

Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Dr. Fernando Betancourt.
Ingeniero Supervisor
Ing. Jorge Cortinez

**DISEÑO DE ESTRATEGIA DE CONTROL PARA ESPESADORES
DE CONCENTRADO COLECTIVO,
COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI.**

Ana María Arellano Medina

Informe de Memoria de Título para optar al título de

Ingeniera Civil Metalúrgica

Septiembre, 2024

Resumen Ejecutivo

En la planta concentradora de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, se implementan dos etapas de espesamiento: la primera para concentrado colectivo, cuyo producto es enviado a las etapas de Flotación Selectiva mediante mineroductos; y la segunda para relaves, donde se recupera la mayor cantidad posible de agua, contribuyendo a la reducción del uso de agua fresca y minimizando el impacto en las comunidades cercanas, como Pica e Iquique.

El presente proyecto tiene como objetivo principal el diseño de una estrategia de control para los espesadores de concentrado colectivo, con miras a su implementación en un sistema experto que estará operativo en el año 2025. Esta estrategia busca mantener un porcentaje de sólidos en la descarga entre 60 y 65%, y disminuir la formación de espuma en los espesadores mediante la adición de un reactivo óptimo para las condiciones operativas.

Los ensayos realizados con los reactivos Antiespumante NALCO 7810® y Coagulante ICL1176L® arrojaron resultados importantes. El antiespumante logró una desestabilización efectiva de la espuma; sin embargo, se observó una disminución progresiva del porcentaje de sólidos en la descarga debido a causas operacionales, llegando a un 55,11%. Por su parte, el coagulante permitió mantener los sólidos dentro del rango deseado y, además, redujo la altura de la espuma en aproximadamente 5 centímetros en cada espesador. A partir de estos resultados, se decidió incorporar la dosificación de coagulante como una variable manipulable dentro de la estrategia de control, ajustando su dosificación en función de las necesidades operativas.

La estrategia de control se estructura en tres fases clave. La primera se orienta a evitar el embancamiento de los espesadores, mediante la monitorización continua de variables como el torque y la presión de cama. La segunda etapa se centra en asegurar el equilibrio operacional del equipo, garantizando un porcentaje de sólidos adecuado en la descarga. La tercera y última fase busca optimizar la recuperación de partículas finas, mejorar la claridad del agua recuperada y asegurar el porcentaje de sólidos, integrando variables como la turbidez, la dosificación de coagulante y la distribución granulométrica de la alimentación. Para esta última, se utiliza la instrumentación disponible en la descarga de los Vertimills. Si bien la estrategia de control aún no ha sido implementada, se han identificado oportunidades de mejora para potenciar su eficacia. Entre ellas, se recomienda la instalación de un flujómetro en la alimentación y la separación de las líneas de preparación y dosificación de floculante entre los espesadores de relaves y los de concentrado.

Abstract

In the concentrator plant of Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, two stages of thickening are implemented: the first for collective concentrate, whose product is sent to the selective flotation stages via slurry pipelines; and the second for tailings, where the maximum amount of water is recovered, contributing to the reduction of fresh water usage and minimizing the impact on nearby communities, such as Pica and Iquique.

The main objective of this project is to design a control strategy for the collective concentrate thickeners, aiming for its implementation in an expert system that will be operational in 2025. This strategy seeks to maintain a solid percentage in the discharge between 60 and 65% and reduce foam formation in the thickeners by adding an optimal reagent for the operational conditions.

The tests conducted with the antifoam NALCO 7810® and coagulant ICL1176L® yielded significant results. The antifoam achieved effective destabilization of the foam; however, a progressive decrease in the solid percentage in the discharge was observed due to operational causes, reaching 55.11%. Meanwhile, the coagulant allowed maintaining solids within the desired range and additionally reduced foam height by approximately 5 centimeters in each thickener. Based on these results, it was decided to incorporate the dosing of coagulant as a controllable variable within the control strategy, adjusting its dosing according to operational needs.

The control strategy is structured into three key phases. The first is aimed at preventing thickener blockage through continuous monitoring of variables such as torque and bed pressure. The second phase focuses on ensuring the operational balance of the equipment, guaranteeing an adequate solid percentage in the discharge. The third and final phase seeks to optimize the recovery of fine particles, improve the clarity of the recovered water, and ensure the solid percentage by integrating variables such as turbidity, coagulant dosing, and the particle size distribution of the feed. For this last phase, the available instrumentation at the discharge of the Vertimills is utilized. Although the control strategy has not yet been implemented, opportunities for improvement have been identified to enhance its effectiveness. Among them, it is recommended to install a flow meter in the feed line and to separate the flocculant preparation and dosing lines between the tailings thickeners and the concentrate thickeners.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Identificación del Problema	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo General.....	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Antecedentes	2
1.4	Línea de procesos	3
1.4.1	Espesamiento de Concentrado Colectivo – CMDIC.	5
1.4.2	Descripción de equipos: Espesadores TK20, TK21 y TK26.	5
1.4.3	Sistema de transporte de concentrado colectivo espesado	6
1.5	Espumante	8
1.6	Floculante	8
1.7	Antiespumante	8
1.8	Marco Teórico	9
1.8.1	Espesamiento	9
1.8.2	Sedimentación.....	9
1.8.3	Velocidad de Sedimentación.....	10
1.8.4	Parámetros y factores que intervienen en la separación sólido-líquido.....	10
1.8.4.1	Concentración de sólidos de alimentación	11
1.8.4.2	Distribución granulométrica de las partículas	11
1.8.4.3	pH de la pulpa.....	11
1.8.4.4	Viscosidad.....	11
1.8.5	Coagulación	12
1.8.6	Antiespumante	13

1.8.7	Componentes de un sistema experto.....	14
2	Metodología.....	17
2.1	Prueba Industrial de reactivos.	18
2.1.1	Antiespumante NALCO 7810 ®	19
2.1.2	Coagulante ICL1176L ®	20
3	Resultados.....	21
3.1	Resultados de pruebas industriales	21
3.1.1	Antiespumante NALCO 7810 ®	21
3.1.2	Coagulante 1176L ®.....	29
3.2	Análisis y Caracterización de alternativas de control disponible en Planta Concentradora. 35	
3.2.1	Estrategia de control para espesadores de relave.....	35
3.2.2	Filosofía de Operación en Espesadores de Concentrado Colectivo	37
3.2.3	Identificación de Variables de Control.....	37
3.3	Desarrollo de Estrategia de Control	40
3.3.1	Análisis de Variables de Control.....	40
3.3.2	Límites de control en variables incorporadas	47
3.3.3	Etapas de la estrategia de control para espesadores de concentrado	49
3.3.4	Activación de Alarmas.....	56
4	Conclusiones y recomendaciones	58

