos sobre el suministro de agua de estas comunidades. Si bien la Dirección General de Aguas (DGA), aumentó las zonas de prohibición para extraer agua, hay casos en que las comunidades solicitan que las faenas no extraigan más agua fresca, ámbito que supone un riesgo a la renovación de la LSO. ([2]) Por lo tanto, es imprescindible que en el proceso minero se recupere la mayor cantidad de agua.

Por otro lado, desde una perspectiva operacional es necesario aumentar los niveles de la recuperación de agua, debido a que existe una tendencia en las actuales faenas que implica una disminución en las leyes de mineral extraído, situación que de acuerdo con análisis conlleva un aumento del consumo de este recurso hídrico en la operación. Según Cochilco, se espera un aumento del 12% de consumo de agua fresca para las mineras del país para el año 2029 producto de esta situación. ([3])

En el proceso minero, existen diversos procesos y sectores en los que no existe una gestión adecuada del recurso hídrico, donde incluso es posible perder el agua que se ocupa. Sin embargo, las mayores pérdidas en la industria ocurren generalmente debido a la evaporación en los tranques de relave. Por lo tanto, dada esta condición se debe evitar la mayor cantidad de agua posible a este punto, mediante por ejemplo un aumento en el porcentaje de sólido en los relaves. De esta forma, la pérdida de agua por evaporación disminuiría continuamente. Para hacer esto posible, diversos análisis proponen que se debe aumentar el sólido de descarga en los espesadores de relave y, por ende, aumentar la recuperación de agua en este punto.

En particular, en el caso de Minera Los Pelambres es crítico desarrollar lo anteriormente mencionado, ya que en la zona geográfica de la operación de faena se encuentra en una sequía que ha generado un impacto significativo y actualmente esta situación tiene expuesto a severas consecuencias a los agricultores y ganaderos de la zona. Por este motivo, la extracción de una menor cantidad de agua fresca de los ríos corresponde a un interés estratégico, junto con ser un gran aporte para la supervivencia de las comunidades, que son un importante stakeholder de las compañías mineras.

Además de lo mencionado anteriormente, la industria minera ha tenido que disminuir su capacidad de tratamiento en épocas de escases en el recurso hídrico recientemente, por lo que aumentar la recuperación de agua en el proceso, tendrá un directo impacto en la producción de concentrado de cobre, y, por consiguiente, en las ganancias de la compañía.

En esta faena del grupo Antofagasta Minerals Sociedad Anónima (AMSA) actualmente dispone de tres espesadores de relave High Rate, que logran un mejor sólido en la descarga que un espesador convencional. No obstante, a la fecha no se ha logrado entregar el sólido máximo que indica su capacidad de diseño de estos equipos, que corresponde a un 64% de concentración en peso. De acuerdo con las mediciones realizadas en la práctica, los espesadores de esta faena están logrando esporádicamente un 61% de sólido en peso en la descarga como máximo en su operación cotidiana, lo que significa una brecha de por lo menos 3 puntos porcentuales a mejorar en este parámetro. ([4]) Por lo tanto, existe la posibilidad de mejorar los resultados operacionales actuales y recuperar una mayor cantidad de agua, ámbito que implica una optimización a su vez un menor consumo de agua fresca.

Para realizar lo anteriormente indicado, en el presente documento de tesis se estudia, desarrolla y propone un método para mejorar la recuperación de agua de los espesadores de relave de operación en Minera Los Pelambres.

En el año 2019 se recirculó el 84,3% del agua en esta faena minera. En este mismo año, 1965,3 l/s fueron recuperados en promedio por el clarificador y los espesadores de relave, de los que 1822,7 l/s corresponden a lo recuperado sólo por estos últimos. Sin embargo, la proyección del presupuesto consideraba 2814,4 l/s promedio de recuperación, por lo que finalmente sólo se logró un 70% de cumplimiento en este ámbito operacional. Esto es provocado principalmente por una menor recuperación de agua en el proceso de espesamiento de relaves. El total de agua recuperada en los distintos procesos en el año 2019 fue de 3280,3 l/s en promedio, por lo que el 55,6% del agua recuperada corresponde al proceso de espesamiento de relaves. Esto indica que una mejora en este punto impacta en mayor medida que la de cualquier otro proceso en el que se recupere agua. ([4])

El consumo de agua fresca en 2019 fue de 610 l/s en promedio, por lo que un aumento en la recuperación de agua implica la extracción de menos agua de fuentes naturales y que las comunidades presentes en el valle puedan afrontar de mejor manera la sequía presente en la Región de Coquimbo ([4]). Esto impacta de manera positiva al generar una mejora en la relación de la ciudadanía con la minera en el uso de este recurso compartido.

Debido a que los espesadores corresponden al sector donde más se recupera agua y en el que además existe la distancia más corta para introducirla nuevamente al proceso, es muy relevante poder aumentar el sólido de descarga y así recuperar la mayor cantidad de agua posible. Además, realizar esta mejora permite un ahorro en el flujo bombeado que se traerá desde la planta desaladora, luego de que termine el proyecto de infraestructura complementaria. De acuerdo con un análisis se espera una reducción en cuanto a la energía que se ocupa para transportar este recurso 120 kilómetros de distancia y 1.600 metros en cota. ([4])

Cabe destacar que durante fines del año 2019 y comienzos del 2020 se ha visto restringida la capacidad de procesamiento de la planta, debido a la considerable disminución de la batimetría del tranque de relaves El Mauro. Esto es producto de la extracción de agua desde esta fuente, como forma de compensación por la menor captación que se ha tenido desde los ríos a raíz de la sequía presente en la zona ([4]). Como consecuencia de esto, se debe tener especial cuidado en que no se agote el agua de la laguna del tranque de relaves, antes de que se pueda recuperar su nivel con las lluvias. Por lo tanto, aumentar la recuperación de agua contribuye a garantizar el recurso hídrico, lo que provocaría poder subir la producción y no restringirla.

Es importante recalcar que ocupar de manera eficiente este recurso aporta en los 5 aspectos relevantes de la estrategia de Antofagasta Minerals, que son las personas, seguridad y sustentabilidad, competitividad, crecimiento e innovación ([7]).

2. Objetivos y alcance

Objetivo General

Proponer iniciativas para aumentar la recuperación de agua de los espesadores de relave de Minera Los Pelambres.

Objetivos Específicos

- Realizar análisis de la situación actual de los espesadores de relave de Minera Los Pelambres.
- Sugerir recomendaciones que mejoren recuperación de agua de los espesadores de relave de Minera Los Pelambres.
- Evaluar impacto de los resultados obtenidos, luego de la implementación de las recomendaciones seleccionadas.

Alcances

El presente trabajo de tesis consideró el análisis y propuesta de implementaciones o cambios en la tecnología existente, se revisó y propuso cambios en el modo de operación. Estas modificaciones son transversales a los turnos de trabajo, revisando las mejores prácticas que ocurren en cada uno de estos y otras que se encuentren de acuerdo con el diseño y resultados de otras faenas.

En este contexto se diseñó y evaluó un proyecto que busca sugerir implementaciones de instrumentación en los espesadores junto con ajustes en equipos ya existentes. El interés central, corresponde a optimizar el sólido en la descarga de los espesadores generando un procedimiento y propuestas de implementación tecnológica.

Cada propuesta de implementación fue evaluada económicamente, para lograr priorizar las mejoras y desechar alternativas no viables o de bajo beneficio. A su vez las propuestas diseñadas en el presente trabajo han sido respaldadas mediante los resultados obtenidos en ajustes de la operación de faena, los que han sido verificados en Minera Los Pelambres y quedaron respaldados en PI System.

El alcance del presente trabajo es proponer una o varias soluciones para aumentar la recuperación de agua en espesadores de relave de Minera Los Pelambres, luego de analizar la operación actual, y cuantificar el impacto que significa.

Otro alcance es la sugerencia de implementaciones que se deberían realizar, a través de análisis de mejores prácticas en la industria, recomendaciones de fabricantes y pruebas realizadas en los espesadores de relave de Minera Los Pelambres.

3. Metodología

En la metodología de diseño del presente trabajo se han establecido un estudio y un análisis empírico de la situación actual, donde se revisó tanto modificaciones en la forma de operar, como implementaciones, calibraciones o cambios de equipos desde una mirada financiera para una priorización de acciones además de posibles repotenciamientos de los equipos existentes.

Metodología para alternativas de implementación

Primero se realizó un levantamiento de los equipos que tienen asociados los espesadores de relaves en Minera Los Pelambres, lo que permitió identificar equipos que no estén funcionando adecuadamente mediante la determinación de variables principales. Junto con lo anterior, se analizaron los datos operacionales, para lograr identificar los parámetros óptimos de funcionamiento de los distintos equipos.

Se analizaron alternativas de implementaciones, calibraciones o cambios de equipos y otras adaptaciones que surgieran del análisis exploratorio, escogiendo aquellas que tuvieran un mayor impacto (para el caso específico de Minera Los Pelambres) a un menor costo, con el objeto de establecer un mecanismo de decisión de cuáles soluciones implementar en orden de prioridad.

Luego, se revisaron equipos que tuvieran asociados otros espesadores de relaves en distintas faenas y recomendaciones de fabricantes. Esto se realizó con el foco puesto en mejorar el sólido de descarga y la calidad del agua recuperada. Además, se analizaron los diversos parámetros entre los cuales deben operar los distintos equipos.

Finalmente se realizó un análisis financiero de las alternativas, para determinar la viabilidad de su implementación.

Metodología para cambios en la operación

Se comenzó realizando un diagnóstico y análisis de la información que está disponible en PI System, del año 2020, para relacionar los principales parámetros que se miden en los espesadores de relave de Minera Los Pelambres. En este apartado se estableció un proceso de balance, para revisar y determinar la relación entre el tonelaje de entrada y el tonelaje de salida de los espesadores.

Los cambios en la forma de operar se determinaron haciendo modificaciones con las que teóricamente se podrían lograr mejores resultados en la calidad de agua recuperada o en un aumento del sólido

de descarga. Estas propuestas de modificaciones para operar resultaron de un análisis previo de datos existentes junto con recomendaciones de especialistas en espesadores.

Luego, se realizó una comparación de los resultados obtenidos de PI System, para obtener las mejores prácticas y realizar recomendaciones, basadas en la obtención de mejores sólidos de descarga, para operar en distintos escenarios. Al consolidar la información se procedió a realizar recomendaciones de operación de espesadores para Minera Los Pelambres.

La gestión del cambio es muy importante al momento de realizar mejoras, tanto en la forma de operar, como en la implementación de tecnologías, ya que se deberán analizar los impactos que tendrán.

Minera Los Pelambres tiene una pauta para chequear la aplicación del cambio, como forma de evaluar los riesgos y revisar los posibles impactos negativos al momento de realizarlo. Luego, el documento de gestión del cambio deberá ser aprobado por la persona que sugiere la implementación, el superintendente y gerente del área.

4. Marco Conceptual

Descripción operación Minera Los Pelambres

Minera Los Pelambres se ubica en la comuna de Salamanca en la Región de Coquimbo. La mina está a 3100 m.s.n.m y la planta concentradora a 1600 m.s.n.m.

El proceso productivo se puede observar en el siguiente esquema:

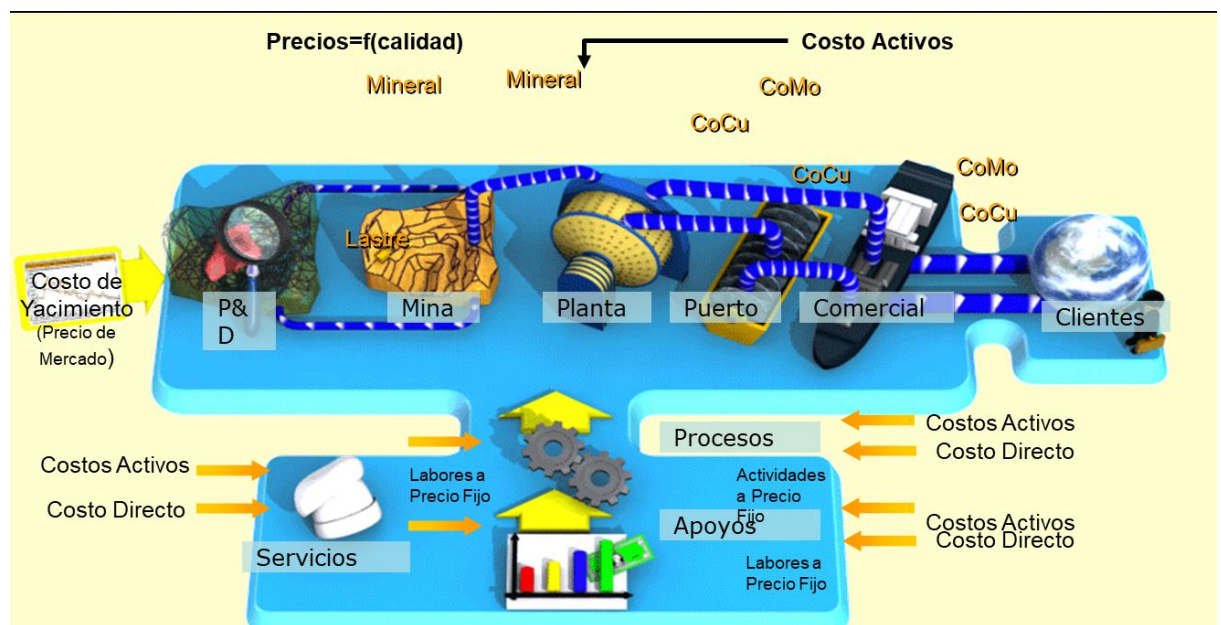


Figura 1: Diagrama de flujo proceso Minera Los Pelambres

La gerencia de planificación y desarrollo (P&D) se encarga de realizar un plan para extraer mineral de la mina. Luego, esta última sigue el plan y envía mineral chancado a través de correas a la planta concentradora, que se encarga de la molienda y flotación del mineral. Cabe destacar que en Minera Los Pelambres se obtiene como subproducto el molibdeno. Después, la planta envía el relave hacia el tranque El Mauro y el concentrado hacia el puerto de Los Vilos, donde es embarcado para su comercialización.

A continuación, se puede observar el diagrama de flujo de mina a chancado:

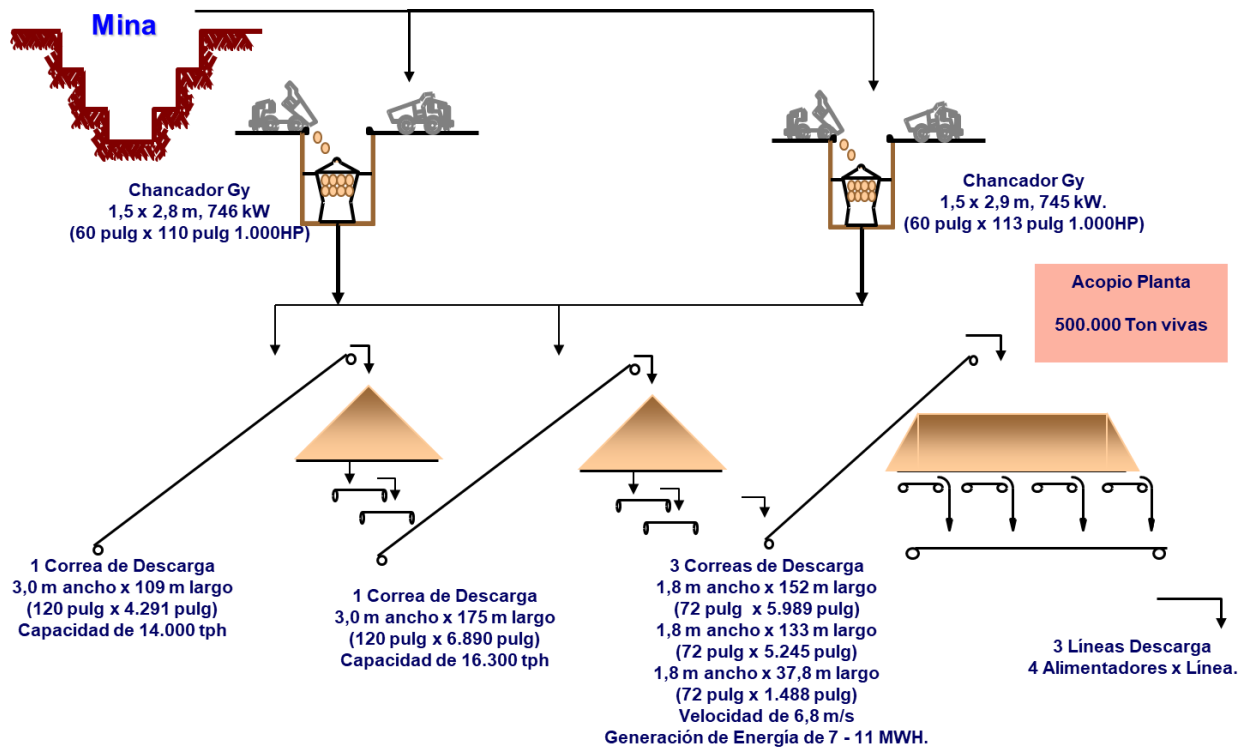


Figura 2: Diagrama de flujo desde mina a chancado

Luego de transportar el mineral, se procede a la molienda de acuerdo con el siguiente esquema:

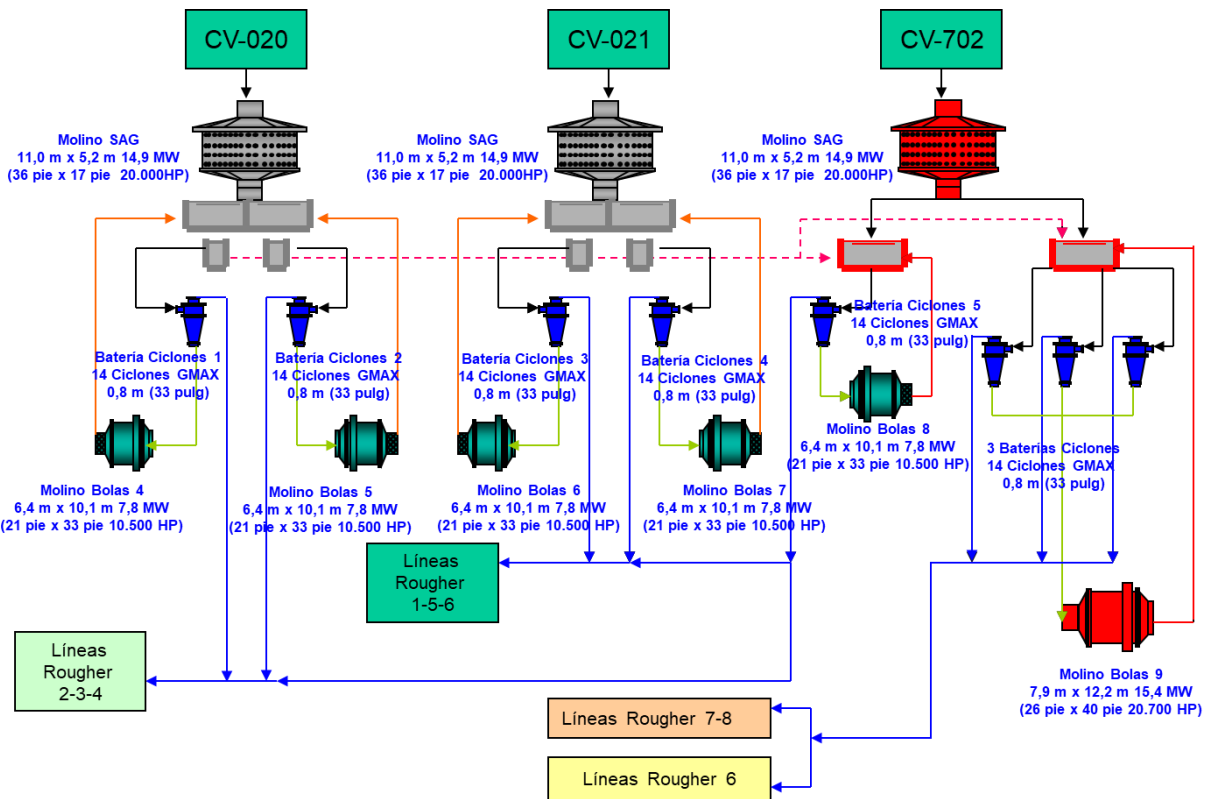


Figura 3: Diagrama de flujo de molinero

Finalizada la molinero, se procede a realizar la flotación del mineral de la siguiente forma:

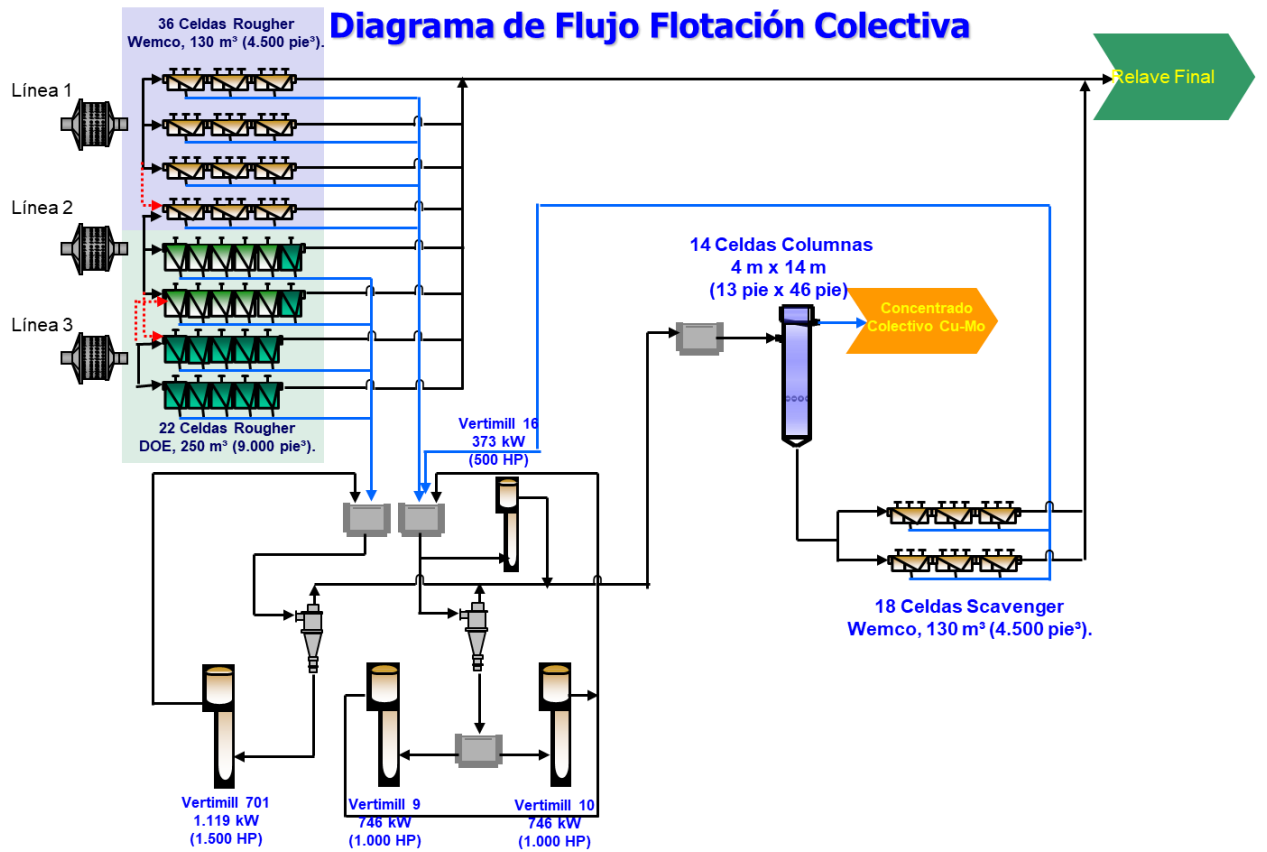


Figura 4: Diagrama de flujo de flotación

Como se puede ver, luego de la flotación se obtiene el relave y el concentrado colectivo de cobre y molibdeno. Con respecto al relave, este es espesado antes de enviar al tranque El Mauro de la siguiente forma:

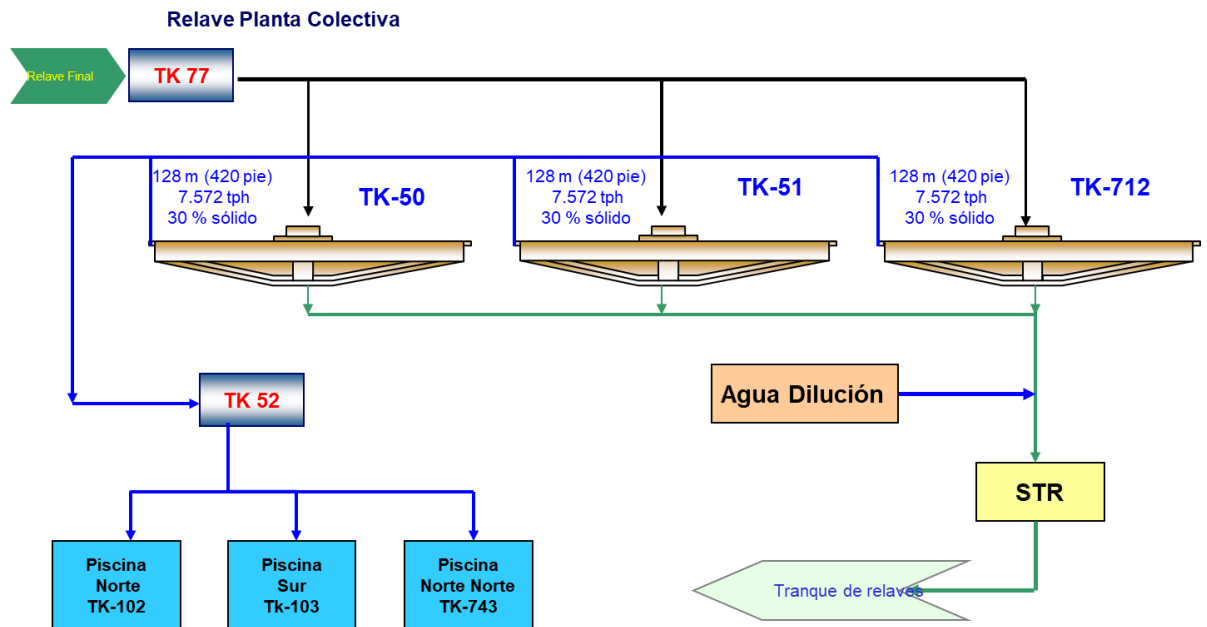


Figura 5: Diagrama de flujo espesadores y sistema de transporte de relaves

Finalmente, el relave es depositado en la cubeta del Tranque El Mauro. El agua contenida en este se recupera hacia la planta concentradora a través de bombeo, como se puede ver en el siguiente esquema:

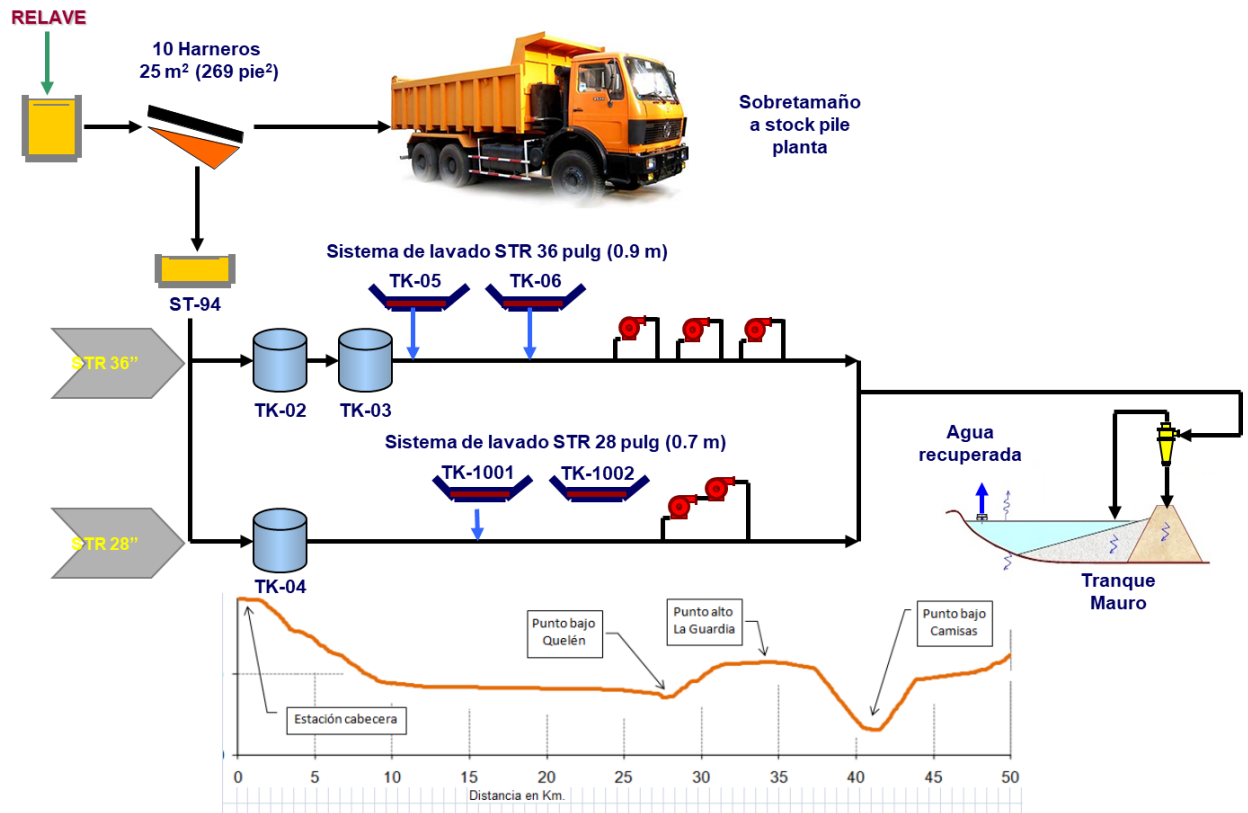


Figura 6: Diagrama de flujo sistema de transporte de relaves y recuperación de agua desde tranque

Con respecto al concentrado colectivo, este es procesado en la planta de molibdeno, logrando separar el concentrado de cobre y de molibdenita. El molibdeno se dispone en sacos para la venta, mientras que el concentrado de cobre es enviado a puerto a través de un Concentraducto. A continuación, se puede ver el diagrama anteriormente descrito:

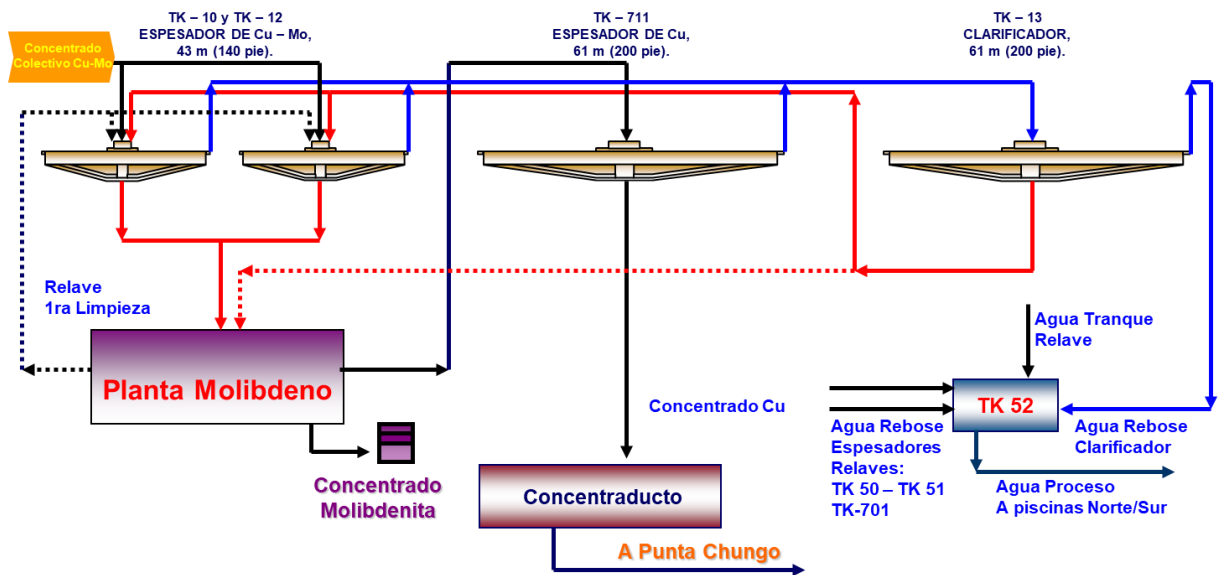


Figura 7: Diagrama de flujo planta de molibdeno

Finalmente, el concentrado de cobre es embarcado en el puerto de Punta Chungo, en Los Vilos, de acuerdo con el siguiente esquema:

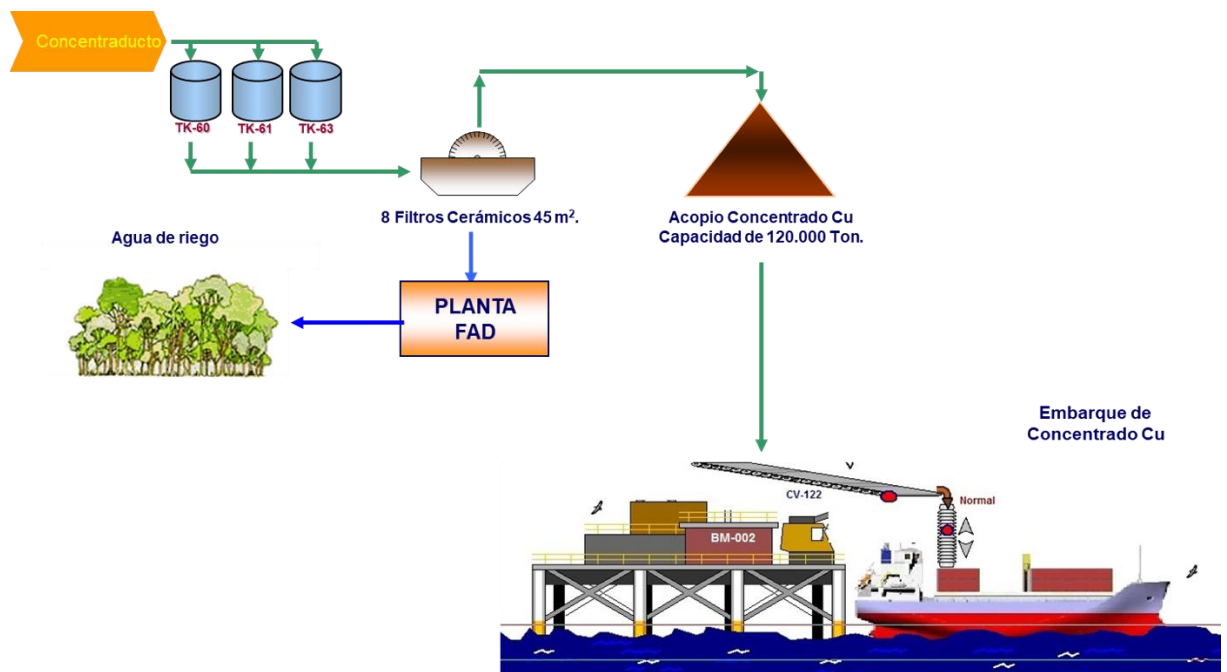


Figura 8: Diagrama de flujo puerto Punta Chungo

Cabe destacar que en este proceso se extrae el agua en la que viene diluido el concentrado y que luego se ocupa para riego de un bosque ubicado en Los Vilos.

Teoría de espesamiento de relaves

Existen dos métodos principales de separación de sólido-líquido ([5]). Estos son:

- **Sedimentación:** En este método se ocupa la gravedad para realizar la separación sólido-líquido, que, al ser una energía que no tiene costo y es limpia, hace que sea la forma más usada en la industria minera. Aquí se encuentran dos fenómenos distintos:
 - **Espesamiento:** Se basa en la sedimentación de las partículas para realizar la separación, la cual puede ser acelerada mediante el uso de floculantes. Existe una interfase sólido-líquido y lo que importa es el sólido de la descarga, más que la claridad del agua recuperada.
 - **Clarificación:** Se utiliza para pulpas con bajo contenido de sólidos (menor al 3%). Aquí no existe una interfase sólido-líquido y lo importante es lograr una alta claridad en el agua recuperada, sin importar el sólido de descarga.
- **Filtración:** En este método se utiliza un material poroso, a través del cual se hace la mezcla sólido-líquida gracias a la presión fluidoestática, por otra presión realizada a través de un dispositivo o por succión.

Debido a que en Minera Los Pelambres los relaves se espesan, al igual que en la mayoría de las mineras de cobre, se procederá a analizar este proceso.

Los conceptos básicos que se deben manejar en la sedimentación son:

- Área unitaria: Es el área de espesamiento requerida para procesar una tonelada de sólido. Es la cantidad de superficie dividido por las toneladas métricas por día que procesa el espesador ($m^2/TMPD$).
- Tasa de sedimentación: Es el recíproco del área unitaria. Son las toneladas métricas por día que pasan por el espesador dividido por el área ($TMPD/m^2$).
- Factor de torque K: Este factor sirve para comparar espesadores de distintas dimensiones. Se define como el torque dividido por el diámetro al cuadrado. Mientras mayor sea el factor K, más robusto será el espesador, por lo que existiría una menor tendencia a tener eventos de sobre torque o embanque.
- Tiempo de residencia: Es el tiempo que demoran los sólidos en decantar dentro del espesador hasta lograr el sólido deseado.
- Esfuerzo de corte: Es la energía necesaria para que la pulpa se mueva.

Existen varios tipos de espesadores, que se pueden dividir en tipos por estructuras y por operación ([6]). Estos son:

Clasificación Estructural

- Espesadores de Puente

- Espesadores de Columna
- Espesadores de Tracción Periférica

Clasificación Operacional

- Espesadores Convencionales
- Espesadores High Rate
- Espesadores Alta Densidad o High Density
- Espesadores de Pasta o Deep Cone
- Clarificadores

En una revisión de las características de los espesadores según su estructura se tiene lo siguiente:

Espesadores de Puente ([6])

En este tipo de espesadores un puente cruza todo el espesador y todo el mecanismo de accionamiento, eje y rastras cuelga de este. Además, se tienen las siguientes características:

- Diámetro de hasta 65m. (Es posible mayor diámetro)
- El drive (accionamiento de rastras) puede tener sistema de levante de rastras.
- El torque máximo para espesadores de puente es de 1.8 MLbs-ft.
- Pueden ser con estanque elevado o enterrado.
- Generalmente son usados para subir la concentración de sólidos de concentrados.

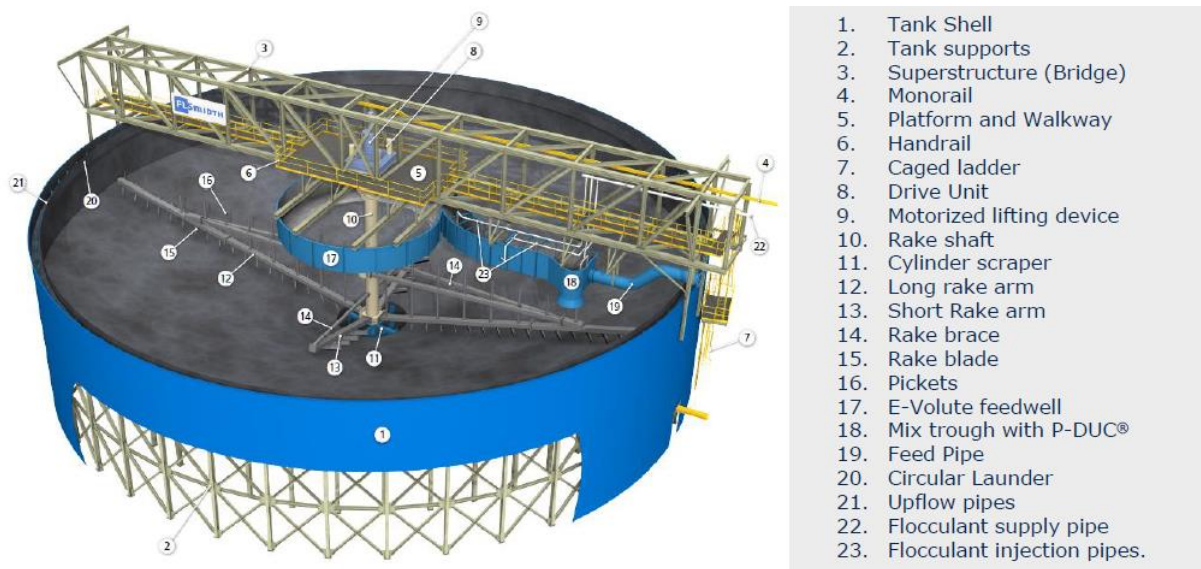


Figura 9: Espesador de puente y sus distintas partes

Espesadores de Columna ([6])

Estos espesadores tienen un puente que solo sirve de acceso al centro y para soportar la tubería de alimentación, por lo que mide el radio del estanque. La columna central se apoya en el centro, al fondo del estanque y aquí se apoya el drive o sistema de accionamiento de rastras. Este se conecta a través de una jaula a las rastras, para transmitir el movimiento. Además, se tienen las siguientes características:

- Diámetro hasta 130m. (Es posible mayor diámetro)
- El drive (accionamiento de rastras) puede tener sistema de levante de rastras.
- El torque máximo para espesadores de columna es de 10.0 MLbs-ft.
- Pueden ser con estanque elevado o enterrado, aunque generalmente son enterrados.
- Generalmente son usados en recuperación de agua desde relaves.