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación Faena Cordillera, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM.	3
Figura 2. Diagrama de procesos Planta Concentradora, Faena Cordillera CMDIC.	4
Figura 3. Diagrama de flujos en etapa de espesamiento de concentrado colectivo, CMDIC.	5
Figura 4. Diagrama de flujos para sistema de transporte de concentrado colectivo, CMDIC.	7
Figura 5. Esquema de Coagulación y Floculación (Ramirez Quirós, 2024).	13
Figura 6. Esquema de representación del balance de fuerza al interior de la fase y desbalance de fuerzas en la interfase (Trujillo, 2003)	14
Figura 7. Resultados de medición de altura de espuma durante la dosificación de Antiespumante NALCO 7810.	21
Figura 8. Turbidez durante aplicación de Antiespumante NALCO 7810®.	22
Figura 9. Concentración de sólidos de descarga durante la aplicación de Antiespumante NALCO 7810®.	23
Figura 10. Reporte de Arcillas totales durante aplicación de Antiespumante NALCO 7810.	24
Figura 11. Resultados de medición de viscosidad durante aplicación de Antiespumante NALCO 7810®.	24
Figura 12. Consumo Específico de Floculante SNF604 durante aplicación de Antiespumante NALCO 7810®.	25
Figura 13. Resultados de muestreo de altura de espuma en espesadores de concentrado colectivo con Coagulante.	29
Figura 14. Consumo Específico de Floculante SNF604 durante la aplicación de Coagulante ICL1176L®.	30
Figura 15. Concentración de sólidos de descarga durante aplicación de Coagulante ICL1176L®.	31
Figura 16. Turbidez durante aplicación de Coagulante ICL1176L.	32
Figura 17. Porcentaje de Mineral retenido bajo malla #325 reportado en la descarga de Espesadores de Concentrado Colectivo.	33
Figura 18. Porcentaje de Mineral retenido bajo malla #500 reportado en la descarga de Espesadores de Concentrado Colectivo.	33
Figura 19. Resultados de medición de viscosidad durante aplicación de Coagulante ICL1176L®.	34
Figura 20. Estrategia de control para espesadores de relaves, CMDIC.	35

Figura 21. Comportamiento de Presión de Cama y Torque frente al aumento del flujo de descarga.	40
Figura 22. Comportamiento de Esfuerzo de corte frente a la variación de Consumo específico de floculante.	41
Figura 23. Consumo específico de floculante y Porcentaje de sólidos en la descarga de espesadores de concentrado colectivo.	43
Figura 24. Floculación por puente de hidrógeno. (a) Floculación de varias partículas; (b) re- estabilización por exceso de floculante (Concha, 2001).	43
Figura 25. Efecto del exceso de dosificación de floculante en el porcentaje de sólidos de descarga.	44
Figura 26. Comportamiento de velocidad de sedimentación frente a la variación de la concentración de sólidos alimentados.	45
Figura 27. Efecto de la concentración de sólidos en la alimentación frente al porcentaje de sólidos de descarga.	46
Figura 28. Distribución granulométrica de la pulpa alimentada y su efecto en la concentración de sólidos de descarga.	47
Figura 29. Primera Etapa de Estrategia de Control para espesadores de concentrado colectivo.	50
Figura 30. Segunda Etapa de Estrategia de control para espesadores de concentrado colectivo.	51
Figura 31. Tercera Etapa de Estrategia de Control para espesadores de concentrado colectivo.	53
Figura 32. Estrategia de control adaptada para espesadores de concentrado colectivo.	55

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de espesadores de concentrado TK20, TK21 y TK26.....	6
Tabla 3. Puntos de medición en espesadores de concentrado colectivo.....	19
Tabla 4. Condición inicial de altura de espuma en espesadores de concentrado colectivo.....	19
Tabla 2. Parámetros de evaluación en pruebas industriales.	20
Tabla 5. Cronograma de prueba Coagulante ICL1176L ®.....	29
Tabla 6. Variables de Proceso Espesamiento de Concentrado Colectivo, CMDIC.....	38
Tabla 7. Rangos de control para variables de proceso en espesamiento de concentrado colectivo. .	38
Tabla 8. Límites de control para Esfuerzo de corte	42
Tabla 9. Resultados de límites de control en variables incorporadas a estrategia de control para espesadores de concentrado.	48

1 Introducción

La escasez de los recursos críticos, como la disponibilidad de agua fresca, se convierte en un principal desafío para el futuro de la industria minera a nivel mundial y, en particular para la minería chilena, que comúnmente suele desarrollarse en zonas donde predomina la escasez del recurso hídrico.

En este sentido, el espesamiento de pulpas tanto de concentrado como de relave juega un rol importante en la recuperación de agua utilizada en los procesos de concentración de minerales, favoreciendo la disminución de utilización de agua fresca y promoviendo el consumo responsable de este recurso con los ecosistemas y comunidades aledañas.

Maximizar la recuperación de agua incentiva la optimización de los procesos de espesamiento a través de la adherencia a la estabilización de las principales variables operacionales y el control exhaustivo de las variables principales en cada proceso. Un déficit en el control de parámetros claves de los procesos son factores de riesgo que podrían generar una variabilidad en las condiciones operacionales e inclusive generar impactos ambientales de grandes proporciones.

Hoy en día, en la ejecución de actividades cotidianas que permiten mantener la continuidad operacional en faena, la automatización y los sistemas de control avanzado se instauran como un apoyo en la continuidad operacional, ya que permiten optimizar los procesos y los recursos disponibles.

1.1 Identificación del Problema

En Faena Cordillera de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM, el sistema de espesamiento de concentrado colectivo no dispone de un sistema de control experto que permita mantener estable el proceso ni mucho menos garantizar su optimización. Lo que ha generado inclusive el embancamiento y rebalse de los equipos, desfavoreciendo en gran medida la recuperación de agua y la descarga de pulpa mineral dentro de los estándares de calidad establecidos. Además, en la actualidad los espesadores de concentrado colectivo presentan formación excesiva de espuma estable en la superficie, que no ha podido ser resuelta mediante el uso de aspersores. Por esto, se busca incorporar a la estrategia de control, el reactivo adecuado que permita minimizar y erradicar esta problemática.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar estrategia de control para el proceso de espesamiento de concentrado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Revisar la estrategia de control existente en el sistema experto de espesadores de relave con el fin de identificar principios operativos, variables clave y su aplicabilidad en el control de espesadores de concentrado colectivo.
- Adaptar la estrategia de control para espesadores de concentrado colectivo, ajustando los parámetros operativos y de control de acuerdo con las características particulares de este tipo de espesadores, para su futura implementación en un sistema de control experto.
- Evaluar la viabilidad de la implementación industrial de reactivos antiespumantes y coagulantes para su inclusión en la estrategia de control adaptada, considerando su impacto en la eficiencia de sedimentación y la estabilidad operativa de los espesadores.