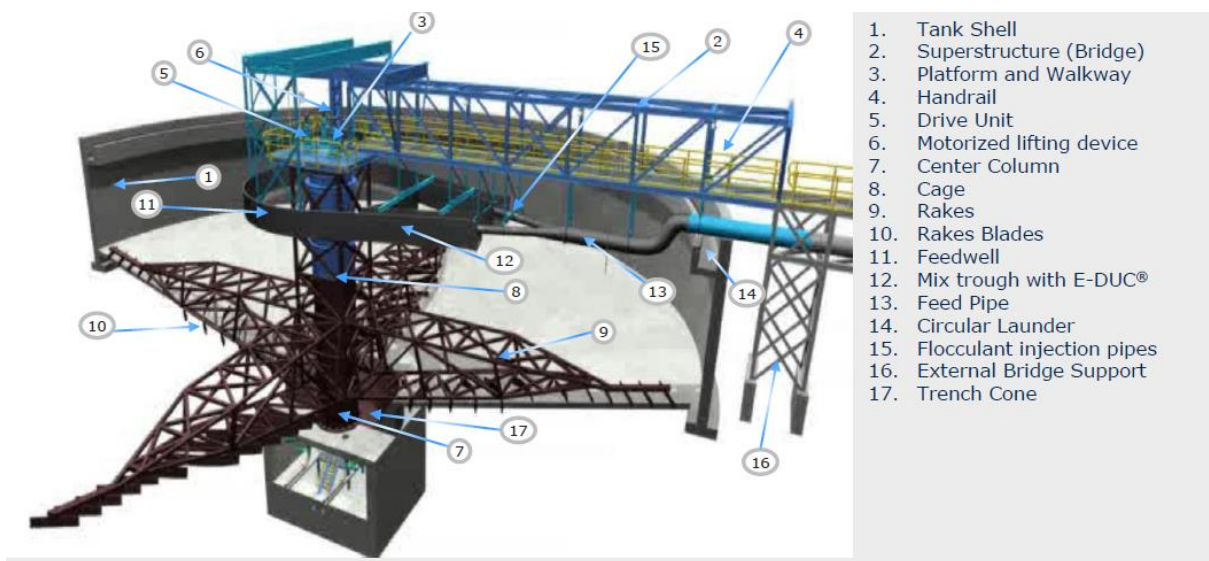


Figura 10: Espesador de columna y sus distintas partes

Espesadores de Tracción Periférica ([6])

El puente de estos espesadores es igual que en los de columna. La columna central también va apoyada al centro en el fondo, pero en este caso actúa como pivote de la rastra. Esta es movida por un carro que se apoya en el borde o fuera del espesador. Además, se tienen las siguientes características:

- Diámetro de hasta 130m (Es posible mayor diámetro)
- Estos espesadores no pueden tener sistema de levante de rastras.
- El torque máximo para espesadores de tracción periférica es de 10.0 MLbs-ft.
- Pueden ser con estanque elevado o enterrado, aunque generalmente son enterrados.
- Generalmente son usados en recuperación de agua desde relaves.

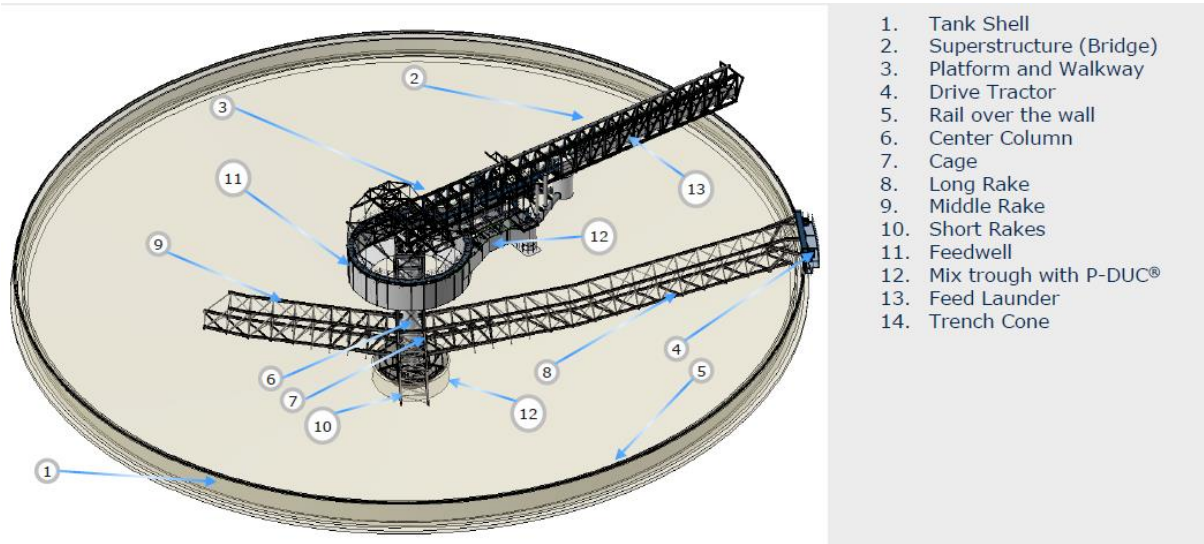


Figura 11: Espesador de tracción periférica y sus distintas partes

Si se revisan las características de los espesadores según su operación, se tiene lo siguiente:

Espesadores Convencionales ([6])

Los espesadores convencionales son equipos que no sirven para la separación sólido-líquido, pero ocupan el método más básico para realizar esto. Tienen las siguientes características:

- El principal parámetro de diseño es el área unitaria.
- La pulpa de alimentación no se diluye.
- Pueden usar o no floculante.
- No tienen restricción de diámetro o tipo de espesador.
- Por lo general, la mezcla de floculante –pulpa no está optimizada.
- Generalmente, usan $K < 50$, pendiente piso 2:12 y altura pared lateral menor a 3 metros.
- Alcanzan una descarga con un porcentaje de sólidos no muy alto (en comparación a otros tipos de espesadores).
- Generalmente usado en concentrados.



Figura 12: Espesador convencional

Espesadores High Rate o Alta Capacidad ([6])

Estos espesadores son como los convencionales, pero mejorados. Pueden diluir la pulpa de alimentación, ocupan menos floculante y logran pulpas con mayor porcentaje de sólido en la descarga. Tienen las siguientes características:

- La principal variable de diseño es el área unitaria y la dilución óptima.
- No tienen restricción de tipo de espesador, pero sí de diámetro en función del torque requerido.
- Son espesadores donde se maximiza el tratamiento de sólidos.
- La pulpa de alimentación se diluye a una concentración que maximiza el tratamiento.
- Deben usar floculante. La dosis comparada a espesadores convencionales es menor.
- Usan sistema de auto dilución (E-DUC) o Dilución Forzada (P-DUC) para optimizar el uso del floculante y la mezcla pulpa/floculante.
- Generalmente, usan $K < 50$, pendiente piso 2:12 y Altura pared lateral menor a 3 metros.
- Alcanzan una descarga con un porcentaje de sólidos alto.
- Generalmente usado en tratamiento de relaves.



Concentrate Thickener, 21m diameter
High Rate E-DUC® Auto Dilution System
Bridge Type
Elevated Tank



Tailings Thickener, 125m diameter
P-DUC® Forced Dilution System
Traction Thickener
On ground.

Figura 13: Espesadores High Rate

Espesadores de Alta Densidad o High Density ([6])

Estos espesadores son como los High Rate, pero alcanzan una mayor densidad en la descarga. Tienen las siguientes características:

- Las variables de diseño son el área unitaria, dilución óptima, tiempo de residencia y esfuerzo de corte en la descarga.
- Son espesadores donde se maximiza el tratamiento de sólidos y la densidad de la descarga.
- El diámetro máximo puede estar restringido por el torque requerido.
- Requieren mayor tiempo de residencia y más torque (por la alta densidad de la descarga), por lo que tienen una geometría con mayor pendiente y mayor pared lateral que un espesador High Rate.
- Entregan mayor densidad en la descarga que un espesador Convencional o High Rate.
- Generalmente, usan $K > 50$, pendiente piso 3:12 y altura pared lateral mayor a 3 metros.
- Muchas veces usan sistema de shear thinning para fluidizar la descarga y reducir el torque en el centro del espesador.
- Usan rastras de tipo tubular de bajo perfil.
- Generalmente usado en tratamiento de relaves.

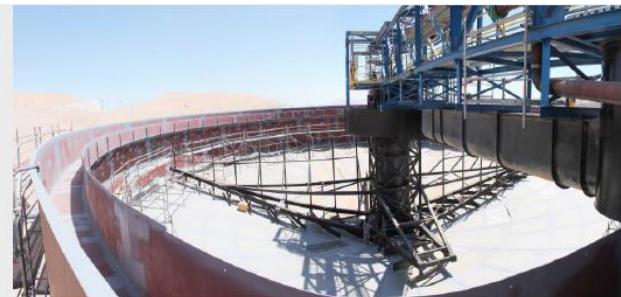


Figura 14: Espesadores de alta densidad

Espesadores de Pasta o Deep Cone ([6])

Estos espesadores son como los High Density, pero alcanzan una mayor densidad en la descarga incluso. Tienen las siguientes características:

- Las variables de diseño son el área unitaria, dilución óptima, tiempo de residencia y esfuerzo de corte en la descarga.
- Son espesadores donde se maximiza el tratamiento de sólidos y la densidad de la descarga.
- Pueden tener restricción de diámetro, dado por el torque disponible.
- Son espesadores de alta densidad, los cuales se han optimizado para entregar la mayor densidad de descarga posible de manejar.
- Requieren aun mayor tiempo de residencia y más torque (por la alta densidad de la descarga), que los espesadores de alta densidad. Tienen una geometría con mayor pendiente y mayor pared lateral que un espesador High Denisty.
- Generalmente, usan $K > 100$, pendiente piso 4:12 y altura pared lateral mayor a 3 metros.
- Usan sistema de shear thinning para fluidizar la descarga y reducir el torque en el centro del espesador.
- Usan rastras de tipo tubular de bajo perfil.
- Generalmente son usados en tratamiento de relaves.



Figura 15: Espesadores de pasta

Parámetros	Espesadores			
	Convencional	High Rate	High Density	Pasta
Dilución	No	Si	Si	Si
Floculante	No y Si (Bajo)	Si (Medio)	Si (Alto)	Si (Alto)
Pendiente Piso	4-9°	4-14°	14°	30°
Altura Pared Lateral	2.3 - 3.2m	3.2 - 4.0m	3.2 - 8.0m	3.2 - 12.0m
Factor K, Lbs-ft /ft ²	<30	30 - 50	> 50	>100
Tiempo Residencia, hr	1 - 10	2 - 6	2 - 12	2 - 24
Yield Stress, Pa	< 50	< 50	> 50	> 100
Shear Thinning	No	No	Si y No	Si
Diseño	Área Unitaria	Área Unitaria	Tasa de Sedimentación y Tiempo de Residencia	Tasa de Sedimentación y Tiempo de Residencia
Observaciones de Diseño	Espesadores Estándar	Usa Sistema E-DUC®/P-DUC®	Usa Sistema E-DUC®/P-DUC® torque alto y altura de pared alta	Su diámetro máximo esta limitado por el torque máximo a suministrar de modo de tener alto factor K

Tabla 1: Cuadro comparativo operacional de espesadores

Clarificadores ([6])

Los clarificadores son espesadores que no requieren un alto sólido en su descarga, sino una recuperación de agua lo más clara posible. Tienen las siguientes características:

- Las variables de diseño son la tasa de clarificación y el tiempo de residencia para alcanzar la claridad requerida.
- Son básicamente espesadores, pero diseñados para manejar un flujo de pulpa diluida, que no requieren grandes torques instalados.
- No tienen restricciones de tamaño.
- Generalmente, usan $K < 30$, pendiente piso 2:12 y altura pared lateral menor a 3 metros.
- Por lo general son usados para el tratamiento del agua de rebalse de espesadores de concentrado, entregando un agua clara y una descarga con concentraciones de sólidos no muy alta.
- Se pueden diseñar con mayor torque y sistemas de alimentación dual, de modo que, en casos de emergencia, reemplacen la operación de espesadores de concentrado.

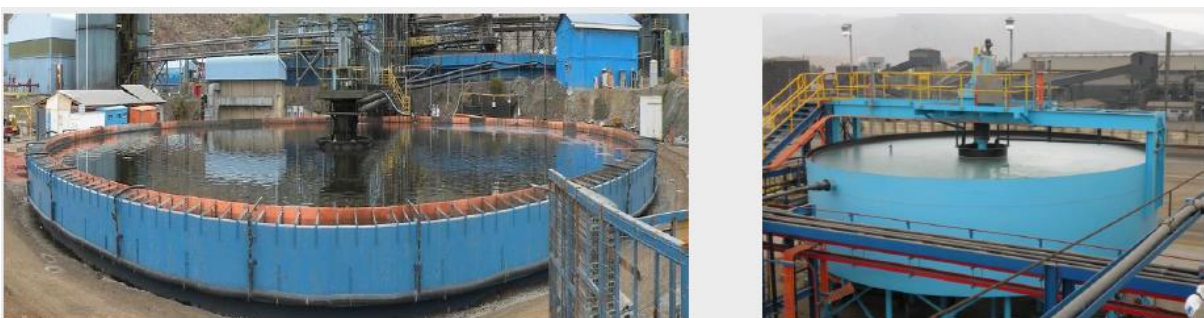


Figura 16: Clarificadores

A pesar de todas las diferencias se sigue la misma teoría, en la que es importante destacar lo siguiente:

- Las partículas finas demorarán más tiempo en sedimentar, lo que provocará que el área superficial aumente en la medida que la granulometría del relave sea menor.
- Otro punto importante es la forma de las partículas, ya que estas no son perfectamente esféricas y difieren unas de otras dependiendo de la naturaleza del mineral, por lo que provocarán variaciones en los tiempos de sedimentación.
- La superficie química de las partículas determinará el tipo de floculante que se deba utilizar en el espesamiento. Este reactivo puede ser aniónico, catiónico y no iónico.
- La concentración de sólido en la alimentación es un factor para considerar. En caso de que no se use floculante, será mejor alimentar con el mayor sólido posible el espesador. Pero, si se utiliza este reactivo, lo mejor será disminuir el porcentaje de sólido en la alimentación.
- Existen partículas muy finas, de tamaños menores a 10 micrones, llamadas sólidos coloidales. Como ya se mencionó, al ser finas la superficie específica será alta, lo que provoca que se produzca un efecto de dispersión en el líquido en vez de sedimentar.
- Si la viscosidad del líquido aumenta será más difícil separar la mezcla, lo que provocará una disminución en el sólido de descarga del espesador.
- Además, se debe destacar que la temperatura es inversamente proporcional a la viscosidad. Debido a esto un aumento en la temperatura produce que mejore la separación de la mezcla sólido-líquida.

Estrategia de operación de espesadores de relaves de Minera Los Pelambres

El último repotenciamiento que vivió Minera Los Pelambres fue pasar a procesar 175 mil toneladas por día. Debido a esto, se sumó un espesador más (TK712) a los dos existentes (TK050 y TK051), como forma de poder espesar el flujo de relave generado para este tratamiento de la planta concentradora.

Debido a que el tranque de relaves El Mauro queda a 60 kilómetros aproximadamente de la planta concentradora, y el transporte de relaves es vía canaleta y tubería, los espesadores no deben superar una densidad de 64% de concentración de sólido en peso en la descarga. De lo contrario, el relave no se podría transportar.

En el caso de Minera Los Pelambres, los espesadores tienen las siguientes características:

Total feed to 128m thickener	Feed rate		Underflow		Overflow	
	Balance	Design	Balance	Design	Balance	Design
Solids (%)	30	30	55	65		
Solids (tph)	3829	3550	2839,333	3550		

Flowrate (m3/h)	7720	9666,67	3414,3	3275,33	4333,3	6333,3
-----------------	------	---------	--------	---------	--------	--------

Tabla 2: Sólido y flujo de alimentación, descarga y recuperación de agua espesadores de relave

	TK050	TK051	TK712
Diámetro (m)	128	128	128
Altura pared lateral (m)	2,9	2,9	2,9
Atura en el centro (m)	10,4	10,4	10,4
Pendiente 2:12 (9.46°) / 1:12 (4.76°)	2:12 (9.46°) 1:12 (4.76°)	2:12 (9.46°) 1:12 (4.76°)	2:12 (9.46°) 1:12 (4.76°)
Sistema Dilución	E-Duc	E-Duc	E-Duc
Tratamiento (tmpd)	64.000	64.000	85.200
Área Unitaria (m2/TMPD)	0,2011	0,2011	0,151
Torque Max(lb-ft)	4.000.000	4.000.000	4.800.000
Factor K (lb/ft)	22,7	22,7	27,2

Tabla 3: Características espesadores de relave

Nivel de Agua Clara (m)	2 mínimo y 2,5 normal
Dosis de Floculane (g/ton)	3 mínimo, 5 normal y 10 máximo
Tonelaje de alimentación (tph)	mínimo 2000 y máximo 3550
Sólido en la descarga (% en peso)	55% a 64% según diseño
Flujo de descarga (m3/h)	El tratamiento ingresado debe ser igual al de salida
Torque (%)	Menor a 30% es normal

Tabla 4: Rangos operacionales espesadores de relave

Como se puede apreciar en las tablas anteriores, los espesadores de Minera Los Pelambres tienen un bajo factor K, un alto diámetro y una baja profundidad.

Cada espesador tiene cuatro descargas: una principal de 20" de diámetro con anillos de 14", una principal de 20" de diámetro con anillos de 13" y dos auxiliares de 12" de diámetro. Es importante mencionar que estas descargas están controladas por válvulas de cuchillo, lo que no permite regular de manera continua la descarga del espesador.

De acuerdo con esto, se adiciona floculante entre 3 y 10 gramos por tonelada, para así lograr el mayor sólido posible en la descarga. Además, se abren y cierran descargas hasta lograr el equilibrio deseado.

Instrumentación asociada

La instrumentación ocupada en los espesadores de relave de Minera Los Pelambres es la siguiente:

- Flujómetros en las descargas: Estos son de marca Sonartrac y ABB.



Figura 17: Flujómetro Sonartrac.

- Sensor de nivel canaleta de alimentación espesadores: Estos son Pyramid Eye 9300.



Figura 18: Sensor de nivel Pyramid Eye.

- Medición de nivel de interfase: Se ocupa el sensor DPS300 InterRanger Milltronics.



Figura 19: Sensor de nivel de interfase DPS300 InterRanger Milltronics.

- Celda de carga para medición de torque: Estas son de marca Transducer Techniques.



Figura 20: Celda de carga Transducer Techniques.

- Medición de camada TK712: Se realiza a través de un PIT (pressure indicator transmitter), colocado en el fondo del espesador.



Figura 21: PIT de TK712 para medir camada.

- Sensor de posición de altura de rastras: Se ocupa el sensor PT8420 Celesco en el TK712 y PT420 Celesco en TK050 y TK051.



Figura 22: Sensor de nivel de altura de rastra PT8420 Celesco.

- Densímetros en las descargas: Los densímetros son Endress+Hauser FMG60 y FSG60.



Figura 23: Densímetro FMG60.

- Turbidímetro: El controlador donde llega el turbidímetro y el sensor de nivel de interfase es el SC200 HACH.



Figura 24: Controlador SC200 HACH.

- Switch de nivel canaleta de recuperación de aguas: Los switch de nivel son marca Endress and Hauser, modelo 11362Z.



Figura 25: Switch de nivel Endress and Hauser modelo 11362Z.

- Switch alto torque: Se ocupa el switch HoneyWell 1LS19.

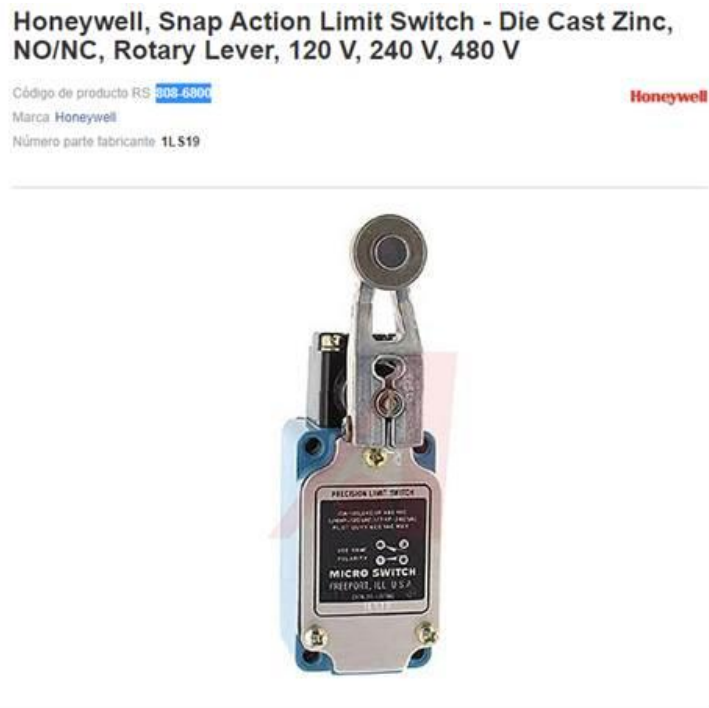


Figura 26: Switch torque HoneyWell 1LS19.

- Switch altura de rastra: Se ocupa el switch HoneyWell 1LS58.

Honeywell, Snap Action Limit Switch - Die Cast Zinc, NO/NC, Rotary Lever, 120 V, 240 V, 480 V

Código de producto RS: 808-6841

Marca: Honeywell

Número parte fabricante: 1LS58

Honeywell



Figura 27: Switch altura de rastra: Se ocupa el switch HoneyWell 1LS58.

Componente estratégica

Si se revisa la estrategia que declara Antofagasta Minerals ([7]), esta se centra en cinco aspectos relevantes, que son los siguientes:

- Personas
- Seguridad y sustentabilidad
- Competitividad
- Crecimiento
- Innovación

Debido a lo anterior, cabe mencionar que disminuir el consumo de agua fresca aporta en sustentabilidad, competitividad y crecimiento, al aplicar nuevas medidas para lograr un mejor aprovechamiento del agua.

Tanto para Minera Los Pelambres y como para las mineras en general es muy importante utilizar el agua de manera eficiente, ya que es un recurso limitado. Esto ha llevado incluso a restringir la operación en varias faenas, mermando sus operaciones e impactando en el apartado económico y financiero. Incluso

existen proyectos mineros en nuestro país que tienen una gran traba al ser económicamente viables, pero no contar con una buena fuente de agua en el sector en que están emplazados ha impedido iniciar el proyecto. ([8])

Además, ocupar eficientemente el agua ayuda a tener una mejor relación de la minera con las comunidades, quienes son uno de los principales stakeholders de la compañía. Esto debido a que en la Región de Coquimbo se está viviendo una sequía durante los últimos años, lo que ha llevado a que varias personas pierdan cultivos y ganado. Es importante destacar que, si continúa la escasez hídrica en la región, la licencia social para operar podría no ser renovada a Minera Los Pelambres , tal como ha ocurrido en otras ocasiones. Un ejemplo de esto es el caso de Pascua Lama.

En el caso anteriormente mencionado, la empresa Barrick Gold desarrolló el proyecto minero, el cual fue rechazado debido a la preocupación generalizada por sus graves impactos ambientales, entre ellos la contaminación del agua debido al uso intensivo de sustancias químicas tóxicas como el cianuro, así como la destrucción irreversible de los glaciares circundantes, considerados fuentes vitales de agua dulce. Además, se señalaron deficiencias en la gestión de residuos y en el monitoreo de los impactos ambientales. El rechazo también estuvo motivado por las inquietudes en relación con los efectos negativos en las comunidades locales, incluyendo la posible afectación de sus medios de vida, la falta de consulta adecuada y la falta de consentimiento informado. Se cuestionó la falta de cumplimiento de normas y regulaciones ambientales por parte de la empresa responsable del proyecto, así como la insuficiente supervisión y control estatal.

Estas preocupaciones ambientales y sociales llevaron a la paralización del proyecto y posteriormente a su rechazo por parte de las autoridades competentes ([11]), evidenciando la importancia de la protección del medio ambiente y el respeto a los derechos de las comunidades en la toma de decisiones en proyectos de esta naturaleza.

Además, se debe mencionar que si se recupera el agua en el sector de la planta concentradora, esto supondrá un menor gasto energético, además del menor gasto de agua, lo que posibilitaría que la operación sea más sustentable y con un menor impacto al medio ambiente.

Gestión del cambio

Es importante realizar un cambio en la forma de operar, enfocado a optimizar el consumo de agua fresca en la minería en general, debido a que la sequía en diversas zonas del país, sobre todo en lugares que se encuentran emplazadas la mayoría de las faenas, ha impactado fuertemente en las comunidades aledañas. Debido a que éstas son un importante stakeholder para las mineras y es importante tener un crecimiento sostenible junto a las personas que las componen, se hace indispensable optimizar el uso de agua. Si esto no se realiza, las compañías impactarían negativamente en las personas, que ya no tendrían suficiente agua, y en la sustentabilidad del negocio, que podría tener serios problemas en

renovar su licencia para operar (por el impacto en las comunidades). ([9]) Además, se vería perjudicada la producción, ya que la sequía provocaría la disminución del agua disponible, lo que genera restricciones que hoy son leves o no se tienen, pero que a futuro podrían provocar fuertes pérdidas.

La estrategia de Antofagasta Minerals incluye a las personas, la seguridad y sustentabilidad, competitividad, crecimiento e innovación, por lo que la gestión del cambio debe apuntar en resguardar estos ámbitos y potenciarlos con la disminución del consumo de agua fresca, a través del mejor aprovechamiento de las aguas. ([7])

Si no se realiza un cambio en la forma de operar de Minera Los Pelambres, se podría ver seriamente afectada su continuidad operacional, debido a la escasez hídrica de la zona, lo que también podría provocar el cierre de la minera si no es sustentable su operación para la comunidad.

Sin embargo, si bien la solución aporta a la mirada estratégica de Antofagasta Minerals, esta debe ser evaluada con respecto a todos los impactos que pueda tener. Generar un cambio en la operación de los espesadores de relave, a través de implementaciones tecnológicas o simplemente cambiando la forma de operar, podría generar tanto efectos deseados como otros adversos. Debido a esto, es importante visualizar las implicancias que puede tener un cambio. Para analizar el impacto en la operación, se puede separar en estos casos:

- Implementaciones tecnológicas: Éstas podrían ser calibrar y/o reemplazar flujómetros y densímetros de las descargas de los espesadores de relave, instalar válvulas en las descargas de los espesadores que permitan modular el flujo de descarga, colocar concreto en el piso de los espesadores TK050 y 051, repotenciar motores de giro de rastras e instalar un PIT para medir la camada en los espesadores TK050 y TK051 (TK712 ya posee esto). Realizar esto podría provocar pérdidas en la producción si se requiere utilizar el espesador que se necesita intervenir para realizar implementaciones tecnológicas, ya que se tendría menor capacidad para procesar los relaves, lo que provocaría tener un menor tratamiento de mineral. Minera Los Pelambres cuenta con 3 espesadores de relave y la mayor parte del tiempo opera con 1 o 2. Debido a lo anterior, implementar mejoras en el espesador que se encuentra standby no impactaría a la operación si se planifica durante los períodos en que no operen los 3 espesadores al mismo tiempo. Teniendo esta precaución, se reduce a cero la pérdida de producción por estar dejando fuera de servicio un espesador para realizar estas implementaciones.
- Cambios en la forma de operar: Éstas podrían operar en el rango de torques de los espesadores de relave de la manera de obtener el mayor sólido posible en la descarga, graduar la compuerta de alimentación de relave a los espesadores, de manera que se sepa el flujo y tonelaje ingresado, y operar con la rastra en 0% de altura o lo más bajo posible. Para encontrar la mejor forma de operar los espesadores de relave se deben realizar pruebas, las cuales podría generar menor o mayor recuperación de agua, dependiendo de los resultados. Solo la menor recuperación de agua impactaría de forma negativa, ya que se podría provocar una pérdida de producción por el requerimiento de agua de la planta concentradora. Para mitigar esto, se deben planificar las pruebas en períodos de tiempo en que se tenga la capacidad

de obtener más agua de la laguna del tranque de relaves El Mauro, para compensar la pérdida de recuperación de los espesadores recirculando más. Debido a lo anterior, lo mejor es probar los cambios que se requieran en una temporada distinta a verano, ya que en esta época del año la batimetría de la laguna se encuentra más baja.

Como se puede ver, tanto las implementaciones tecnológicas y los cambios en la forma de operar podrían provocar efectos adversos, lo que pueden ser totalmente mitigados si la instalación de las mejoras o las pruebas operacionales son correctamente planificadas, ya que en el primer caso siempre se puede tener un espesador de prueba y en el segundo se podría compensar la pérdida de agua con recirculación desde la laguna de Tranque El Mauro. Debido a lo anterior, la pérdida podría ser económica, al instalar algo que no funcione correctamente, y/o al necesitar un mayor consumo de energía debido a tener que obtener agua desde la laguna del tranque, ya que esto requiere bombeo a una cota superior. Estas pérdidas se provocarían de forma local, durante las pruebas o instalaciones, pero luego al encontrar la forma óptima de operar y realizar modificaciones que ayuden a esto, esta pérdida económica será ampliamente recuperada.

El indicador que será relevante para evaluar si el cambio implementado ha sido positivo es la concentración en peso del relave en la descarga del espesador, ya que está directamente relacionado con la recuperación de agua. Mientras este valor aumente la modificación será positiva y si disminuye se deberá volver atrás con la implementación o cambio en la forma de operar.

Para analizar los efectos adversos de un cambio Minera Los Pelambres ha desarrollado un formulario, a través del que se pueda aprobar la modificación de la manera más objetiva posible y conociendo los riesgos asociados. En éste se puede describir el cambio, identificar junto a sus objetivos, su fundamentación, alcances e inversión. También se deben evaluar los riesgos y los beneficios esperados. La aprobación deberá ser otorgada por un jefe de turno de transporte de fluidos, el superintendente y el gerente del área.

Cabe destacar que, en general, los cambios en la forma de operar o implementaciones que se pudieran realizar impactarían positivamente al proceso, pero de todas formas se debe tener la precaución en no impactar o mitigar algún efecto negativo que se tenga en algunas de las interrogantes planteadas en el documento.

La gestión del cambio deberá ser solicitada formalmente mediante el formulario de Administración del Cambio de Minera Los Pelambres, que se encuentra en los anexos.

Evaluación económico-financiera

La evaluación económico-financiera de las implementaciones se realizó calculando el VAN de los proyectos.

El beneficio será igual al costo de transportar agua desde la nueva planta desaladora que se encuentra en construcción en Los Vilos. Se calcula de esta forma debido a que Minera Los Pelambres está construyendo esta planta para poder conseguir más agua que actualmente no se encuentra disponible, por lo que el ahorro del recurso hídrico impactará directamente en bombear menos agua hacia la planta.

Además, habrá un beneficio asociado a las comunidades, debido a que existe una sequía en la Cuarta Región de Chile ([9]). Un menor consumo de agua ayudaría con sus cultivos y ganado.

Otro beneficio es tener una faena más sustentable, ya que generará un menor impacto al medio ambiente, gracias al menor consumo de agua y energía. A pesar de esto, en la evacuación económico-financiera sólo se cuantificó el beneficio expuesto en el párrafo anterior. Aun así no se debe perder de vista lo mencionado en este párrafo.

La planta desaladora se construirá en tres fases, logrando en la tercera etapa la capacidad máxima de 400 l/s, como se puede ver a continuación:

Phase	Capacity (l/s)	Daily Production at Maximum Capacity (m ³ /d)
Phase one	200	17.280
Phase two	300	25.920
Phase three	400	34.560

Tabla 5: Tabla de capacidad por fase planta desaladora de Los Vilos

Los costos, en dólares por metro cúbico, serán los siguientes:

Phase	Desalination Plant Capacity (l/s)	OPEX Annual Cost (kUSD)	Unit Cost (USD/m ³)
Phase one	200	4.887	0,77
Phase two	300	6.572	0,69
Phase three	400	8.236	0,65

Tabla 6: Tabla costo de operación de planta desaladora de Los Vilos.

Phase	Transfer Pumping Station Capacity (l/s)	OPEX Annual Cost (kUSD)	Unit Cost (USD/m ³)
Phase one	230	3.847	0,53
Phase two	330	5.457	0,52
Phase three	430	7.304	0,54

Tabla 7: Tabla costo de operación de bombeo hacia planta concentradora desde desaladora de Los Vilos.

Phase	Transfer Pumping Station Capacity (l/s)	OPEX Annual Cost (kUSD)	Unit Cost (USD/m ³) (see note 1)
Phase one	230	8.733	1,31
Phase two	330	12.029	1,22
Phase three	430	15.539	1,19

Tabla 8: Tabla costo total de suministro de agua desde desaladora de Los Vilos a planta concentradora

Debido a que es difícil saber con exactitud cuánta agua se ahorrará al momento de implementar un cambio en la operación o una alternativa tecnológica, se estimó este valor mediante juicio experto. Es importante destacar que cada 0,1% que se mejora el sólido en la descarga de los espesadores el año 2019, se habrían ahorrado 71.445 dólares aproximadamente, al costo de la planta desaladora (ver anexo A).

Además de comparar el VAN de los proyectos, se debieron tener en cuenta otros parámetros que ayudaran a tomar la decisión, tales como el ROI (Return on Investment) y el monto de la inversión. Este último parámetro es muy importante, ya que, de existir un monto tope para invertir, este se convierte en una limitante significativa, donde podría ser mejor realizar proyectos de un monto menor en lugar de uno solo que ocupe todo el capital disponible.

Otro punto importante son los riesgos de realizar la inversión en estos momentos. Hay 2 temas que podrían causar un cambio en las prioridades de realizar esta inversión. Éstos son:

- Recesión mundial: Si se provoca una recesión a nivel mundial se podría ver afectada la demanda de cobre, lo que provocaría que muchas mineras tengan que restringir su producción. Con respecto a esto, si se provoca, se podría detener la inversión en implementaciones tecnológicas, pero no en cambiar la forma de operar, ya que esto no tiene un costo extra, debido a que será realizado por personal interno de Minera Los Pelambres.
- Situación política de Chile: Se podría dar un escenario que afecte a la minería con respecto a la situación política, que podría colocar mayores limitantes a la operación. Si esto ocurre, no habría problemas con las mejoras que se proponen, ya que van enfocadas a ahorrar agua, lo que provocaría que la operación sea más sustentable. Lo único que podría provocar que el

proyecto no se pueda realizar es que las medidas que se quieran implementar a las mineras provoquen que éstas no puedan seguir operando, pero esto es prácticamente imposible, ya que históricamente se ha avanzado en torno a mejorar las condiciones de operación, pero no se han detenido las operaciones mineras, salvo en casos que se tengan problemas graves de cumplimiento de la ley.

Debido a lo anterior, se debe mencionar que podría haber escenarios que provoquen no realizar una inversión, pero no afectaría el cambio en la forma de operar. Estos casos no pueden ser controlados ni mitigados, pero tienen una probabilidad baja de ocurrencia, y en caso de que se plasme habría que detener la inversión solamente.

5. Mejores prácticas en la industria

A manera de optimizar la operación de los espesadores de relave de Minera Los Pelambres, proponer modificaciones y realizar una propuesta de automatización, se procedió a analizar las mejores prácticas en la industria.

Mejores estrategias operacionales

En la industria se ocupan en general tres tipos de espesadores de relaves:

- Espesadores High Rate
- Espesadores de Alta Densidad
- Espesadores de Pasta

Como se puede ver en el siguiente cuadro, los espesadores High Rate son los más usados en las principales faenas de nuestro país.

Cía. Minera / Proyecto	Tipo de Espesador	Aplicación	Sistema de Dilución	Diámetro, m	Nº de Espesadores
Proyecto Quebrada Blanca II (*)	High Rate	Relaves	E - DUC®	85	2
Cía. Minera Inés de Collahuasi	High Rate	Relaves	E - DUC®	60	2
Cía. Minera Inés de Collahuasi	High Rate	Relaves	P - DUC®	125	2
Cía. Minera Inés de Collahuasi (*)	Alta Densidad	Relaves	P - DUC®	125	1
Minera Escondida – Laguna Seca	High Rate	Relaves	E - DUC®	125	6
Minera Escondida – Los Colorados	High Rate	Relaves	E - DUC®	125	1
Minera Escondida – Coloso	High Rate	Concentrado	E - DUC®	52	1
Minera Escondida - Coloso	Alta Densidad	Concentrado	E - DUC®	51	1
Codelco-Div. Chuquicamata	High Rate	Relaves	E - DUC®	99	2
Codelco-Div. Chuquicamata (*)	High Rate	Relaves	E - DUC®	90	2
Codelco-Div. Chuquicamata (*)	High Rate	Efluentes	E - DUC®	16	1
Minera Centinela (Ex -Esperanza)	Alta Densidad	Relaves	E - DUC®	60	3
Fundición Alto Norte (*)	Pasta	Relaves	P - DUC®	13	1
Minera Caserones	Alta Densidad	Relaves	E - DUC®	45	3
Minera Coemín	Alta Densidad	Relaves	E - DUC®	22	1
ENAMI-Vallenar (*)	Alta Densidad	Relaves	E - DUC®	12	1
ENAMI-Delta	Pasta	Relaves	E - DUC®	12	1
Minera Los Pelambres	High Rate	Relaves	E - DUC®	128	3
Codelco-Div. Andina	High Rate	Relaves	E - DUC®	99	2
Codelco-Div. Andina	Alta Densidad	Relaves	E - DUC®	43	1
Minera Las Cenizas	Pasta	Relaves	P - DUC®	17	1
Anglo Chile - Los Bronces	High Rate	Mineral	E - DUC®	91	1
Anglo Chile - Confluencia	High Rate	Mineral	E - DUC®	90	2
Anglo Chile - Las Tórtolas	High Rate	Relaves	E - DUC®	125	1
Anglo Chile - Las Tórtolas	High Rate	Relaves	P - DUC®	100	1
Minera Florida	Pasta	Relaves	E - DUC®	17	1
Codelco-Div. El Teniente	High Rate	Relaves	E - DUC®	99	6
Codelco-Div. El Teniente	High Rate	Concentrado	E - DUC®	21	1
TOTAL					51

Tabla 9: Tabla Espesadores utilizados en las principales faenas de Chile

Se debe resaltar que los espesadores High Rate, como los que se ocupan en Minera Los Pelambres, tienen un tiempo menor en que se plasmen cambios en el sólido de descarga al hacer variaciones, en comparación con los espesadores convencionales.

Los espesadores de pasta se ocupan en faenas como Minera Centinela, donde las distancias de transporte al lugar de depósito de los relaves no son extensas y tienen una pendiente que permite realizar transporte de relaves a 70% de concentración en peso, por ejemplo.

En cuanto a la definición estratégica de la implementación de infraestructura, estas dependen mayormente de las características geográficas del lugar donde están emplazados los espesadores, las propiedades reológicas del relave y el sistema de transporte hasta el depósito de estos.

Cabe destacar, que los espesadores en general tienen un sistema automático de levante de rastras, que funciona al aumentar el torque. Esto se hace con la intención de proteger el espesador y evitar embanques.

De acuerdo con las opiniones de expertos, operacionalmente los espesadores de relave no tienen una automatización en su operación en las faenas más grandes de nuestro país. En general, todas las faenas tienen falencias en este proceso. Lo que se puede rescatar, según un experto consultado *“es la práctica de mantener la rastra lo más bajo posible, de manera que se compacte el relave lo que más se pueda”*, se permita el torque y así se pueda tener una adición de floculante óptima de acuerdo al tratamiento de la planta, que idealmente tenga un lazo de control para que se vaya ajustando en el tiempo.

5.1.1. Estrategia de alimentación y descarga

La alimentación y descarga de los espesadores de relave idealmente deberían ser moduladas continuamente, para así controlar de la mejor forma el flujo, tanto de entrada como de salida, y, por ende, el sólido de descarga del espesador.

En cuanto a la alimentación, en los espesadores de Minera Los Pelambres se tienen compuertas que se pueden regular, por lo que el flujo de alimentación puede ser modulado de manera continua. Debido a esto, no sería necesario realizar modificaciones. Revisando la descarga se tienen válvulas de cuchillo, por lo que el flujo sólo se puede modular de forma escalonada, teniendo las siguientes configuraciones:

Flujo [m ³ /h]
1200
2400
3000
4200
5400
6000
7200
8400

Tabla 10: Tabla configuraciones de flujo de descarga posibles en espesadores de relave (los flujos son aproximados, ya que variarán de acuerdo a la concentración en peso del relave y las características reológicas de éste).

Si bien existen configuraciones que entregan mayor flujo de descarga, en operación normal no es necesario llegar a más de 5400 m³/h. Dado lo anterior, se puede ver que los cambios de flujo son considerables y no existe la posibilidad de modular esto de manera continua. Es por esto que se requiere colocar válvulas que sean de regulación, lo que propone un experto consultado y que se ha implementado en otras faenas.

Existen varias alternativas de válvulas reguladoras de flujo en el mercado, como, por ejemplo, válvulas de bola, de diafragma, de mariposa o dardo. Dado que dentro del túnel en que se encuentran las cuatro válvulas de descarga de los espesadores de relave existe poco espacio, se debe implementar un tipo de válvula que sea fácil de mantener en espacios reducidos, además de ser resistente a la abrasión del relave. Por esto, la válvula de dardo es una excelente alternativa. La válvula pinch, en cambio, es difícil de implementar, ya que se tienen espacios reducidos y, por lo tanto, se producirían interferencias con las otras líneas de descarga al instalarla. Cabe destacar que la válvula de dardo tiene buena constructibilidad en el espacio disponible, además de buena disponibilidad y mantenibilidad.

Además, cabe mencionar que existen otras estrategias de dilución del relave o mayor torque de espesadores en la industria. Sin embargo, estas mejoras se descartan de implementar, ya que requieren modificaciones estructurales del espesador. Esto se debe a que, para realizarlas, hay que ajustarse a la norma sísmica del año 2010, NCh2369, lo que implicaría hacer tantas modificaciones que no se justificaría su costo.

Instrumentos utilizados para control de parámetros

La instrumentación que se ocupa en la industria minera para controlar los parámetros de los espesadores de relave es la siguiente ([6]):

- **Flujómetros en alimentación y descargas:** Los flujómetros que obtienen mejores resultados y son más fáciles de instalar son los sonares. Esto se debe a que pueden instalarse sin intervenir el ducto, ya que se colocan como abrazadera por fuera de la tubería.
- **Densímetros en alimentación y descargas:** Los densímetros nucleares son comúnmente ocupados en la industria.
- **Sensor de nivel canaleta de alimentación espesadores:** Sirve para monitorear la alimentación del espesador.
- **Medición de nivel de interfase:** Permite medir la altura a la que se encuentra la interfase sólido-líquido.