1.3 Antecedentes

Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM (CMDIC) es una compañía minera dedicada a la extracción y producción de concentrado de cobre y molibdeno. Pertenece en un 44% a Anglo American plc, en un 44% a Glencore y en un 12% a Japan Collahuasi Resources B.V.

La actividad comercial de CMDIC inició en 1880 con la explotación de vetas de cobre-plata de alta ley. Fue en 1995 cuando los estudios de factibilidad y de impacto ambiental del Proyecto Collahuasi se aprobaron y en 1999 cuando la Compañía inauguró su operación comercial, proponiendo desarrollar su actividad industrial basándose en las políticas y prácticas de excelencia que le permitirían contribuir al desarrollo económico, al bienestar de la sociedad y el cuidado del medio ambiente.

Tal como es posible visualizar en la **Figura 1**, los emplazamientos industriales y yacimientos pertenecientes a CMDIC y catalogados como Faena Cordillera, se ubican en la Región de Tarapacá.



Figura 1. Ubicación Faena Cordillera, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM.

1.4 Línea de procesos

El proceso productivo comienza en las operaciones asociadas a la mina, específicamente en yacimiento Rosario, desde el cual se obtiene el material mediante; perforación y tronadura, carguío y transporte, chancado y sistema de transporte de material grueso a través de correas transportadoras hasta el stockpile. Desde allí, el material es transportado a la planta concentradora, en donde se somete a un segundo proceso de conminución con la finalidad de obtener el grado de liberación óptimo de las partículas de mineral.

El circuito de conminución y clasificación consta de tres líneas operativas, cada una compuesta por un molino SAG, un molino de bolas y dos baterías de hidrociclones, a partir de los cuales el material fino se alimenta al proceso de concentración por flotación y el material grueso es redirigido como carga circulante a la etapa de molienda.

La configuración del proceso de concentración por flotación se basa en 11 líneas Rougher y 3 líneas de limpieza las cuales comprenden procesos Cleaner y Scavenger. De esta etapa de flotación colectiva, el concentrado es transportado a un proceso de clasificación de tamaño compuesto por 4 baterías de hidrociclones, de los cuales, el concentrado se envía a tres espesadores de concentrado (TK20, TK21 y TK26) y las colas son recirculadas a línea de molienda distinta a la inicial, la cual se compone de 7 VertiMill.

De los espesadores de concentrado se obtiene por un lado la descarga del rebalse a través de tuberías que conducen el agua a un espesador convencional que tiene como objetivo clarificar el agua y recircular el material fino y, por otro lado, se descarga el concentrado de cobre con un porcentaje de sólidos de un rango de 60 a 65% el cual recorre 200 km a través de mineroductos hasta llegar a Puerto Patache, donde se somete a un proceso de flotación selectiva mediante el cual el mineral sulfurado de cobre se separa del mineral sulfurado de molibdeno, gracias a la adición de sulfhidrato de sodio (NaHS), obteniendo dos productos; un concentrado de cobre y un concentrado de molibdeno, los cuales se filtran hasta alcanzar un porcentaje de humedad menor al 10%, para luego ser cargados y transportados en barcos hasta el lugar de destino.

En la **Figura 2** se presenta el Diagrama de bloques del proceso de concentración realizado en Faena Cordillera.

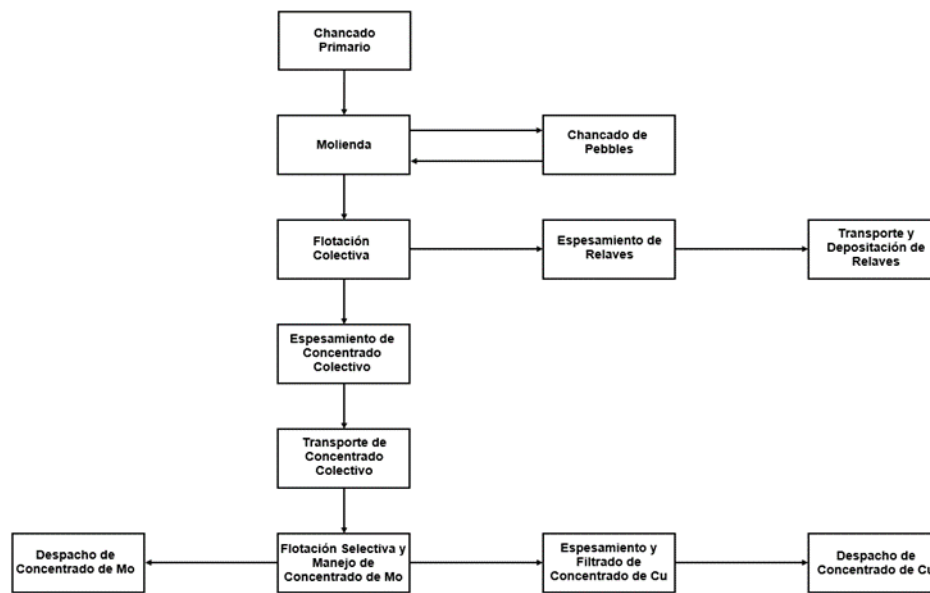


Figura 2. Diagrama de procesos Planta Concentradora, Faena Cordillera CMDIC.

1.4.1 Espesamiento de Concentrado Colectivo – CMDIC.

En el proceso de producción de concentrado de cobre y molibdeno de CMDIC, el concentrado colectivo producido en las líneas de flotación alimenta a un cajón distribuidor 170-DI-015, el cual distribuye la alimentación a tres espesadores, los cuales se identifican mediante las siglas TK20, TK21 y TK26. El concentrado alimentado por el feedwell del espesador contiene en promedio, una ley de cobre de 26%, mientras que el porcentaje de sólidos de la pulpa alimentada bordea el 22%.

La descarga del Overflow de los espesadores, es alimentada a un clarificador (TK-022), para posteriormente, recircular el agua recuperada al proceso o ser enviada de manera alternativa al cajón distribuidor 170-DI-015 que alimenta a los espesadores de concentrado.

El esquema representativo del diagrama de flujos de espesamiento de concentrado colectivo se muestra en la **Figura 3**.