- Celda de carga para medición de torque: Esta medición permite monitorear la carga del espesador indirectamente o efectos operacionales no deseados, como la formación de islas.
- PIT para medición de camada: Si se conoce la camada del espesador, se puede conocer la carga que tiene éste. Esto refuerza la información que se puede obtener de la medición de torque.
- Sensor de posición de altura de rastras: Este sensor permite saber la altura de rastras, para conocer la posición de altura exacta de estas y registrar si se provoca alguna variación durante la operación.
- Turbidímetro en recuperación de agua: Esta medición ayuda a revisar la calidad del agua que está siendo recuperada. Esta no debe contener mucho sólido, ya que indicaría una mala operación del espesador.
- Switch de nivel, alto torque y altura de rastras: Estos switches se utilizan para alarmar en caso de llegar al rango máximo de alguna de las variables mencionadas.

Esta instrumentación ayuda a medir los parámetros antes descritos en tiempo real, para así monitorear la correcta operación de los espesadores en todo momento.

Si bien la instrumentación varía muy poco dentro de las distintas faenas de nuestro país, es importante destacar que esta debe estar calibrada adecuadamente, de manera que sea confiable y permita operar de forma óptima. Esto claramente no ocurre en Minera Los Pelambres, ya que, si bien se tienen todos los instrumentos anteriormente mencionados (menos la medición de camada en dos de sus espesadores), muchos de estos no están funcionando o se encuentran incorrectamente calibrados.

Automatizar la operación

Como se mencionó anteriormente, los espesadores tienen un sistema automático de levante de rastras ante valores de torque altos (en general valores sobre 50% de torque para que se produzca el alza de rastras). Esto es lo que se ocupa en la industria, pero no existe una automatización de la operación, a manera de optimizarla, sino que sólo por seguridad. Debido a esto, es importante explorar esta alternativa, ya que existe la posibilidad de ahorrar una cantidad significativa de agua.

Para hacer esto, hay que tener en consideración los siguientes aspectos:

- **Alimentación y descarga:** Estas deben poder modularse de manera continua, para lograr una estabilidad entre las toneladas métricas secas que entran y las que salen del espesador. Lo ideal es que entre la misma masa de relave que la que sale.
- **Altura de rastra:** Se debe ocupar la rastra lo más bajo posible (0% de altura idealmente). De esta manera, se logra la mayor compactación del relave y, por ende, el mayor sólido de descarga. Para ajustar el 0% de altura, lo ideal sería que los espesadores tuvieran concreto en el

piso. Así se puede notar de buena manera la diferencia del relave con el piso (con el espesador vacío), por lo que una recomendación sería realizar esto en el TK050 y 051, para dejarlos en el mismo estándar que el TK712.

- **Floculante:** La adición de floculante debe estar asociada al óptimo de gramos por tonelada de relave ingresada al espesador (se debe realizar un estudio para determinar este valor). Lo ideal es realizar un lazo de control que ajuste el flujo de floculante automáticamente, dependiendo del relave que ingresa.
- **Torque:** Se debe fijar un torque límite antes de aumentar la descarga y/o disminuir la alimentación del espesador. Si bien a un 50% de torque la rastra sube de manera automática, lo ideal es evitar llegar a este límite antes, para evitar daños en el espesador y embanques. De esta forma, la rastra permanecería lo más baja posible todo el tiempo y el torque se controlaría con el ingreso y la salida de la carga.

Configurando los puntos anteriormente mencionados y relacionándolos, se pretende realizar una automatización de la operación de las válvulas de alimentación, descarga, adición de floculante y altura de rastras como las variables que se regulan y el objetivo de esto sería obtener un sólido de descarga del espesador lo más cercano a 64% en concentración en peso. Ante cualquier desvío o problema en la operación automática estará el supervisor de sala de control, quien lo puede solucionar de manera manual.

Esta automatización es factible de realizar, conversando con el personal de control de procesos de la compañía, y no tendría riesgos de realizarla siempre que una persona este controlando de todas formas el proceso.

Determinando lo anteriormente mencionado, se podría realizar una automatización para poder obtener el óptimo de sólido en la descarga del espesador y así lograr la mayor recuperación de agua posible.

6. Selección de estrategia

De acuerdo al análisis realizado junto a un especialista en torno a las mejores prácticas de la industria, y en conjunto con los resultados obtenidos en la operación durante el año 2020 (hasta el mes de agosto), se seleccionaron las siguientes implementaciones y estrategias de operación.

Implementaciones recomendadas

A raíz del análisis realizado con un especialista en espesadores de FLS, las implementaciones que se recomendaron son las siguientes:

- Bajar la rastra lo más posible, hasta un 0% de nivel idealmente. Esto no tiene costo, ya que se puede realizar en una mantención mayor.
- Calibrar y/o reemplazar flujómetros y densímetros de la descarga del espesador, de manera que se tenga un control confiable. Lo mejor es calibrar, ya que se tendría un costo menor.
- Graduar la compuerta de alimentación a los espesadores, de forma que se obtenga el flujo de alimentación dependiendo del porcentaje de apertura.
- Instalar válvulas reguladoras de flujo en las descargas de los espesadores de relave. Idealmente podrían ser válvulas de dardo, pero también podrían ser válvulas pinch. Se recomienda colocar válvulas reguladoras al menos en una descarga principal (13" o 14" de diámetro) y en una auxiliar (12" de diámetro). Lo ideal sería colocar en las cuatro descargas que tiene cada espesador, pero cambiando las válvulas de cuchillo de las descargas mencionadas se lograría abarcar la mayoría de los escenarios.

Estrategias operacionales recomendadas

Para definir la mejor estrategia operacional de los espesadores de Minera Los Pelambres se analizaron los datos del año 2020 hasta el mes de agosto, obtenidos desde PI System, filtrando los mejores resultados que se han obtenido en este tiempo. Cabe destacar que se revisaron los datos correspondientes al 2020 debido a que durante ese año se obtuvieron los mejores resultados en cuanto a la concentración en sólido en peso (Cp) en los espesadores de relave.

Revisando los resultados promedio por hora de concentración de sólido en peso transportado al tranque, entre enero y agosto de 2020, se obtuvo el siguiente gráfico:

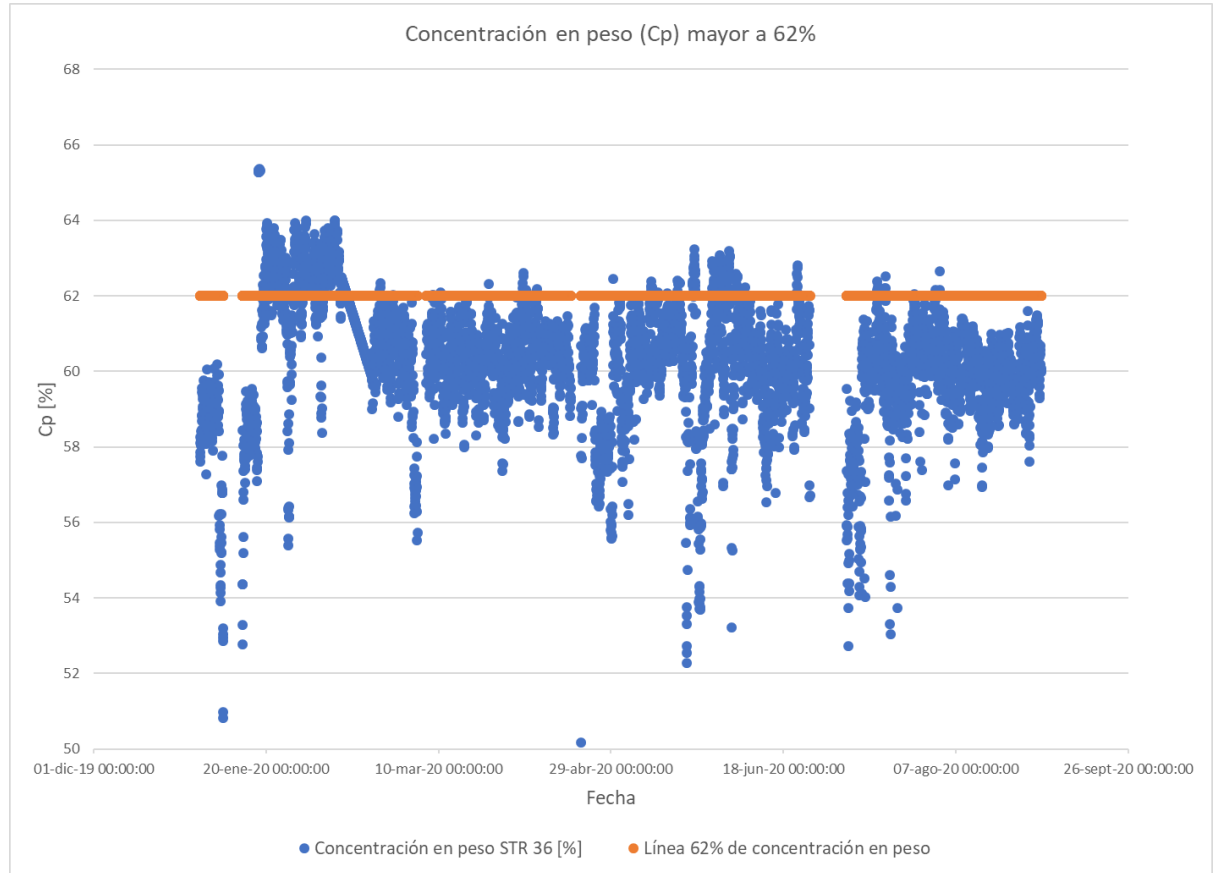


Figura 28: Cp mayor a 62% obtenido entre enero y agosto de 2020.

Se puede observar que hay momentos en que el sólido de transporte superó el 62% de Cp, por lo que se procedió a analizar los parámetros de los espesadores de relave estos días y el tonelaje de relave que ingresa y sale de estos.

Para poder calcular el tiempo que demora en llegar el relave desde los molinos SAG (donde se obtiene el tratamiento de planta húmedo) a los espesadores de relave, se realizó la siguiente estimación de tiempos, según mediciones realizadas por el área de metalurgia de la compañía:

- Tiempo de residencia molinos SAG: 7 minutos.
- Tiempo de residencia molinos bolas y batería de ciclones: 7 minutos.
- Tiempo de residencia celdas rougher: 22 minutos.
- Tiempo de residencia en el resto del proceso: 9 minutos.

Debido a lo anterior, el tiempo que demoraría el relave en llegar desde los molinos SAG a los espesadores de relave se estima en 45 minutos. Si a este valor se le suma 15 minutos en reaccionar en los espesadores, tiempo promedio medido por metalurgia, se tiene un tiempo de una hora de diferencia entre la producción del tonelaje húmedo en los molinos SAG y la descarga de los espesadores, por lo que

para realizar un balance de flujo másico entre la entrada y la salida del espesador se compararon las descargas versus la producción una hora antes en la planta.

Para obtener el relave de descarga de los espesadores en toneladas métricas secas (tms), se realizó el siguiente cálculo por cada descarga, considerando reales como valores de entrada el flujo y el Cp en la descarga:

$$Relave [tms] = \frac{Flujo \left[\frac{m^3}{h} \right]}{\left(\frac{100}{Cp[\%]} \right) - 1 + \left(\frac{1}{2,6} \right)}$$

El valor 2,6 corresponde a la gravedad específica del relave.

Cabe destacar que los espesadores tienen dos descargas de 12" de diámetro, una de 13" y otra de 14", y que los densímetros de las descargas de 12" de todos los espesadores se encuentran en mal estado. Por esto, el Cp en estas descargas se tomó del densímetro de Estación Cabecera, hacia donde el relave demora aproximadamente 30 minutos en llegar luego de la descarga de los espesadores. En consecuencia, se revisó el valor del densímetro 30 minutos después de tomado el flujo de descarga. Además, se filtraron valores erróneos de los flujómetros que en ocasiones marcan valores fuera de rango, como números negativos y outliers.

Debido a lo mencionado en el párrafo anterior, se sugiere realizar la calibración o cambio de todos los flujómetros y densímetros de las descargas de los espesadores de relave.

Luego de realizar el cálculo por cada descarga se sumaron todas estas, logrando obtener el relave total de salida en tms.

Para calcular el relave de entrada al espesador en tms se tomó el valor del tratamiento húmedo producido una hora antes en los molinos SAG, en toneladas por hora (tph). Luego, este tratamiento se multiplicó por 0,964 para poder obtener el tratamiento planta en tms (este factor se obtiene del cálculo realizado por metalurgia). Debido a que se debía obtener el relave en tms, se multiplicó el tratamiento por 0,979, ya que en el año 2019 se trató 61.145.371 tms y se produjo 1.284.138 tms de concentrado de cobre. Por lo tanto, la diferencia que corresponde al relave producido es un 97,9% del tratamiento.

Cabe destacar que, si bien se tienen compuertas de alimentación a los espesadores, estas están graduadas en cuanto al porcentaje de apertura, por lo que no se puede calcular el flujo de entrada directamente al espesador. Por lo anterior, se recomienda relacionar el porcentaje de apertura de las compuertas con el flujo.

Revisando el flujo másico de relave de los espesadores se obtuvo el siguiente gráfico:

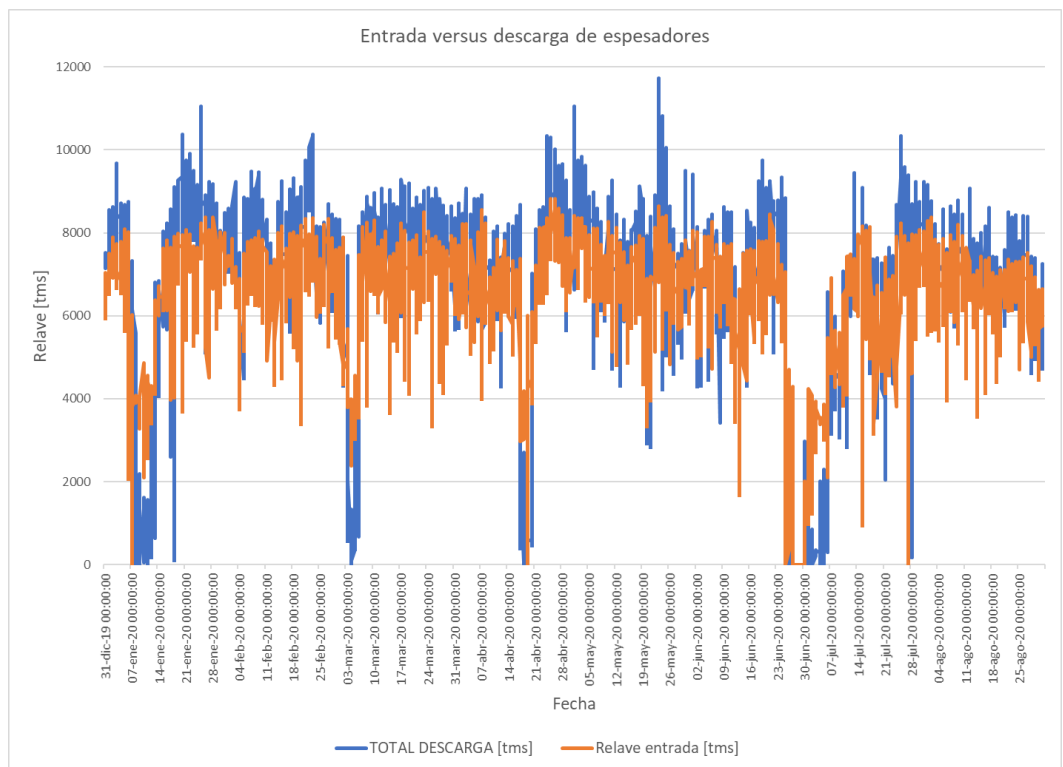


Figura 29: Relave en la entrada y descarga de espesadores de relave en tms.

Se puede observar que, si bien ambas tendencias son similares (por lo que el tiempo estimado entre la entrada y la salida del relave de los espesadores es correcto), hay diferencias entre los valores. Calculando la diferencia absoluta que existe entre la medición en la descarga y la entrada, se obtuvo el siguiente gráfico:

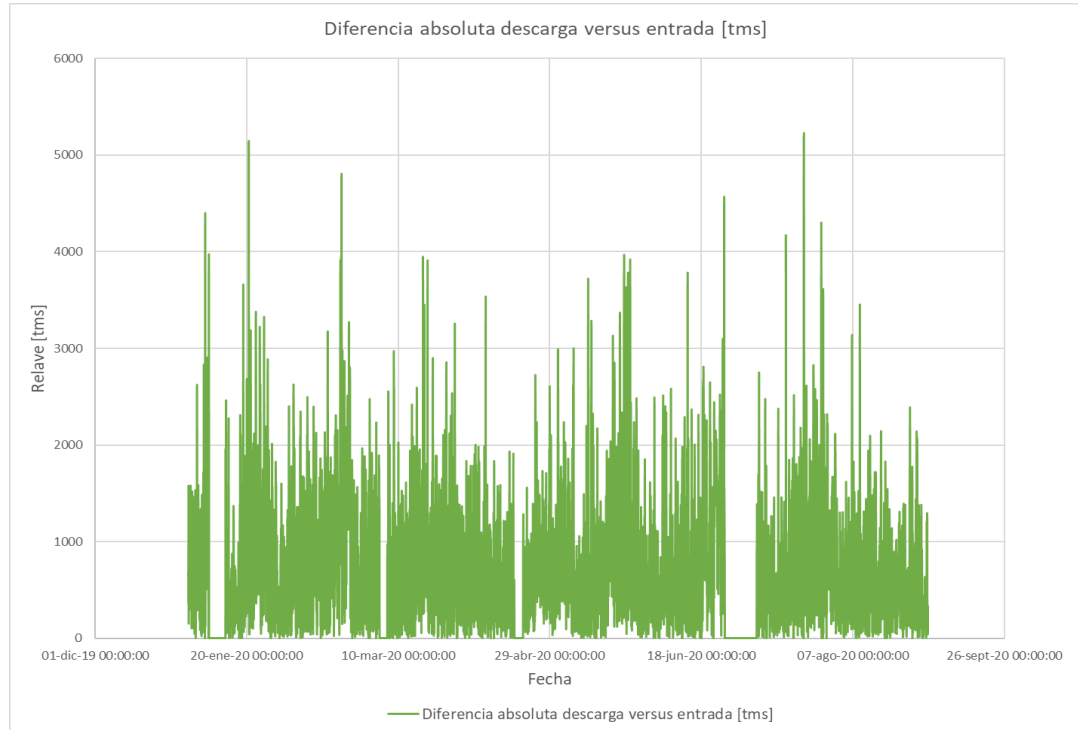


Figura 30: Diferencia absoluta entre la entrada y la descarga de espesadores de relave.

Como se puede ver, la diferencia entre las toneladas métricas secas (tms) de relave, medidos en la entrada del espesador y la descarga, varía incluso más de 5.000 tms en algunos casos, encontrándose en la mayoría de estos una diferencia entre 0 y 2.000 tms, con un promedio de 681 tms. Esto es bastante, ya que entraron en promedio 6520 tms, lo que significa un 10% de diferencia con respecto al tratamiento diario. Por lo tanto, la primera conclusión que se puede obtener es que se deben calibrar los instrumentos, de acuerdo con lo especificado en los planes de mantenimiento preventivo que tiene la gerencia de mantenimiento. Cabe mencionar que, si bien pueden existir diferencias entre la entrada y la salida del relave de los espesadores, estas se deberían mantener iguales si se toma un intervalo de tiempo superior a un turno de 12 horas, ya que en poco tiempo el espesador se cargaría o descargaría.

Con respecto al torque de los espesadores en los días en que se logró un Cp mayor o igual a 62%, se obtuvo el siguiente gráfico:

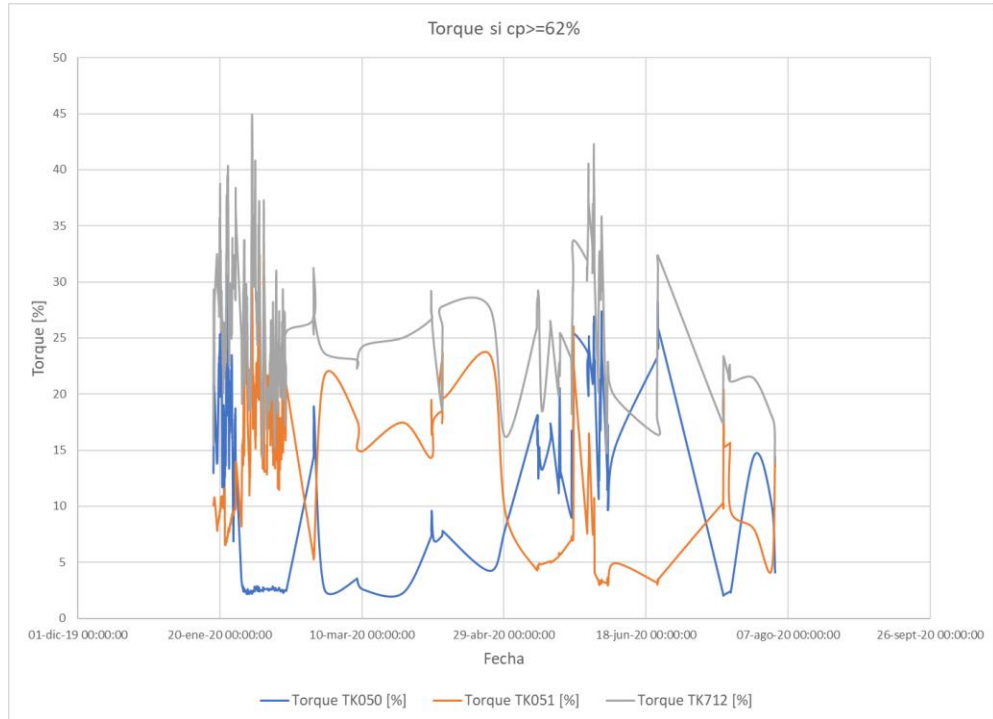


Figura 31: Torque de espesadores cuando Cp es mayor a 62%.

En este gráfico se puede observar que hay días en que se presentan valores altos de torque, lo que muestra que los espesadores se encontraban con bastante carga. Debido a esto, se filtrarán valores en que el torque supere valores de 20% para los espesadores TK050 y TK051, y 25% para el TK712 (se escogen estos parámetros, ya que, por experiencia, a un mayor torque los espesadores podrían tener complicaciones en su correcta operación). Haciendo esto, se obtuvo el siguiente gráfico, donde se cumplen las 3 condiciones anteriormente mencionadas:

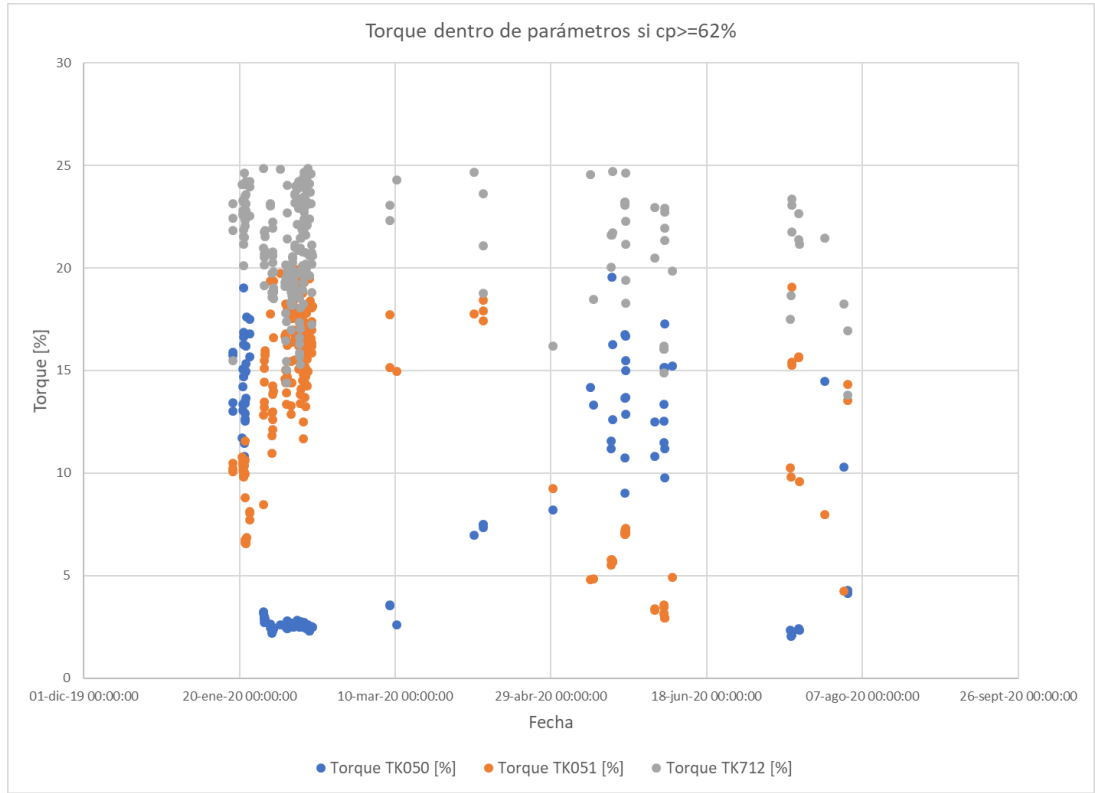


Figura 32: Torque dentro de parámetros si C_p es mayor a 62%.

Realizando el cruce de este gráfico con el C_p del relave en estas horas se obtuvo lo siguiente:

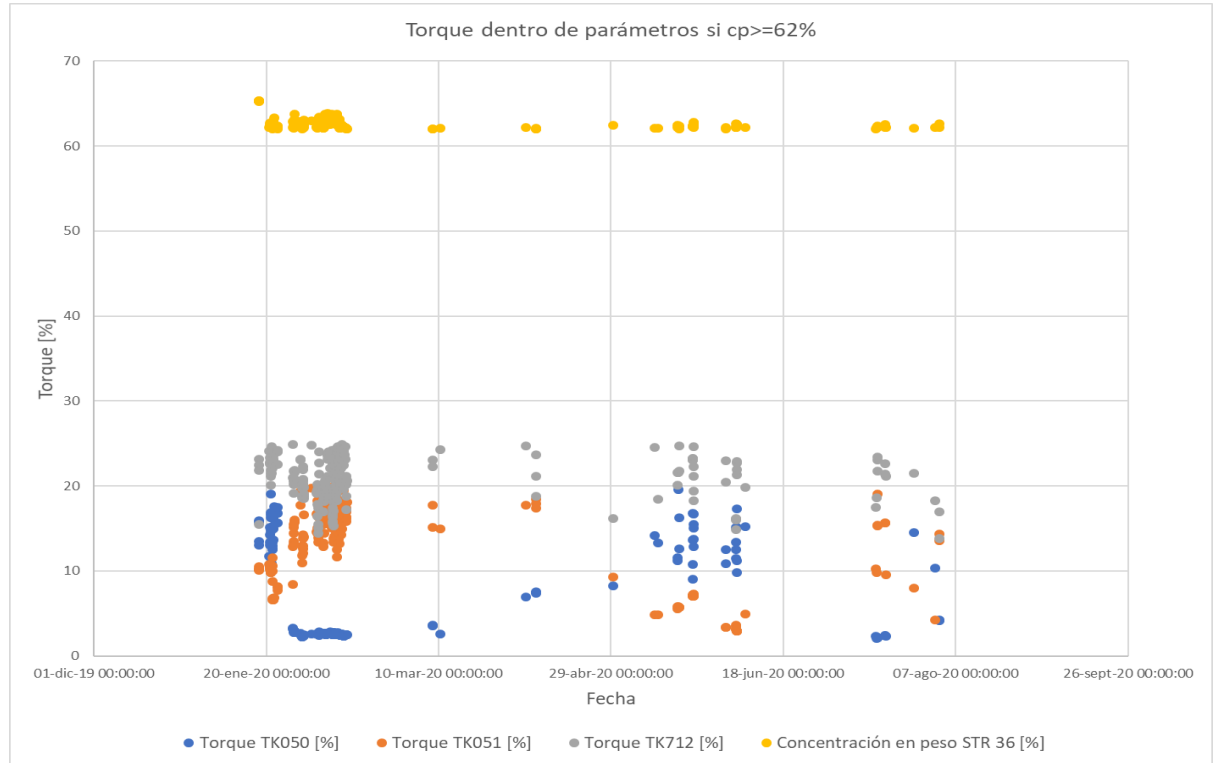


Figura 33: Torque dentro de parámetros si Cp es mayor a 62% y Cp obtenido.

Se puede ver en la primera parte del gráfico (mirando de izquierda a derecha) que se obtienen los mayores sólidos. Entre las 19 y las 22 horas del día 17 de enero de 2020 se obtuvieron sólidos mayores a 65%, pero se dio una situación que no es habitual revisando los datos: bajó el tratamiento planta y en los espesadores TK050 y TK712 se restringieron al máximo las descargas para soportar esta baja de tratamiento y que no bajara el sólido de descarga.

Mirando el resto del gráfico anterior, es posible observar que lo ideal es lograr un torque entre 15% y 25% para el TK712, y entre 10% y 20% para el TK050 y TK051, lo que está acorde a la recomendación del proveedor de operar bajo un 50% de torque.

Para poder operar de forma óptima, se ha realizado un análisis que contiene toda la información de los tres espesadores de relave (en cuanto al floculante añadido, torque, altura de rastra, apertura de alimentación, camada en el caso del espesador TK712, flujos de descarga, tratamiento de planta concentradora y concentración en peso del relave en la descarga), se debe filtrar de acuerdo a cualquiera de estos parámetros y realizar ajustes, para operar en un escenario en que se hayan tenido sólidos sobre 60% de concentración en peso en el relave de descarga de los espesadores, y sea similar al momento en que se está operando.

Del análisis realizado cabe destacar que la altura de las rastras estuvo siempre entre 17% y 18% de altura, por lo que sería interesante hacer bajar la rastra, para que se logre mayor compactación en el relave y, por ende, mayor sólido en la descarga, según recomendación del proveedor. Esto es mejor realizarlo

con el espesador vacío, ya que, si se realiza con este funcionando, será más complicado, debido a que el relave ya se encuentra compactado bajo la rastra.

Otro factor importante es el floculante añadido, por lo que se recomienda hacer pruebas con otros proveedores para así optar por la mejor alternativa entre costo y beneficio. Además, al revisar el floculante añadido versus el tonelaje descargado, se puede observar lo siguiente en los tres espesadores:

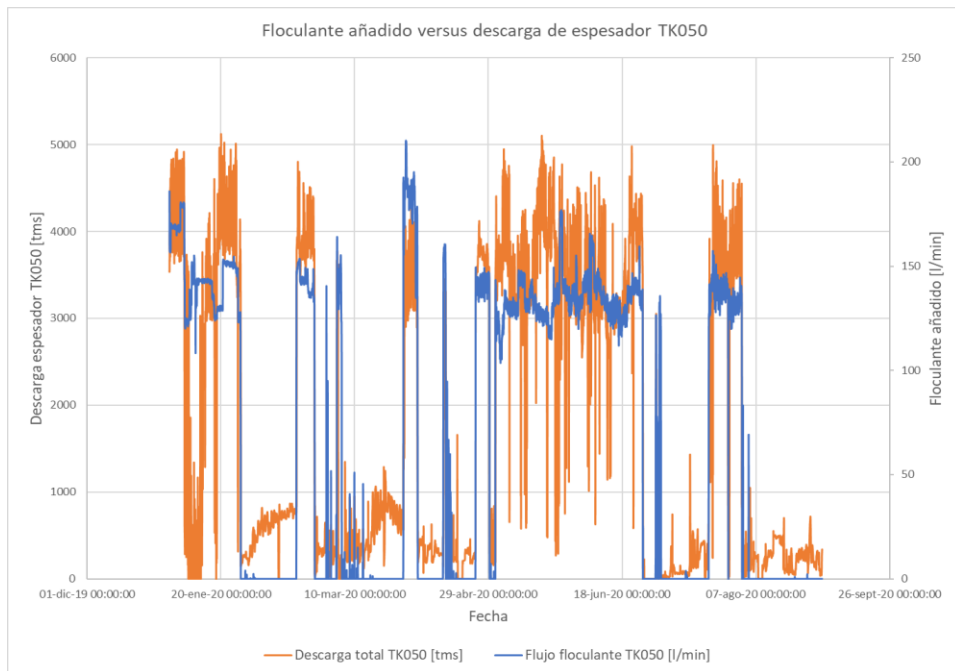


Figura 34: Floculante añadido versus descarga espesador TK050.

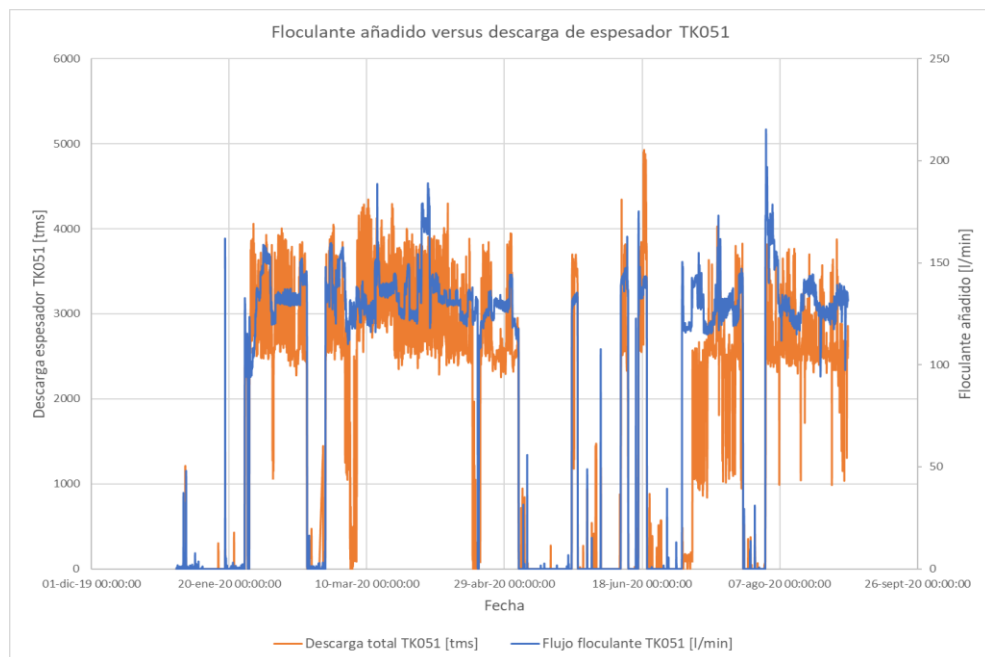


Figura 35: Floculante añadido versus descarga de espesador TK051

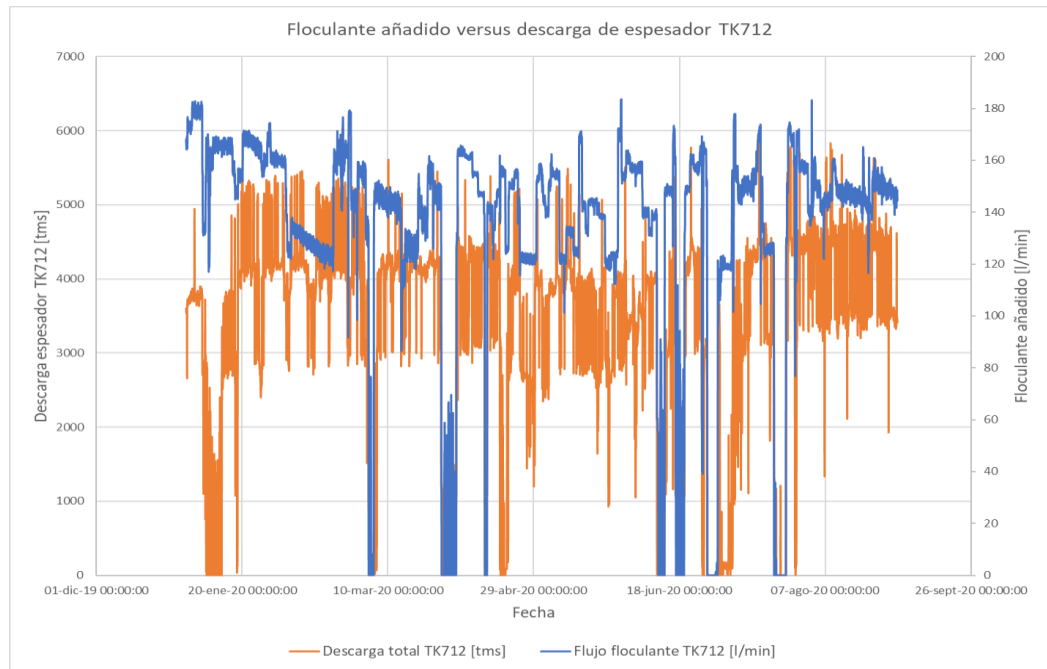


Figura 36: Floculante añadido versus descarga de espesador TK712

Se puede observar que, en los tres espaciadores, hay varios momentos en que el tonelaje varía y la adición de floculante no sigue esta tendencia. Esto se debe a que la velocidad de las bombas que suministran floculante se regula manualmente, por lo que, si el operador de sala de control no está constantemente variando la velocidad para añadir el floculante óptimo, ocurre lo que se ve en el gráfico. Para poder solucionar esto se puede generar un lazo de control que haga que varíe la adición de floculante según el tonelaje. Si se quiere obtener la relación óptima, habría que realizar pruebas para encontrar los gramos por tonelada que se deben añadir. Es importante destacar que esto va a depender del mineral, por lo que se recomienda un estudio del floculante que mejor funcione para Minera Los Pelambres y la relación óptima con el tonelaje.

Los días 26 y 27 de noviembre de 2020 se realizaron pruebas operando con los espesadores TK050, idealmente entre 10% y 20% de torque, y TK712, idealmente entre 15% y 25% de torque. Los resultados se pueden ver en el siguiente gráfico:

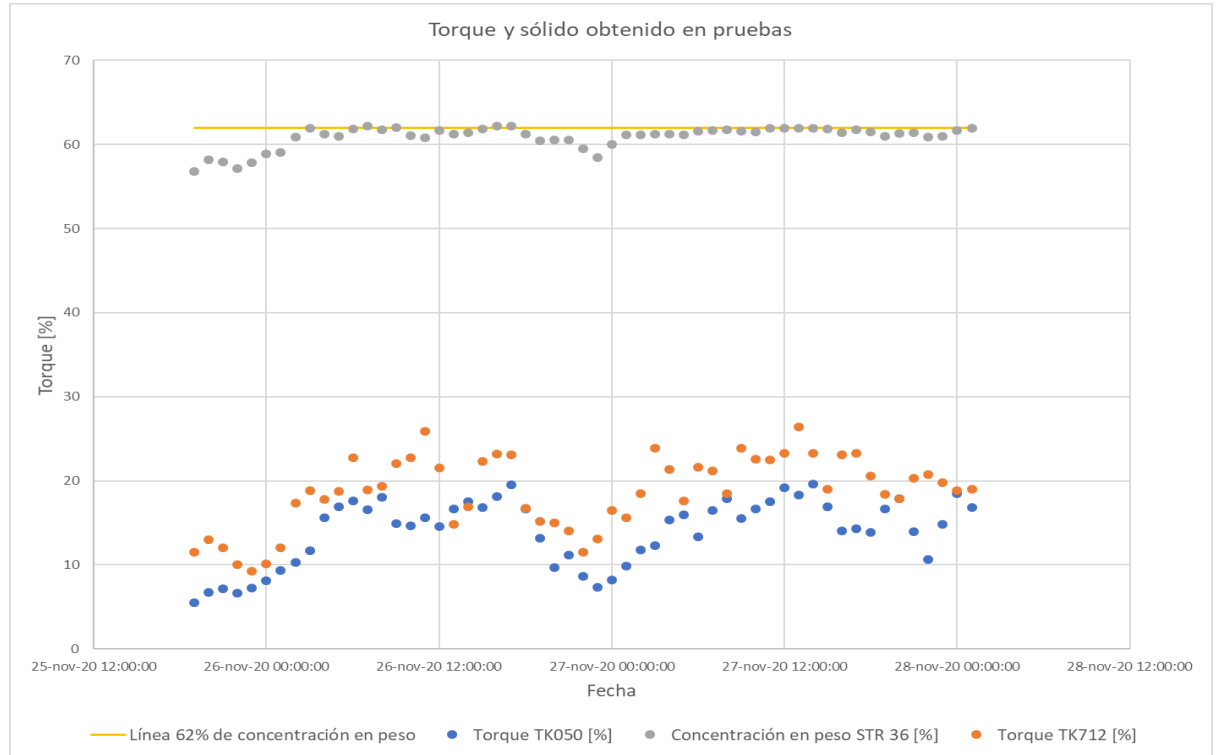


Figura 37: Gráfico de sólidos obtenidos durante pruebas intentando mantener torques recomendados.

El día 26, entre las 3 y las 17 horas, se obtuvo un Cp promedio de 61,6%. Luego se bajó el torque del TK050 bajo 10% y en el TK712 bajo 15%, y se puede observar que inmediatamente se produjo una baja en el sólido de descarga. Luego, entre las 2 horas del día 27 y la 1 del 28 de noviembre, se mantuvieron los torques dentro de los parámetros ideales y el Cp promedio de descarga fue de 61,5%. La baja de torque se provocó por una disminución en el tratamiento planta, por lo que fue imposible poder sostener el torque ideal en el TK050 y TK712. Para que esto no ocurra y no depender del tratamiento planta, se necesitan válvulas reguladoras de flujo, a manera de mantener el torque deseado en el espesador. A pesar de esta baja, calculando el sólido promedio obtenido desde las 3 horas del día 26 hasta el final de la prueba el día 28 de noviembre a las 1 horas, se obtuvo un Cp de 61,3%, lo que hace suponer que, sólo teniendo precaución de mantener los dos espesadores dentro de los parámetros de torque ideales, se aumentará al menos un 1% el sólido con respecto a los resultados obtenidos entre enero y agosto de este año (Cp promedio de 60,2%). Con esto se verifican los parámetros de torque recomendados para los espesadores de relave.