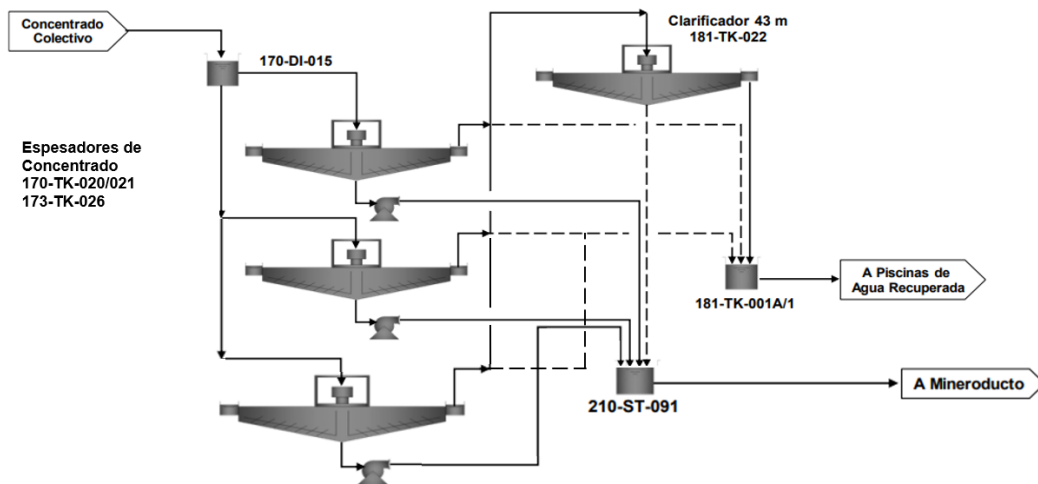


Figura 3. Diagrama de flujos en etapa de espesamiento de concentrado colectivo, CMDIC.

1.4.2 Descripción de equipos: Espesadores TK20, TK21 y TK26.

Cada espesador consta de dos puntos principales de descarga y un tercer punto que se utiliza como drenaje del equipo en casos de emergencia. Estos puntos de descarga permiten transportar caudales de concentrado entre un rango de 100 a 200 m³/h.

En la **Tabla 1**, se puede observar un desglose de las características y parámetros operacionales que son intrínsecos a los espesadores de concentrado colectivo y su operación actual.

Tabla 1. Características de espesadores de concentrado TK20, TK21 y TK26.

Parámetros	TK20, TK21, TK26
Diámetro, m	40
Diámetro Feedwell, m	2
Profundidad Feedwell, m	2,14
Altura líquido pared lateral, m	2,8
Capacidad Estanque, m ³ /h	12.791
Factor de Torque %	10-15
% Sólidos alimentación	19-22
Tratamiento concentrado diseño, t/día	2.712
%Sólidos descarga, %Nominal	60-65
Esfuerzo de corte, dyn/cm ²	< 40
Viscosidad, cP	< 15

1.4.3 Sistema de transporte de concentrado colectivo espesado

Una vez se ha espesado el concentrado a un porcentaje de sólidos entre un rango de 60-65%, se envía desde la planta concentradora hasta el Terminal Marítimo Collahuasi (Puerto Patache) ubicado en Punta Patache, a través de dos líneas; una línea de 7" y de 202 km de longitud y, una segunda línea de 8" y de 193 km de longitud.

Cuando ambos mineroductos (o concentraductos) se encuentran en operación, pueden transportar un máximo de 9054 TMS con una pulpa de aproximadamente un 64% de sólidos.

Las etapas principales del proceso que se consideran en el área de transporte de concentrado son:

- Almacenamiento en Holding Tanks Faena Cordillera
- Líneas de transporte a través de mineroductos.
- Almacenamiento en Holding Tanks Puerto Patache

En la **Figura 4.** se puede observar el Diagrama general de flujos del sistema de transporte de concentrado desde la planta concentradora ubicada en Faena Cordillera hasta Puerto Patache, lugar en el cual se procesa la pulpa de concentrado colectivo, para obtener dos productos; concentrado de cobre y concentrado de molibdeno.

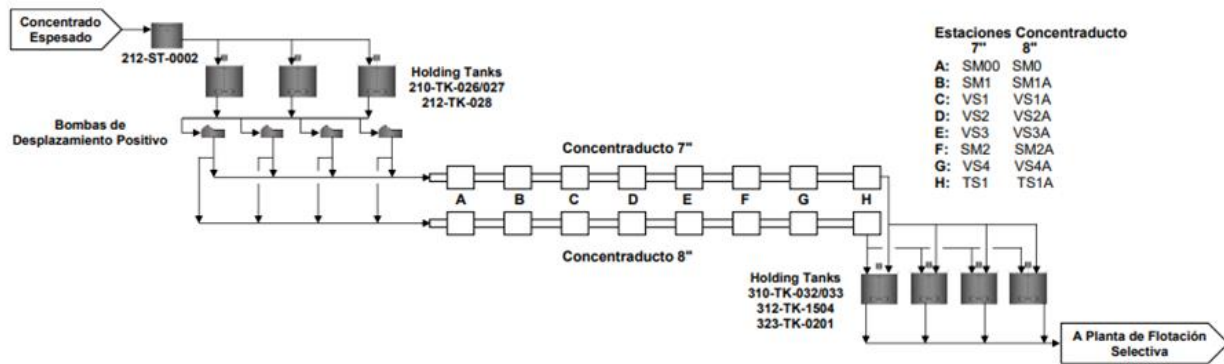


Figura 4. Diagrama de flujos para sistema de transporte de concentrado colectivo, CMDIC.

El sistema de transporte de concentrado de cobre se caracteriza principalmente por lo siguiente:

- **Posee una estación principal de bombeo** que opera simultáneamente con ambos mineroductos. Esta estación se compone de tres estanques de almacenamiento HT210 - TK026, HT210 - TK027 y HT212 - TK028, cuatro bombas de desplazamiento positivo, cada una con capacidad de 118 m³/h con una presión máxima de descarga de 24.000 kPa.
- **Mineroductos Línea 7”**: cuenta con tres estaciones de monitoreo (SM00, SM1 y SM2) a través de los cuales se puede realizar un seguimiento de los niveles de presión y flujos en las secciones claves del trayecto. Además, cuenta con dos estaciones de válvulas (VS3 y VS4), dos estaciones disipadoras (VS1 y VS2) y una estación terminal (TS1).
- **Mineroductos Línea 8”**: al igual que la Línea 7”, cuenta con tres estaciones de monitoreo (SM0, SM1A y SM2A) a través de los cuales se puede realizar un seguimiento de los niveles de presión y flujos en las secciones claves del trayecto. Además, cuenta con una estación de válvulas (VS4A), tres estaciones disipadoras (VS1A, VS2A y VS3A) y una estación terminal (TS1A).