7. Evaluación económica de alternativas

Se realizó una selección de la estrategia de acuerdo con una evaluación económico-financiera. Las alternativas seleccionadas serán las que tengan mayores beneficios a un menor costo.

Dado que la implementación de distintas estrategias operacionales no tendrá un costo asociado, sólo se evaluarán económicamente las implementaciones que necesiten de algún cambio que implique un costo asociado, tales como instalaciones de nuevas tecnologías o modificaciones de la ya existente.

La fórmula que se ocupará para calcular el VAN (valor actual neto) es:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t}$$

Donde:

I_0 : Inversión inicial

k: Tasa de retorno

t: Períodos en años

F_t : Flujos de dinero en año t

n: Número de años

Además, se calculará la TIR (tasa interna de retorno), despejando k de la ecuación cuando el VAN sea cero. El ROI (retorno de la inversión) será calculado según la siguiente fórmula:

$$ROI = \frac{\text{Ganancia} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}}$$

Instalación de válvula reguladora de flujo

El costo de una válvula de dardo, para las líneas principales del espesador (20" de diámetro), es el siguiente:

ITEM	Descripción	N° PARTE	Cant.	Valor unitario (USD)
1	Suministro válvula dardo 20" VDSP-EM con actuador eléctrico inteligente Rotork (según alcances del punto 3) incorpora sistema de toma de muestra	VDSP-EM20-AD-AE-DE	6	46,500

Figura 38: Costo válvula de dardo 20", según cotización.

Además de este valor, se debe agregar el costo de instalación, considerado como 96 horas hombre por cuatro mecánicos y un supervisor. El costo por hora de un mecánico en Minera Los Pelambres es de aproximadamente 30 dólares por hora y el de un supervisor es de 50 dólares por hora.

La instalación considerada es de seis válvulas reguladoras, una en una descarga de 20" y otra en una de 12", por cada espesador (se estima que cada válvula vale 46.500 dólares, a pesar de que la válvula de 12" debe presentar un costo económico más reducido).

Instalación cortador de muestra

Para lograr calibrar los densímetros es necesario instalar cortadores de muestra en todas las descargas (12 en total). Los cortadores tienen un valor de 10.000 dólares cada uno y la instalación demoraría 48 horas con el trabajo de cuatro mecánicos y un supervisor por cada cortador.

Calibración flujómetros

Para calibrar los 12 flujómetros se consideró la medición con trazado nuclear del flujo (valor aproximado de 4 mil dólares por punto) y luego la calibración que dura 2 horas aprox., en la que trabajarán un eléctrico y un instrumentista. El valor de cada profesional se estima en 20 dólares por hora.

Cambio flujómetros

Para el cambio de flujómetros se consideró cambiar la marca ABB, que son los más antiguos, por flujómetros Endress and Hauser. Éstos son cuatro y el valor de cada uno son aproximadamente 15 mil dólares. Además, para el trabajo se considera que demorará 24 horas y participarán en esta tarea dos

mecánicos, un eléctrico y un instrumentista, además de un supervisor eléctrico/instrumentista (el valor de este profesional se estima en 35 dólares la hora).

Calibración densímetros

Para calibrar los 12 densímetros, se consideraron 3 horas de trabajo de un eléctrico, un instrumentista y un supervisor de estas especialidades. La toma de muestra no tiene un valor agregado, ya que está considerado en un contrato que posee actualmente Minera Los Pelambres.

Graduar compuerta de alimentación

Para graduar las compuertas de alimentación de los espesadores se consideró la medición de cada una de las tres compuertas con trazado nuclear. Luego se cargaría esta información en Delta V, de manera que exista una relación entre el valor de apertura mostrado por el actuador y el flujo de ingreso al espesador.

Simplificaría las secciones planteadas...solo se trata de componente de la evaluación, sus valores y los supuestos

Evaluación económica pesimista, esperada y optimista

A continuación, se muestran los costos que se ocuparán para realizar la evaluación de los proyectos (costos aproximados de Minera Los Pelambres).

Costos		
ÍTEM	Unidad	Valor
Mecánico	dólares/hora	30
Instrumentista	dólares/hora	20
Eléctrico	dólares/hora	20
Supervisor mecánico	dólares/hora	50
Supervisor eléctrico/instrumentista	dólares/hora	35
Flujómetro	dólares	15.000
Trazado nuclear	dólares	4.000
Agua por aumento de 0,1% de sólido	dólares	71.445
Válvula dardo	dólares	46.500
Calibración densímetro	dólares	0

Cortador de muestra	dólares	10.000
---------------------	---------	--------

Tabla 11: Costos por ítem de proyectos a implementar

Si se evalúan todos los proyectos en conjunto de manera pesimista, esperada y optimista, a 5 años con una tasa de descuento del 10% (típica en la industria), se tiene lo siguiente:

- **Evaluación pesimista:** Se considera que los proyectos no generen valor y sólo se obtenga una ganancia por la mejor operación, según la validación con pruebas operacionales, lo que provoca un aumento de 1% de Cp en la descarga, equivalente a 714.450 dólares al año aproximadamente. Considerando esto se obtienen los siguientes resultados:

ÍTEM	Unidad	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
TOTAL AHORRO AGUA	dólares	0	714.450	714.450	714.450	714.450	714.450
COSTOS IMPLEMENTACIONES							
Instalación válvula reguladora	dólares	376.920					
Instalación cortador de muestra	dólares	217.920					
Calibración flujómetro	dólares	48.960					
Cambio flujómetro	dólares	72.960					
Calibración densímetros	dólares	2.700					
Graduar compuerta de alimentación	dólares	12.000					
Costos Totales	dólares	731.460					
Flujo de caja (US\$)	MMUS\$	-731.460	714.450	714.450	714.450	714.450	714.450

Tabla 12: Flujo de caja escenario pesimista.

Tasa de descuento	%	10,0%
VAN	dólares	\$1.797.152
TIR	%	94,1%
ROI	%	388,4%

Tabla 13: VAN, TIR y ROI, con tasa de descuento de 10%, escenario pesimista.

Cabe destacar que el flujo de caja sólo tiene un impacto negativo en el año cero, ya que corresponde a la inversión de los proyectos. Sin embargo, luego estos no generan un costo mayor a lo que está hoy implementado en Minera Los Pelambres, por lo que no hay flujos negativos durante los años siguientes. Además, se considera que los proyectos no tengan un deterioro en su efectividad en los 5 años

siguientes, realizando una correcta mantención a los activos. Esto también ocurre en los flujos de caja de la evaluación esperada y la optimista.

- **Evaluación esperada:** Se considera que los proyectos generen valor y se obtenga una ganancia de 2% de aumento en el sólido de descarga (1% de aumento es provocado por la mejor operación, según la validación con pruebas operacionales, y otro 1% por los proyectos ejecutados, según estimación realizada con experto de FLSmith para un caso esperado), lo que equivale a 1.428.900 dólares al año aproximadamente. Considerando esto se obtienen los siguientes resultados:

ÍTEM	Unidad	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
TOTAL AHORRO AGUA	dólares	0	1.428.900	1.428.900	1.428.900	1.428.900	1.428.900
COSTOS IMPLEMENTACIONES							
Instalación válvula reguladora	dólares	376.920					
Instalación cortador de muestra	dólares	217.920					
Calibración flujómetro	dólares	48.960					
Cambio flujómetro	dólares	72.960					
Calibración densímetros	dólares	2.700					
Graduar compuerta de alimentación	dólares	12.000					
Costos Totales	dólares	731.460					
Flujo de caja (US\$)	MMUS\$	-731.460	1.428.900	1.428.900	1.428.900	1.428.900	1.428.900

Tabla 14: Flujo de caja escenario esperado.

Tasa de descuento	%	10,0%
VAN	dólares	\$4.259.268
TIR	%	194,5%
ROI	%	876,7%

Tabla 15: VAN, TIR y ROI, con tasa de descuento de 10%, escenario esperado.

- **Evaluación optimista:** Se considera que los proyectos generen valor y se obtenga una ganancia de 3% de aumento en el sólido de descarga (1% de aumento es provocado por la mejor operación, según la validación con pruebas operacionales, y otro 2% por los proyectos ejecutados, según estimación realizada con experto de FLSmidth para el mejor caso), lo que equivale a 2.143.350 dólares al año aproximadamente: Considerando esto se obtienen los siguientes resultados:

ÍTEM	Unidad	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
TOTAL AHORRO AGUA	dólares	0	2.143.350	2.143.350	2.143.350	2.143.350	2.143.350
COSTOS IMPLEMENTACIONES							
Instalación válvula reguladora	dólares	376.920					
Instalación cortador de muestra	dólares	217.920					
Calibración flujómetro	dólares	48.960					
Cambio flujómetro	dólares	72.960					
Calibración densímetros	dólares	2.700					
Graduar compuerta de alimentación	dólares	12.000					
Costos Totales	dólares	731.460					
Flujo de caja (US\$)	MMUS\$	-731.460	2.143.350	2.143.350	2.143.350	2.143.350	2.143.350

Tabla 16: Flujo de caja escenario optimista.

Tasa de descuento	%	10,0%
VAN	dólares	\$6.721.384
TIR	%	292,7%
ROI	%	1365,1%

Tabla 17: VAN, TIR y ROI, con tasa de descuento de 10%, escenario esperado.

Como se puede ver en los resultados expuestos, a pesar de no tener ganancias, sólo con mejorar la forma de operar se pagarían los proyectos, por lo que se recomienda realizar cada ítem expuesto en el capítulo 7.

8. Recomendaciones y consideraciones

El análisis realizado a los parámetros de los espesadores de relave entre enero y agosto del año 2020 (que vincula el flujo de floculante añadido, torque, altura de rastra, apertura de compuerta de alimentación, camada -en el caso del espesador TK712-, flujo y Cp de descarga), puede relacionarse con el tratamiento planta analizando el caso donde se tengan parámetros similares a la situación que está ocurriendo actualmente. De esta forma, se podría lograr el mayor Cp en la descarga y, por ende, la mayor recuperación de agua.

Además, se realizan las siguientes recomendaciones:

- Calibrar y/o reemplazar flujómetros y densímetros de las descargas de los espesadores de relave.
- Mantener los torques entre 15% y 25% para el TK712, y entre 10% y 20% para el TK050 y TK051.
- Graduar compuerta de alimentación a espesadores, de manera que entregue el caudal ingresado y así poder hacer un correcto balance entre el ingreso y la descarga de cada espesador.
- Instalar válvulas en las descargas de los espesadores que permitan modular el flujo de descarga. De esta forma se podrá tener un mejor control.
- Bajar la rastra hasta 0% de altura idealmente o lo que más se pueda, de manera que se compacte el relave y se tenga un mayor sólido en la descarga.
- Colocar concreto en el piso de los espesadores TK050 y 051 para ayudar a ajustar de mejor forma la altura de rastra, sin correr el riesgo de dañar esta por bajarla demasiado y que tope en el piso, ya que se diferenciaría de mejor forma el relave y la base. Esto se podría realizar como última mejora, ya que el ajuste de la rastra podría realizarse sin hacer esto. Sin embargo, lo más probable es que no quede totalmente en 0% de nivel. Es importante destacar que esto no se incluye en la evaluación económica de las alternativas a implementar, por lo que se debe considerar un costo extra si se desea realizar.
- Se descarta realizar modificaciones estructurales del espesador, tales como repotenciar motores, lo que significa modificar la estructura. Esto es debido a que para hacer esto hay que ajustarse a la norma sísmica del año 2010, NCh2369, lo que implicaría hacer tantas modificaciones que no se justificaría su costo.
- Si se quiere tener un mejor estándar en los espesadores TK050 y TK051 se podría instalar un PIT para medir la camada.

Luego de ser realizadas estas recomendaciones, también puede automatizarse el proceso de espesamiento de relaves. Lo primero que hay que realizar es un lazo de control que module la adición de floculante dependiendo del relave ingresado al espesador. Después se deben regular la alimentación y las descargas para así mantener un torque lo más cercano posible a 25% en el espesador TK712 y 20% para los espesadores TK050 y 051.

Para conocer la tasa óptima de floculante a añadir es importante realizar un estudio con distintos tipos de floculante, a manera de obtener el que tenga un mejor costo beneficio para el mineral de Mi-nera Los Pelambres.

Revisando la evaluación económica, se puede ver que es necesario realizar lo sugerido anterior-mente, dejando como opcional colocar concreto y PIT en la base de los espesadores TK050 y 051 para medir camada, ya que, realizando una inversión de 731.460 dólares, se tendrá un VAN del proyecto a 5 años de 4.259.268 dólares, es decir, un 876,7% de retorno esperado sobre la inversión.

Los riesgos que se tienen al realizar estas recomendaciones son que el espesador pueda no funcio-nar de acuerdo a lo esperado, siendo la falla catastrófica un embanque, lo que se mitigaría volviendo a operar, antes de que esto ocurra, de la misma forma que se está haciendo hasta ahora. Debido a esto, es importante que se mantenga el operador o supervisor de sala de control monitoreando las variables las 24 horas, tal como ocurre hasta ahora.

9. Conclusión

De acuerdo con lo investigado en esta tesis, es muy importante mejorar la recuperación de agua en la industria minera, ya que, además de disminuir el consumo de agua fresca, también se reduce el gasto de energía ocupado en transportar el agua desde el mar o tranques de relave, ubicados en cotas más bajas del lugar en que se encuentra la planta concentradora. Considerando que el 76,4% del agua ocupada en minería el 2019 es recirculada (correspondiente a 53,32 m³/s), aumentar 1% el porcentaje de agua recirculada provocaría un aumento de más de 0,5 m³/s ([10]). Esto demuestra que existe una gran brecha para mejorar, dado que adicionalmente se pudo evidenciar, en conjunto con un especialista en espesadores de relave, que las faenas no tienen buenos estándares para lograr la mayor recuperación de agua en espesadores de relave.

Cabe destacar que ocupar de manera eficiente al agua aporta en los cinco aspectos relevantes de la estrategia de Antofagasta Minerals: las personas, seguridad y sustentabilidad, competitividad, crecimiento e innovación ([7]). Si se recupera más agua en los espesadores de relave aportará a que la gente del valle del Choapa tenga menos problemas para el riego de sus cultivos, ya que la minera podría ocupar menos agua fresca y dejarla disponible para la gente, se tendrá una menor operación de envío de agua desde una cota más baja, lo que aporta a la seguridad, ya que se tendrán menos intervenciones en estaciones de bombeo por parte de las personas. En cuanto a sustentabilidad se mejoraría claramente por un menor consumo de agua fresca y menor gasto de energía, en procesos de recirculación de agua. Finalmente, la minera será más competitiva por el ahorro de costo que esto significa, podrá aumentar su producción sin que el agua sea una limitante y será innovador, ya que las mineras de Chile no han estudiado esto a fondo. Esto demuestra que la aplicación de las recomendaciones y, en general, aumentar el porcentaje de agua recirculada, se alinea con la estrategia del grupo minero.

Además, según Cochilco, se espera un aumento del 12% de consumo de agua fresca para las mineras del país para el año 2029 ([3]). Si se añade que la Licencia Social para Operar (LSO) podría ser revocada por las comunidades en caso de que aumente el consumo de agua y debido a la sequía que se presenta en la Región de Coquimbo, es imprescindible que en el proceso se recupere la mayor cantidad del recurso hídrico. Si bien la Dirección General de Aguas (DGA) aumentó las zonas de prohibición para extraer agua, hay casos en que las comunidades solicitan que las faenas no extraigan más agua fresca, lo que podría poner en riesgo la renovación de la LSO ([2]). Es por esto, que este tema es relevante a nivel país y se considera que intentar replicar estas prácticas en otras faenas es fundamental para el negocio minero.

Como parte de esta tesis y para lograr una mejora en la recuperación de agua, se realizó un análisis de los parámetros de los espesadores de relave entre enero y agosto del año 2020, los cuales pueden ser relacionados con el tratamiento planta y se puede buscar el caso en que se tengan parámetros similares a la situación que está ocurriendo. De esta forma, se lograría el mayor Cp en la descarga y, por ende, la mayor recuperación de agua. Adicionalmente, se evaluó económicamente la realización de ciertos proyectos descritos en el capítulo anterior. Se deja como opcional la colocación de concreto y PIT para medir camada, en la base de los espesadores TK050 y 051, ya que no se considera en la evaluación económica.

La evaluación económica muestra que, realizando una inversión de 731.460 dólares, se tendrá un VAN del proyecto a 5 años de 4.259.268 dólares, es decir, un 876,7% de retorno esperado sobre la inversión, lo que demuestra que se deben implementar las recomendaciones realizadas.

Como se puede ver en el párrafo anterior, se logra cumplir con el objetivo general de proponer iniciativas para aumentar la recuperación de agua de los espesadores de relave de Minera Los Pelambres. Con respecto a los objetivos específicos, se realiza un análisis de la situación actual de los espesadores de relave de Minera Los Pelambres, se sugieren recomendaciones que mejoren recuperación de agua de éstos y se evalúa el impacto de los resultados obtenidos, luego de la implementación de las recomendaciones seleccionadas. Realizar esto no solo tendrá un VAN de más de 4 millones de dólares en 5 años, sino que ayudará en aspectos estratégicos de la operación de Minera Los Pelambres, que ayudará de forma muy importante a la sustentabilidad del negocio y su proyección a futuro.

Es importante destacar que siempre existen riesgos, pero éstos pueden ser mitigados si las pruebas y las implementaciones se planifican de manera correcta. Con respecto a los riesgos como la recesión mundial o el giro del escenario político, que provoque que la minera no pueda operar o baje su producción, si bien no se pueden mitigar, se podrá detener la inversión en caso de ser necesario y continuar adelante con el cambio en la forma de operar los espesadores de relave.

Los resultados obtenidos, luego de implementar mejores prácticas operacionales, fueron satisfactorios, ya que la concentración de sólido en peso subió de 60,2% a 61,3% en la descarga de los espesadores de relave. Si a esto se añaden los proyectos evaluados, se espera tener un sólido promedio en la descarga de 62,2%.

Si bien se investigó sobre las mejores prácticas de la industria, se pudo evidenciar que en las faenas existen muy bajos estándares sobre la recuperación de agua en espesadores de relave, por lo que se consideraron las mejores prácticas que recomiendan los especialistas en este rubro. Debido a esto, se recomienda analizar esta tesis en otras faenas, ya que no solo ayuda en un tema económico, sino que provoca que la minería se desarrolle de manera sustentable, teniendo como un foco importante el consumo de agua fresca, la que es mucho más escasa que antes. Si se logra un ahorro de agua a nivel país, el impacto llegaría a otros sectores como el agrícola, ya que tendrían más agua para riego, lo que provocaría el crecimiento sustentable de la economía.

10. Bibliografía

- [1]. (s.f.). *Espesamiento de pulpas*, Boletín Minero número 1299, mayo de 2016, páginas 30 y 31.
- [2]. (s.f.). *Mineras en aprietos: las restricciones para derechos de agua que complican al sector*, El Mostrador, 21 de febrero de 2019.
- [3]. (s.f.). *Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2018-2029*, Comisión Chilena del Cobre, Año 2018.
- [4]. (s.f.). *Informes Gerencia TFT, Minera Los Pelambres*, 2019.
- [5]. (s.f.). *CURSO OPERACIÓN DE ESPESADORES*, Minera Los Pelambres, Delkor.
- [6]. (s.f.). *Espesadores FLSmidth*, 28 de Abril de 2020.
- [7]. (s.f.). *Nuestra Estrategia*, Antofagasta Minerals, <https://www.aminerals.cl/quienes-somos/nuestra-estrategia/>.
- [8]. (s.f.). *Casi 30 proyectos mineros parados por falta de agua y energía*, Portal Minero, <https://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=71108151>.
- [9]. (s.f.). *"Megasequía" en Chile: las catastróficas consecuencias de la mayor crisis del agua de los últimos 50 años*, Fernanda Paúl, BBC Mundo, 11 de octubre de 2019.
- [10]. (s.f.). *Consumo de agua en la minería del cobre al 2019*, Comisión Chilena del Cobre, año 2020.
- [11]. (s.f.). *Fin de Pascua Lama: Suprema rechaza recurso que pedía castigo mayor y confirma sanciones de SMA*, Bio Bio Chile, <https://www.biobiochile.cl/especial/aqui-tierra/noticias/2022/07/14/fin-de-pascua-lama-suprema-rechaza-recurso-que-pedia-castigo-mayor-y-confir>. Obtenido de <https://www.biobiochile.cl/especial/aqui-tierra/noticias/2022/07/14/fin-de-pascua-lama-suprema-rechaza-recurso-que-pedia-castigo-mayor-y-confirma-sanciones-de-sma.shtml>
- (s.f.). *Consumo de agua en la minería del cobre 2019*, Comisión Chilena del Cobre, año 2020.

Anexos

Anexo A: Cálculo de ahorro de agua dependiendo del sólido de descarga

Cálculo de ahorro dependiendo del sólido de descarga de espesadores el año 2019 (en verde se destaca el sólido obtenido el 2019).