El balance integral de agua de CMDIC se basa en el recurso hídrico solicitado según las necesidades de la planta en función de un determinado tonelaje mineral a procesar.

El principal suministro de agua fresca utilizada por CMDIC proviene de diferentes pozos de extracción que se encuentran en sector Cordillera y que se almacenan en los reservorios 501 y 502, que son los encargados de distribuir el agua fresca requerida a la planta concentradora en Faena Cordillera. Por otro lado, la planta cuenta con sistemas de espesamiento que tienen como objetivo recuperar agua contenido en las pulpas de concentrado y relaves. El agua recuperada a partir de etapas de espesamiento se dirige a piscinas, para luego ser reutilizada en el proceso.

Los límites de batería de suministro y distribución de agua abarcan desde los pozos de sector Cordillera hasta puntos de consumo, agua no recuperada de tranques de relaves, agua en concentrados y agua destinada a la reforestación.

1.5 Espumante

El espumante utilizado en las líneas de flotación se denomina Nalflote 9837P – Nalco, el cual se recepciona en estado líquido desde un camión cisterna para ser posteriormente almacenado en estanques, a partir de los cuales se distribuye mediante bombas a los puntos de adición. Estos últimos, consisten en cajones de alimentación para flotación rougher y cajones de alimentación para flotación primera limpieza.

1.6 Floculante

El floculante SNF604 es un floculante aniónico, el cual se recibe en forma de material sólido granulado, con una vida útil de cuatro años. Este se descarga en un silo y, mediante un sistema de tornillo sin fin y un soplador, es transferido a un estanque donde se prepara una solución madre de 3,5 g/t. El floculante se mezcla con agua y, posteriormente, es enviado a estanques de almacenamiento, desde donde se distribuye a los diferentes puntos de incorporación a través de bombas, después de una dilución previa en mezcladores estáticos. Cada preparación se planifica para siete días de producción, con el fin de controlar el envejecimiento del reactivo.

El floculante se adiciona en las etapas de espesamiento tanto de concentrado colectivo como de relaves, en función del tonelaje alimentado a cada proceso

1.7 Antiespumante

El antiespumante P-4000 utilizado en etapas de flotación se recepciona como material líquido en tambores, a partir de los cuales es trasvasiado a un estanque de acondicionamiento en el cual se diluye con diésel hasta alcanzar un 10% de antiespumante y un 90% de diésel.

1.8 Marco Teórico

1.8.1 Espesamiento

El espesamiento es una técnica de separación sólido-líquido que se lleva a cabo en equipos llamados espesadores, que permiten en conjunto con la incrementación del porcentaje de sólidos, recuperar agua como un producto del proceso a través de la remoción de este recurso contenido en pulpas o lodos, disminuyendo la humedad presente en dichas mezclas heterogéneas. Este concepto se basa en la ocurrencia de dos fenómenos principales y que ocurren de manera consecutiva, los cuales se denominan sedimentación y consolidación (Concha, 2001).

En el caso del espesamiento de concentrados, el principal objetivo es espesar el mineral que se colectó en forma de espuma en el proceso de flotación.

1.8.2 Sedimentación

En el fenómeno de sedimentación, tiene ocurrencia el asentamiento de una partícula en suspensión como consecuencia de una fuerza externa de cuerpo, como lo es la fuerza de gravedad, fuerza centrífuga, entre otras. Este proceso culmina cuando las partículas llegan al fondo del espesador o bien de la columna de sedimentación y comienzan a compactarse una sobre otra, dando inicio al fenómeno de consolidación.

Los principales factores que influyen en el proceso de sedimentación son: la concentración de sólidos en suspensión, la velocidad inicial de sedimentación y la densidad de flujo de sólidos. Es importante destacar que, ni la concentración de sólidos ni la velocidad son variables que definen por completo el fenómeno de sedimentación, sino que una combinación de ellas, la cual se denomina densidad de flujo de sólidos.

Cuando se trata de una suspensión de partículas, se observa que existe una obstaculización del proceso de asentamiento, puesto que, cuando una partícula se traslada de una posición a otra, interacciona con las demás partículas presentes, colisionando entre sí y desviando la trayectoria inicial de sedimentación, lo cual implica que exista. (Concha, 2001)

1.8.3 Velocidad de Sedimentación

La velocidad a la cual las partículas o la suspensión de partículas se asienta se denomina velocidad de sedimentación o velocidad terminal de sedimentación (u_{∞}) y se expresa como la tasa de flujo por unidad de área superficial en la zona de sedimentación. Por tanto, la velocidad efectiva de sedimentación tiene una estricta relación con la concentración de la suspensión ya que mientras más diluida se encuentre la pulpa, mayor será la velocidad de sedimentación de las partículas.

La velocidad inicial de sedimentación ($v_s(\varphi)$), se puede obtener midiendo la velocidad a la cual se desplaza una partícula o un conjunto de partículas desde la interfaz agua – suspensión en la sedimentación batch y considerando una porción de recta inicial.

Los principales factores que influyen en la velocidad de sedimentación son; el tamaño de la partícula, la densidad del sólido y del fluido, viscosidad del fluido y la aceleración de gravedad. Sin embargo, también existen reactivos llamados floculantes que favorecen la velocidad a la cual sedimentan las partículas, ya que su mecanismo de acción opera promoviendo y facilitando la aglomeración de las partículas, lo cual también tiene un impacto en la claridad del agua recuperada.

Según la **Ecuación (1)** de sedimentación de Stokes, la velocidad de sedimentación es directamente proporcional a la diferencia que existe entre la densidad de las partículas, el medio líquido y la aceleración gravitacional (Stokes, 1851)

$$(1) \quad v_s = \frac{(2r^2\rho_p - \rho_f)g}{9\eta}$$

1.8.4 Parámetros y factores que intervienen en la separación sólido-líquido

Existen diversos factores que determinan en gran medida la efectividad de la separación de las fases constituyentes de una mezcla heterogénea. Los parámetros más influyentes en el caso del concentrado de cobre que sale como producto de las etapas de flotación se revisarán a continuación.

1.8.4.1 Concentración de sólidos de alimentación

La concentración de sólidos en peso de la pulpa alimentada es un factor que impacta significativamente en la sedimentación y filtración. En aquellos casos en los que se tiene una concentración de sólidos alta, esto resulta ser favorable en aquellas operaciones en las que no se ha considerado la implementación de floculantes. Sin embargo, si lo que se busca es emplear un floculante en particular, es importante considerar tener concentraciones menores en la alimentación, ya que, de lo contrario, la formación de flóculos dentro del espesador se verá desfavorecida, reduciendo considerablemente la productividad. (Abara, 2019)

1.8.4.2 Distribución granulométrica de las partículas

La distribución en el tamaño de las partículas resulta un factor relevante cuando se busca la sedimentación del mineral, pues una granulometría variada favorece el cambio en la viscosidad de la pulpa. En aquellos casos en los que las partículas son muy finas, existe un doble impacto negativo en el proceso de espesamiento, pues, disminuye la velocidad de sedimentación y, además, se modifican las propiedades reológicas de la pulpa en el equipo. (Abara, 2019)

1.8.4.3 pH de la pulpa

El pH de la pulpa que se alimenta a un espesador es un factor considerado como una perturbación del sistema que se puede modificar y que toma gran relevancia cuando se adicionan reactivos como floculantes y coagulantes ya que, no todos estos reactivos están diseñados para funcionar de manera eficiente en todo el rango de pH. (Abara, 2019)

1.8.4.4 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad fundamental de los fluidos, que se puede comprender de manera más sencilla como su espesor o su resistencia a fluir libremente y a deformarse gradualmente bajo la influencia de tensiones cortantes o de tracción. En otras palabras, es la medida de la "pegajosidad" de un fluido, determinando su capacidad para fluir de manera suave o para resistirse a los cambios de forma. La viscosidad es crucial en numerosos fenómenos físicos y procesos industriales, ya que afecta la velocidad de flujo, la lubricación, la dispersión de partículas y muchas otras propiedades relacionadas con el comportamiento de los fluidos. (Ponce Herrera et al., 2023)

Según F. Concha (2001) en el caso de espesamiento de concentrados de cobre, cuando la viscosidad del líquido es demasiado alta, esto impide que las partículas en suspensión sedimenten con rapidez, debido a que se generan resistencias en las partículas sólidas, disminuyendo la razón de separación sólido-líquido, aumentando el porcentaje de humedad del sólido final.

1.8.5 Coagulación

La coagulación es un proceso mediante el cual a través del uso de un reactivo llamado coagulante se genera una desestabilización de la pulpa o lodo a través de la neutralización de las cargas eléctricas presentes, ocurre una aglomeración de partículas coloidales en suspensión, lo que permite favorecer y potenciar la sedimentación de las partículas en un espesador. En tal sentido, el principal objetivo de la coagulación es modificar las propiedades de las partículas, de modo que puedan ser removidas y separadas con mayor facilidad del medio líquido en el cual se encuentran suspendidas. Una vez que el coagulante ha desestabilizado el sistema sólido-líquido, la colisión que ocurre entre partículas, promueve el crecimiento de micro flóculos que, a su vez, dan origen a flóculos de mayor tamaño que sedimentan con mayor velocidad. (CYTEC, 2002)

La coagulación se obtiene empleando mecanismos de agitación rápida que permita una rápida difusión del coagulante empleado en el medio líquido que es objeto de tratamiento. Sin embargo, cuando ya se han formado los flóculos, se requiere disminuir la velocidad de agitación con la finalidad de evitar una posible ruptura de los flóculos conformados. (CYTEC, 2002)

Los principales factores que influyen en el proceso son; el tipo y cantidad de coagulante añadido, pH del medio líquido, temperatura, agitación y presencia de núcleos o sólidos en suspensión, tiempo de mezcla y coagulación (Ramirez Quirós, 2024).

En la **Figura 5** es posible observar una esquematización sobre el mecanismo de coagulación y floculación.

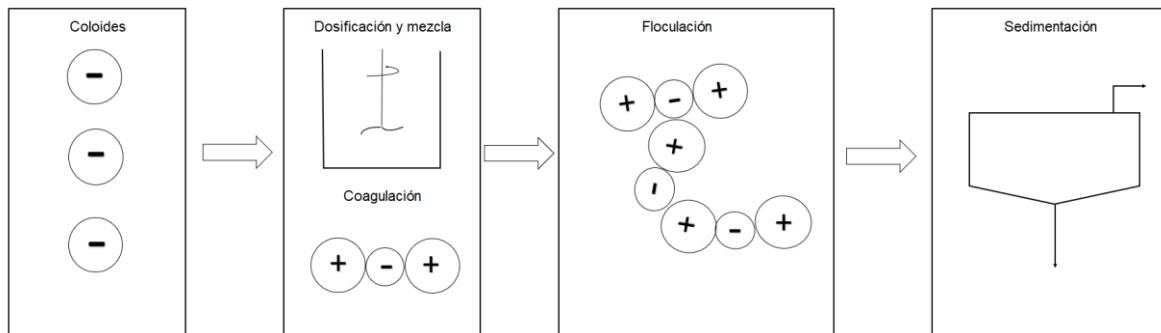


Figura 5. Esquema de Coagulación y Floculación (Ramirez Quirós, 2024).

1.8.6 Antiespumante

La formación excesiva de espuma puede ser un problema en varias etapas del proceso de producción de concentrado. Para aquellos casos, los reactivos denominados como antiespumantes se utilizan para ayudar a que las burbujas que forman parte de la espuma colapsen con mayor facilidad, minimizando la formación de espuma, lo que permite aumentar la productividad en operaciones de sedimentación.

Este tipo de reactivos, actúan modificando la tensión superficial del medio, impidiendo la formación de burbujas estables. “Por lo general, siempre que tengamos un sistema compuesto por fases, ya sean estas, líquido - gas, líquido - líquido o sólido - líquido, tendremos un plano de separación entre las dos fases. Las moléculas de ambas fases ubicadas en este plano, llamado también interfase o región interfacial, presentan propiedades diferentes a aquellas del seno de la fase. La propiedad más importante de esta región es la tensión superficial”. (Trujillo, 2003)

“La tensión superficial se puede definir como una fuerza normal al plano superficial, dirigida hacia el interior de la fase y que tiene su origen en la descompensación de fuerzas existente en las moléculas de la región superficial” (Trujillo, 2003).

En la **Figura 6** es posible observar una representación esquemática sobre el balance de fuerzas que se lleva a cabo al interior de la fase y el desbalance de estas en la interfase.