Cp	tratamiento 2019 [ton]	relave 2019 [ton]	agua [m3]	relave seco [ton]	Diferencia m3 agua	valor USD/m3	costo por año [USD]
0,5	61262695	60037441,1	30018720,55	30018720,55		1,19	
0,501	61262695	60037441,1	29958683,11	30078757,99	60037,4411	1,19	71444,55491
0,502	61262695	60037441,1	29898645,67	30138795,43	60037,4411	1,19	71444,55491
0,503	61262695	60037441,1	29838608,23	30198832,87	60037,4411	1,19	71444,55491
0,504	61262695	60037441,1	29778570,79	30258870,31	60037,4411	1,19	71444,55491
0,505	61262695	60037441,1	29718533,34	30318907,76	60037,4411	1,19	71444,55491
0,506	61262695	60037441,1	29658495,9	30378945,2	60037,4411	1,19	71444,55491
0,507	61262695	60037441,1	29598458,46	30438982,64	60037,4411	1,19	71444,55491
0,508	61262695	60037441,1	29538421,02	30499020,08	60037,4411	1,19	71444,55491
0,509	61262695	60037441,1	29478383,58	30559057,52	60037,4411	1,19	71444,55491
0,51	61262695	60037441,1	29418346,14	30619094,96	60037,4411	1,19	71444,55491
0,511	61262695	60037441,1	29358308,7	30679132,4	60037,4411	1,19	71444,55491
0,512	61262695	60037441,1	29298271,26	30739169,84	60037,4411	1,19	71444,55491
0,513	61262695	60037441,1	29238233,82	30799207,28	60037,4411	1,19	71444,55491
0,514	61262695	60037441,1	29178196,37	30859244,73	60037,4411	1,19	71444,55491
0,515	61262695	60037441,1	29118158,93	30919282,17	60037,4411	1,19	71444,55491
0,516	61262695	60037441,1	29058121,49	30979319,61	60037,4411	1,19	71444,55491
0,517	61262695	60037441,1	28998084,05	31039357,05	60037,4411	1,19	71444,55491
0,518	61262695	60037441,1	28938046,61	31099394,49	60037,4411	1,19	71444,55491
0,519	61262695	60037441,1	28878009,17	31159431,93	60037,4411	1,19	71444,55491
0,52	61262695	60037441,1	28817971,73	31219469,37	60037,4411	1,19	71444,55491
0,521	61262695	60037441,1	28757934,29	31279506,81	60037,4411	1,19	71444,55491
0,522	61262695	60037441,1	28697896,85	31339544,25	60037,4411	1,19	71444,55491
0,523	61262695	60037441,1	28637859,4	31399581,7	60037,4411	1,19	71444,55491
0,524	61262695	60037441,1	28577821,96	31459619,14	60037,4411	1,19	71444,55491
0,525	61262695	60037441,1	28517784,52	31519656,58	60037,4411	1,19	71444,55491
0,526	61262695	60037441,1	28457747,08	31579694,02	60037,4411	1,19	71444,55491
0,527	61262695	60037441,1	28397709,64	31639731,46	60037,4411	1,19	71444,55491
0,528	61262695	60037441,1	28337672,2	31699768,9	60037,4411	1,19	71444,55491
0,529	61262695	60037441,1	28277634,76	31759806,34	60037,4411	1,19	71444,55491
0,53	61262695	60037441,1	28217597,32	31819843,78	60037,4411	1,19	71444,55491
0,531	61262695	60037441,1	28157559,88	31879881,22	60037,4411	1,19	71444,55491
0,532	61262695	60037441,1	28097522,43	31939918,67	60037,4411	1,19	71444,55491

0,533	61262695	60037441,1	28037484,99	31999956,11	60037,4411	1,19	71444,55491
0,534	61262695	60037441,1	27977447,55	32059993,55	60037,4411	1,19	71444,55491
0,535	61262695	60037441,1	27917410,11	32120030,99	60037,4411	1,19	71444,55491
0,536	61262695	60037441,1	27857372,67	32180068,43	60037,4411	1,19	71444,55491
0,537	61262695	60037441,1	27797335,23	32240105,87	60037,4411	1,19	71444,55491
0,538	61262695	60037441,1	27737297,79	32300143,31	60037,4411	1,19	71444,55491
0,539	61262695	60037441,1	27677260,35	32360180,75	60037,4411	1,19	71444,55491
0,54	61262695	60037441,1	27617222,91	32420218,19	60037,4411	1,19	71444,55491
0,541	61262695	60037441,1	27557185,46	32480255,64	60037,4411	1,19	71444,55491
0,542	61262695	60037441,1	27497148,02	32540293,08	60037,4411	1,19	71444,55491
0,543	61262695	60037441,1	27437110,58	32600330,52	60037,4411	1,19	71444,55491
0,544	61262695	60037441,1	27377073,14	32660367,96	60037,4411	1,19	71444,55491
0,545	61262695	60037441,1	27317035,7	32720405,4	60037,4411	1,19	71444,55491
0,546	61262695	60037441,1	27256998,26	32780442,84	60037,4411	1,19	71444,55491
0,547	61262695	60037441,1	27196960,82	32840480,28	60037,4411	1,19	71444,55491
0,548	61262695	60037441,1	27136923,38	32900517,72	60037,4411	1,19	71444,55491
0,549	61262695	60037441,1	27076885,94	32960555,16	60037,4411	1,19	71444,55491
0,55	61262695	60037441,1	27016848,5	33020592,61	60037,4411	1,19	71444,55491
0,551	61262695	60037441,1	26956811,05	33080630,05	60037,4411	1,19	71444,55491
0,552	61262695	60037441,1	26896773,61	33140667,49	60037,4411	1,19	71444,55491
0,553	61262695	60037441,1	26836736,17	33200704,93	60037,4411	1,19	71444,55491
0,554	61262695	60037441,1	26776698,73	33260742,37	60037,4411	1,19	71444,55491
0,555	61262695	60037441,1	26716661,29	33320779,81	60037,4411	1,19	71444,55491
0,556	61262695	60037441,1	26656623,85	33380817,25	60037,4411	1,19	71444,55491
0,557	61262695	60037441,1	26596586,41	33440854,69	60037,4411	1,19	71444,55491
0,558	61262695	60037441,1	26536548,97	33500892,13	60037,4411	1,19	71444,55491
0,559	61262695	60037441,1	26476511,53	33560929,57	60037,4411	1,19	71444,55491
0,56	61262695	60037441,1	26416474,08	33620967,02	60037,4411	1,19	71444,55491
0,561	61262695	60037441,1	26356436,64	33681004,46	60037,4411	1,19	71444,55491
0,562	61262695	60037441,1	26296399,2	33741041,9	60037,4411	1,19	71444,55491
0,563	61262695	60037441,1	26236361,76	33801079,34	60037,4411	1,19	71444,55491
0,564	61262695	60037441,1	26176324,32	33861116,78	60037,4411	1,19	71444,55491
0,565	61262695	60037441,1	26116286,88	33921154,22	60037,4411	1,19	71444,55491
0,566	61262695	60037441,1	26056249,44	33981191,66	60037,4411	1,19	71444,55491
0,567	61262695	60037441,1	25996212	34041229,1	60037,4411	1,19	71444,55491
0,568	61262695	60037441,1	25936174,56	34101266,54	60037,4411	1,19	71444,55491
0,569	61262695	60037441,1	25876137,11	34161303,99	60037,4411	1,19	71444,55491
0,57	61262695	60037441,1	25816099,67	34221341,43	60037,4411	1,19	71444,55491
0,571	61262695	60037441,1	25756062,23	34281378,87	60037,4411	1,19	71444,55491
0,572	61262695	60037441,1	25696024,79	34341416,31	60037,4411	1,19	71444,55491
0,573	61262695	60037441,1	25635987,35	34401453,75	60037,4411	1,19	71444,55491
0,574	61262695	60037441,1	25575949,91	34461491,19	60037,4411	1,19	71444,55491
0,575	61262695	60037441,1	25515912,47	34521528,63	60037,4411	1,19	71444,55491

0,576	61262695	60037441,1	25455875,03	34581566,07	60037,4411	1,19	71444,55491
0,577	61262695	60037441,1	25395837,59	34641603,51	60037,4411	1,19	71444,55491
0,578	61262695	60037441,1	25335800,14	34701640,96	60037,4411	1,19	71444,55491
0,579	61262695	60037441,1	25275762,7	34761678,4	60037,4411	1,19	71444,55491
0,58	61262695	60037441,1	25215725,26	34821715,84	60037,4411	1,19	71444,55491
0,581	61262695	60037441,1	25155687,82	34881753,28	60037,4411	1,19	71444,55491
0,582	61262695	60037441,1	25095650,38	34941790,72	60037,4411	1,19	71444,55491
0,583	61262695	60037441,1	25035612,94	35001828,16	60037,4411	1,19	71444,55491
0,584	61262695	60037441,1	24975575,5	35061865,6	60037,4411	1,19	71444,55491
0,585	61262695	60037441,1	24915538,06	35121903,04	60037,4411	1,19	71444,55491
0,586	61262695	60037441,1	24855500,62	35181940,48	60037,4411	1,19	71444,55491
0,587	61262695	60037441,1	24795463,17	35241977,93	60037,4411	1,19	71444,55491
0,588	61262695	60037441,1	24735425,73	35302015,37	60037,4411	1,19	71444,55491
0,589	61262695	60037441,1	24675388,29	35362052,81	60037,4411	1,19	71444,55491
0,59	61262695	60037441,1	24615350,85	35422090,25	60037,4411	1,19	71444,55491
0,591	61262695	60037441,1	24555313,41	35482127,69	60037,4411	1,19	71444,55491
0,592	61262695	60037441,1	24495275,97	35542165,13	60037,4411	1,19	71444,55491
0,593	61262695	60037441,1	24435238,53	35602202,57	60037,4411	1,19	71444,55491
0,594	61262695	60037441,1	24375201,09	35662240,01	60037,4411	1,19	71444,55491
0,595	61262695	60037441,1	24315163,65	35722277,45	60037,4411	1,19	71444,55491
0,596	61262695	60037441,1	24255126,2	35782314,9	60037,4411	1,19	71444,55491
0,597	61262695	60037441,1	24195088,76	35842352,34	60037,4411	1,19	71444,55491
0,598	61262695	60037441,1	24135051,32	35902389,78	60037,4411	1,19	71444,55491
0,599	61262695	60037441,1	24075013,88	35962427,22	60037,4411	1,19	71444,55491
0,6	61262695	60037441,1	24014976,44	36022464,66	60037,4411	1,19	71444,55491
0,601	61262695	60037441,1	23954939	36082502,1	60037,4411	1,19	71444,55491
0,602	61262695	60037441,1	23894901,56	36142539,54	60037,4411	1,19	71444,55491
0,603	61262695	60037441,1	23834864,12	36202576,98	60037,4411	1,19	71444,55491
0,604	61262695	60037441,1	23774826,68	36262614,42	60037,4411	1,19	71444,55491
0,605	61262695	60037441,1	23714789,23	36322651,87	60037,4411	1,19	71444,55491
0,606	61262695	60037441,1	23654751,79	36382689,31	60037,4411	1,19	71444,55491
0,607	61262695	60037441,1	23594714,35	36442726,75	60037,4411	1,19	71444,55491
0,608	61262695	60037441,1	23534676,91	36502764,19	60037,4411	1,19	71444,55491
0,609	61262695	60037441,1	23474639,47	36562801,63	60037,4411	1,19	71444,55491
0,61	61262695	60037441,1	23414602,03	36622839,07	60037,4411	1,19	71444,55491
0,611	61262695	60037441,1	23354564,59	36682876,51	60037,4411	1,19	71444,55491
0,612	61262695	60037441,1	23294527,15	36742913,95	60037,4411	1,19	71444,55491
0,613	61262695	60037441,1	23234489,71	36802951,39	60037,4411	1,19	71444,55491
0,614	61262695	60037441,1	23174452,26	36862988,84	60037,4411	1,19	71444,55491
0,615	61262695	60037441,1	23114414,82	36923026,28	60037,4411	1,19	71444,55491
0,616	61262695	60037441,1	23054377,38	36983063,72	60037,4411	1,19	71444,55491
0,617	61262695	60037441,1	22994339,94	37043101,16	60037,4411	1,19	71444,55491
0,618	61262695	60037441,1	22934302,5	37103138,6	60037,4411	1,19	71444,55491

0,619	61262695	60037441,1	22874265,06	37163176,04	60037,4411	1,19	71444,55491
0,62	61262695	60037441,1	22814227,62	37223213,48	60037,4411	1,19	71444,55491
0,621	61262695	60037441,1	22754190,18	37283250,92	60037,4411	1,19	71444,55491
0,622	61262695	60037441,1	22694152,74	37343288,36	60037,4411	1,19	71444,55491
0,623	61262695	60037441,1	22634115,29	37403325,81	60037,4411	1,19	71444,55491
0,624	61262695	60037441,1	22574077,85	37463363,25	60037,4411	1,19	71444,55491
0,625	61262695	60037441,1	22514040,41	37523400,69	60037,4411	1,19	71444,55491
0,626	61262695	60037441,1	22454002,97	37583438,13	60037,4411	1,19	71444,55491
0,627	61262695	60037441,1	22393965,53	37643475,57	60037,4411	1,19	71444,55491
0,628	61262695	60037441,1	22333928,09	37703513,01	60037,4411	1,19	71444,55491
0,629	61262695	60037441,1	22273890,65	37763550,45	60037,4411	1,19	71444,55491
0,63	61262695	60037441,1	22213853,21	37823587,89	60037,4411	1,19	71444,55491
0,631	61262695	60037441,1	22153815,77	37883625,33	60037,4411	1,19	71444,55491
0,632	61262695	60037441,1	22093778,32	37943662,78	60037,4411	1,19	71444,55491
0,633	61262695	60037441,1	22033740,88	38003700,22	60037,4411	1,19	71444,55491
0,634	61262695	60037441,1	21973703,44	38063737,66	60037,4411	1,19	71444,55491
0,635	61262695	60037441,1	21913666	38123775,1	60037,4411	1,19	71444,55491
0,636	61262695	60037441,1	21853628,56	38183812,54	60037,4411	1,19	71444,55491
0,637	61262695	60037441,1	21793591,12	38243849,98	60037,4411	1,19	71444,55491
0,638	61262695	60037441,1	21733553,68	38303887,42	60037,4411	1,19	71444,55491
0,639	61262695	60037441,1	21673516,24	38363924,86	60037,4411	1,19	71444,55491
0,64	61262695	60037441,1	21613478,8	38423962,3	60037,4411	1,19	71444,55491

Anexo B: Formulario Administración del cambio Minera Los Pelambres

Formulario de Administración del Cambio

017

IDENTIFICACIÓN DEL CAMBIO:	Modificación operación espesadores de relave		
FECHA SOLICITUD:	XXX		
RESPONSABLE SOLICITUD / GESTIÓN:	Andrés Araneda Rosello	Cargo:	Ingeniero Gestión de Procesos
		Área:	Gerencia TFT

CARACTERIZACIÓN DEL CAMBIO:	
Objetivos del Cambio:	Aumentar la recuperación de agua en los espesadores de relave
Fundamentación del Cambio:	Escasez hídrica que provoca restricciones en el tratamiento de mineral
Alcances del Cambio (Áreas / Ámbitos):	Modificaciones de instrumentación y operación de espesadores de relave
Inversión estimada (US\$):	731.460 dólares
Descripción del Cambio:	<p>Se realizan recomendaciones para operar de mejor manera los espesadores de relave y recuperar más agua, además de los siguientes cambios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalación válvula reguladora • Instalación cortador de muestra • Calibración flujómetro • Cambio flujómetro • Calibración densímetros • Graduar compuerta de alimentación

EVALUACIÓN DE RIESGOS / INVENTARIO DE RIESGOS:	Se podría provocar un evento no deseado en la operación de los espesadores de relave, como pérdida de recuperación de agua o embanque en el peor de los casos, lo que solo podría provocar una pérdida de producción solo en algunos casos, pero se tiene la instrumentación y los enclavamientos para que esto no ocurra.
---	--

BENEFICIOS ESPERADOS:	Aumentar la recuperación de agua en los espesadores de relave
------------------------------	---


RECEPCIÓN / APROBACIÓN:			
	Nombre	Cargo	Firma

Aprobación			
Aprobación			
Aprobación			
Recepción			

Lista de Chequeo de Aplicabilidad de Administración del Cambio

CATEGORÍAS		Si / No
HSE		
1.	¿Se ve afectada la salud, seguridad del personal o de los equipos y/o la seguridad en los lugares de trabajo, etc.?	No
2.	¿El cambio con lleva a Potenciales de Fatalidad (MFL 4 o 5)?	No
3.	¿Se verán alterados los niveles de agentes contaminantes (ej. Polvo, ruido, vibración, neblina acida, etc.) hacia la salud de las personas, durante la implementación y/o operación posterior?	No
4.	¿Podría el cambio tener un impacto en las presiones, temperaturas, emisiones, vibraciones o ergonometría del lugar de trabajo?	No
5.	¿Se requerirá la implementación de equipos de protección personal adicional y/o equipo para el control agentes contaminantes, o la modificación de estos?	No
6.	¿Se agregan o modifican la ubicación de almacenamiento de sustancias peligrosas?	No
7.	¿El cambio generará una variación significativa en la generación de emisión, residuos, CO2?	No
8.	¿El cambio producirá conflicto con una regulación, estándar vigente o consideraciones contempladas en permisos solicitados?	No
Modificaciones		
9.	¿Se agregan o modifican la ubicación de potenciales puntos de derrames o fugas de sustancias peligrosas (líquidos, gases, etc.)?	No
10.	¿Se utiliza un producto con diferente composición química o propiedades físicas de cualquier material usado en el proceso actual?	No
11.	¿Se agregan nuevas sustancias al proceso y/o se cambia de proveedor de éstas?	No
12.	¿Se cambia el proveedor de un insumo crítico identificado por el área?	No
Operación v Diseño		
13.	¿Introduce nuevos equipos o algún sistema de control de estos?	Sí
14.	¿Se puede ver afectado algún proceso o equipo aguas arriba o aguas abajo con respecto a la implementación del cambio?	Sí
15.	¿Se requerirá con el cambio una revisión a los programas de mantenimiento, o será necesario agregar algo nuevo a este programa?	Sí
16.	¿Se verá afectado algún sistema de alarma o bloqueo o se requerirán nuevos sistemas de alarma y bloqueo?	Sí
17.	¿Afectará el cambio actuales procedimientos de operación, o se requerirán nuevos procedimientos?	Sí
18.	¿Se verán afectados la composición o las concentraciones de los flujos residuales a los sistemas de control de estos (ej.: riles a sistema de tratamiento de riles, aguas servidas a la planta de tratamiento, etc.)?	No
19.	¿Se introduce, altera o modifica cualquier parámetro de los límites de diseño, fuera de lo recomendado por el proveedor?	No
20.	¿El cambio altera significativamente Planos y/o Especificaciones Técnicas existentes?	No
21.	¿Las características eléctricas de los nuevos equipos introducidos, son compatibles con el sistema eléctrico existente	Sí
22.		
Estructura Organizacional		
23.	¿Ejecutar el cambio necesitará que las personas trabajen más de su jornada de trabajo? (No aplica para Jornada Excepcional)	No
24.	¿El cambio requerirá una alteración significativa a la estructura organizacional de la compañía?	No
25.	¿El cambio significa aumento, reducción o reubicación de personal?	No
26.	¿El cambio consideró la revisión del proceso de incorporación del personal? (Capacitaciones, certificaciones, evaluaciones de competencia y certificaciones)?	No

Anexo C: Minuta reunión experto en espesadores empresa FLSmidth

	Minuta de Reunión	
	Reunión experto en espesadores	

TIPO DE REUNIÓN:

Revisión para revisar mejoras y cambios que se pueden hacer a espesadores de relave de MLP

- Revisión teoría de espesamiento de relaves
- Revisión de caso de éxito y fracaso de otras faenas
- Sugerencias de implementación a espesadores de MLP

MINUTA N°: 1

LUGAR DE REUNIÓN: Vía Teams

FECHA: 11/11/2020

HORA DE INICIO: 16:00

HORA DE TÉRMINO: 17:00

PARTICIPANTES	ID.	EMPRESA	FIRMA
Francisco Reyes	FR	FLSmidth	
Andrés Araneda	AA	MLP	

°	Acuerdos, Compromisos, Reque- rimiento o Control	Responsable	Fecha compromiso	Observaciones/ Comentarios
1	Bajar la rastra hasta 0% de altura idealmente o lo que más se pueda, de manera que se compacte el relave y se tenga un mayor sólido en la descarga.	AA	31.01.2021	Se debe agregar sugerencia a informe de tesis.

°	Acuerdos, Compromisos, Reque- rimiento o Control	Responsable	Fecha compromiso	Observaciones/ Comentarios
2	Calibrar y/o reemplazar flujóme- tros y densímetros de las descar- gas de los espesadores de relave.	AA	31.01.2021	Se debe agregar sugerencia a in- forme de tesis.
3	Instalar válvulas en las descargas de los espesadores que permitan modular el flujo de descarga. De esta forma se podrá tener un mejor control.	AA	31.01.2021	Se debe agregar sugerencia a in- forme de tesis.