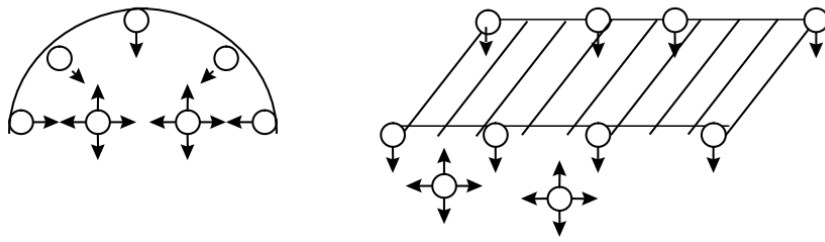


Figura 6. Esquema de representación del balance de fuerza al interior de la fase y desbalance de fuerzas en la interfase (Trujillo, 2003)

Los antiespumantes están diseñados para reducir la estabilidad de la espuma, lo que facilita la ruptura de las burbujas. Al disminuir la tensión superficial en la interfaz de la burbuja, los antiespumantes pueden promover la coalescencia, lo que puede ayudar a eliminar la espuma no deseada en sistemas de procesamiento de minerales. Este proceso es crucial para reducir el volumen de la espuma y facilitar su eliminación, ya que la coalescencia de burbujas más pequeñas en burbujas más grandes puede llevar a una rápida eliminación de la espuma de la superficie del líquido. La coalescencia debilita las películas de líquido que forman las burbujas. A medida que las burbujas se unen, las películas de líquido se estiran y pueden romperse más fácilmente, lo que contribuye a la descomposición de la espuma (Denkov et al., 2020)

1.8.7 Componentes de un sistema experto

Todo sistema experto, se constituye a través de dos componentes principales: la primera de ellas se conoce como la “base del conocimiento” en la que se encuentra el origen de la información, la cual ha sido ordenada y estructurada gracias a expertos humanos en un área de especialidad determinada. Esta información no sólo contiene datos que pueden ser obtenidos mediante una aplicación o instrumento concreto, sino que también contiene el conocimiento que le entrega validez a dichos datos a través de reglas y relaciones bien definidas y explicadas permitiendo que estos puedan ser procesados. Es así como toda base del conocimiento perteneciente a un sistema experto se conforma tanto por información efectiva como por información heurística. (Castillo et al., 1997)

La información efectiva, son todos aquellos procedimientos y métodos ya sea estandarizados o bien asociados a un área específica que son posibles de encontrar en fuentes bibliográficas, manuales, etc. Mientras que, la información heurística, es aquella que está relacionada a la experiencia humana, es decir, prácticas y juicios de un experto que se pueden obtener en un tiempo de especialización. La información heurística es difícil de encontrar en la bibliografía ya que generalmente suele transmitirse de persona a persona. (Castillo et al., 1997)

Todo sistema experto necesita algún método que permita procesar los datos y el conocimiento adquirido y, que de tal forma este facilite la obtención de respuestas y conclusiones a partir de la información adquirida. El componente utilizado por un sistema experto que permite llevar este método a cabo se denomina o conoce como “motor de inferencia”. Estos son los encargados de procesar los datos y el conocimiento administrado, manipulándolos y adecuándolos a una línea estructurada de razonamiento. Es decir, un motor de inferencia representa el análisis y procesamiento interno del sistema experto, el cual permite tomar una decisión concreta en base a la información disponible en ese instante gracias al conocimiento adquirido en etapas previas de elaboración. (Castillo et al., 1997)

Una vez se ha establecido la base de conocimiento y el motor de inferencia adecuado, es posible instaurar un bosquejo generalizado del diseño del sistema experto. Sin embargo, es de gran relevancia considerar los componentes adicionales del sistema antes de su puesta en marcha. El primero de ellos a considerar responde a la interacción del sistema con el usuario, ya que si bien el sistema experto ha sido diseñado por ingenieros y expertos en un área determinada, este debe necesariamente concebir idea de la interacción que tendrá con el usuario final, por lo tanto, es fundamental realizar una correcta traducción del conocimiento a través de lenguajes de programación, con la finalidad de que pueda ser entendido tanto por la máquina o equipo en el cual será implementado como por el usuario. Bajo esta premisa, es importante mencionar que debe existir una interfaz clara y legible para el usuario, la cual deberá tener la capacidad de obtener, analizar y entregar la información sintetizada de una manera detallada y comprensible. (Castillo et al., 1997)

Por otro lado, debe considerarse que un sistema experto debe ser pensado como un sistema que debe perdurar en el tiempo. Por lo tanto, el método de razonamiento a implementar en el sistema experto debe necesariamente ser claro y mayormente conocido, puesto que esto le permitirá poder ser modificado con facilidad en el futuro, según sea la necesidad de la operación y/o nuevos factores externos que sean de relevancia para el resultado esperado por el usuario en ese instante. A estas modificaciones en el diseño original de un sistema experto se le denomina como “Adquisición de Conocimiento”. (Castillo et al., 1997)

Otro de los componentes fundamentales en un sistema experto es el “Control de Coherencia” el cual está integrado en la programación del sistema. El control de coherencia es capaz de identificar y reconocer eventuales inconsistencias tanto en los datos como en el conocimiento que, de no existir este componente de control, puedan dar lugar a potenciales resultados insatisfactorios. En otras palabras, todo sistema experto debe ser capaz de evitar y actuar premeditadamente ante la integración de información y conocimiento contradictorio en la interacción con el usuario, con el objetivo de prevenir la obtención de resultados o conclusiones erróneas y acciones contraproducentes.

El último componente importante de un sistema experto a señalar se conoce como “Subsistema de Ejecución de Órdenes”, que tiene como función llevar a cabo acciones determinadas en base a las conclusiones obtenidas por el sistema experto. Este mecanismo permite transformar los resultados obtenidos de los datos y el conocimiento en acciones concretas. (Castillo et al., 1997)

2 Metodología

La metodología empleada en las pruebas industriales de los reactivos para bajar la espuma presente en los espesadores de concentrado colectivo tiene como finalidad escoger el reactivo óptimo para la operación y que pueda ser incorporado en la estrategia de control, lo cual se explicará con mayor detalle en la **Sección 2.1**.

Por otro lado, la metodología empleada para desarrollar el diseño de la estrategia de control se compone de dos etapas principales.

La primera de ellas se basa en el análisis y la caracterización de los objetivos clave, agrupando aquellos que permitieron desarrollar una base de conocimiento integral y que abarcara todos los parámetros relevantes para la correcta operación de los espesadores de concentrado colectivo. En este contexto, para llevar a cabo el análisis se realizaron los estudios e investigaciones necesarios para obtener tanto información heurística como datos efectivos, según lo descrito en la **Sección 1.8.7**.

En lo que respecta a la información efectiva, se llevó a cabo una comparación y evaluación de las alternativas de control disponibles en la planta concentradora. Este análisis se enfocó en la operación de los distintos tipos de espesadores, incluyendo los espesadores de alta capacidad (HRT), utilizados para espesar relaves, y los espesadores convencionales, destinados al espesado del concentrado colectivo. Respecto al conocimiento heurístico, se efectuó un análisis exhaustivo de las "Filosofías de Operación" empleadas por los operadores de la sala de control, responsables de la operación de espesadores de concentrado colectivo y de relaves. El concepto de Filosofía de Operación se refiere a las acciones y procedimientos implementados por los operadores para mantener el control de los equipos dentro de los rangos operativos permitidos para cada variable de control.

Para llevar a cabo la caracterización, fue fundamental identificar todas las variables de proceso involucradas tanto en la operación de los espesadores de relaves como en los de concentrado colectivo. Este enfoque permitió adaptar la estrategia de control utilizada en los espesadores de relaves para su aplicación en los espesadores de concentrado, asegurando una operación óptima y ajustada a las condiciones específicas de cada equipo.

La segunda etapa se enfoca en el desarrollo de la estrategia de control. Este proceso incluye el análisis detallado de las variables identificadas en la etapa anterior, con el objetivo de organizar el conocimiento adquirido y elaborar una estructura de razonamiento clara. Dicha estructura consiste en una secuencia de reglas lógicas que conforman el motor de inferencia del sistema. Estas reglas están basadas tanto en el comportamiento de las variables y sus interrelaciones, como en la experiencia de los operadores y los procedimientos establecidos para la operación de los equipos. Además, el desarrollo de la estrategia de control contempla la identificación de situaciones específicas que pueden surgir durante la operación del espesador. Estas eventualidades se incorporan en la estructura diseñada para asegurar una respuesta efectiva ante variaciones operativas.

2.1 Prueba Industrial de reactivos.

La situación actual de los espesadores de concentrado colectivo motivó la realización de pruebas con antiespumante y coagulante para evaluar el comportamiento de los parámetros críticos del proceso y la respuesta de la espuma excesiva en la superficie del equipo frente a estos reactivos y la sedimentación de partículas finas presentes en el sistema. Si bien ambos reactivos tienen funcionamientos y propósitos diferentes, el objetivo era identificar el reactivo que ofreciera mayores beneficios para su posible integración en la lógica de control del sistema experto que se implementará.

Cabe destacar que la naturaleza química de ambos reactivos es desconocida, por lo que su evaluación se centrará en que no existan desviaciones significativas en los parámetros operacionales más relevantes.

Los reactivos evaluados fueron el Antiespumante NALCO 7810 y el Coagulante ICL1176L. Durante los días de prueba, se monitorearon variables clave del proceso, como la velocidad de sedimentación, el esfuerzo de corte de la pulpa espesada, y los porcentajes de sólidos tanto en la descarga como en la alimentación.

Los equipos en servicio durante las pruebas fueron TK-20, TK-21 y TK-26. El punto de dosificación se determinó de manera estratégica, definiéndose la adición de los reactivos en la canaleta de concentrados, antes del cajón distribuidor DI-015. Este posicionamiento permite un tiempo de acondicionamiento adecuado antes de ingresar a los equipos. Las muestras fueron tomadas desde el cajón distribuidor DI-015 y desde los puntos de muestreo disponibles en la descarga de cada espesador.

2.1.1 Antiespumante NALCO 7810 ®

El reactivo Antiespumante NALCO 7810 ® tiene como propósito disminuir la estabilidad de la espuma.

Para tener una idea y visualización clara de la espuma dentro de los espesadores de concentrado, se realizaron mediciones de altura de espuma a distintas distancias desde el feedwell, según se especifica en la *Tabla 3*.

Tabla 2. Puntos de medición en espesadores de concentrado colectivo.

Distancia, m	Equipos
6,7	TK-20, TK-21, TK-26
12,3	TK-20, TK-21, TK-26
17,5	TK-20, TK-21, TK-26

En la **Tabla 4**. se observan las condiciones iniciales en cuanto al nivel de espuma en los espesadores de concentrado, la cual servirá como base de comparación para los resultados obtenidos a partir de las pruebas industriales con ambos reactivos.

Tabla 3. Condición inicial de altura de espuma en espesadores de concentrado colectivo.

Distancia Equipo	6,7 m	12,3 m	17,5 m
TK-20	31 cm	27 cm	16 cm
TK-21	22 cm	15 cm	15 cm
TK-26	35 cm	26 cm	26 cm

2.1.2 Coagulante ICL1176L®

Es importante destacar que el Coagulante ICL1176L® tiene como finalidad mejorar la sedimentación de las partículas finas.

Previamente, se establecieron los parámetros de evaluación con el propósito de contrastar los resultados obtenidos con ambos reactivos a través de pruebas de sedimentación y reología del concentrado espesado, cuyos resultados se presentan en la **Tabla 2**.

Tabla 4. Parámetros de evaluación en pruebas industriales.

Ensayo	Parámetro
Sedimentación de pulpa	%Sólido de alimentación
	Velocidad de sedimentación m/h
	Turbidez NTU
Reología de Concentrado Espesado	Viscosidad cP
	%Sólido de descarga
	Granulometría -#325%
	Granulometría -#500%

Las pruebas de sedimentación se realizan en un equipo llamado *Sedirack*, el cual tiene como principal objetivo la medición instantánea de las variables principales de espesamiento. Este equipo permite hacer cinco ensayos simultáneos. Por su parte, las pruebas de reología de concentrado espesado se llevan a cabo a través de un *Viscosímetro IQ*, que permite evaluar el comportamiento reológico de la pulpa, mediante la lectura de viscosidad y esfuerzo de corte.

3 Resultados

3.1 Resultados de pruebas industriales

En la siguiente sección se detallan los resultados obtenidos a partir de las pruebas industriales realizadas con Antiespumante NALCO 7810 ® y Coagulante ICL1176L®.

3.1.1 Antiespumante NALCO 7810 ®

El objetivo principal de esta prueba es mantener evaluar su eficacia en la disminución de la sobre espumación en los espesadores. El control durante esta prueba se basa en la altura de la espuma y que el porcentaje de sólidos de la pulpa descargada se mantenga dentro de un rango preestablecido, teniendo en cuenta que este reactivo no debería tener incidencia en este último parámetro mencionado. La prueba tuvo una duración de 120,7 horas, equivalente a 5,03 días. La estrategia de dosificación propuesta por NALCO estipula 24 horas de acondicionamiento del reactivo dentro de la operación, con una dosificación inicial de 75 g/t. Posteriormente, la dosificación se redujo a una tasa de 25 g/t.

De los resultados obtenidos de la medición de altura de espuma, se observa a partir de la **Figura 7**, que existió una pequeña disminución durante la aplicación de antiespumante.

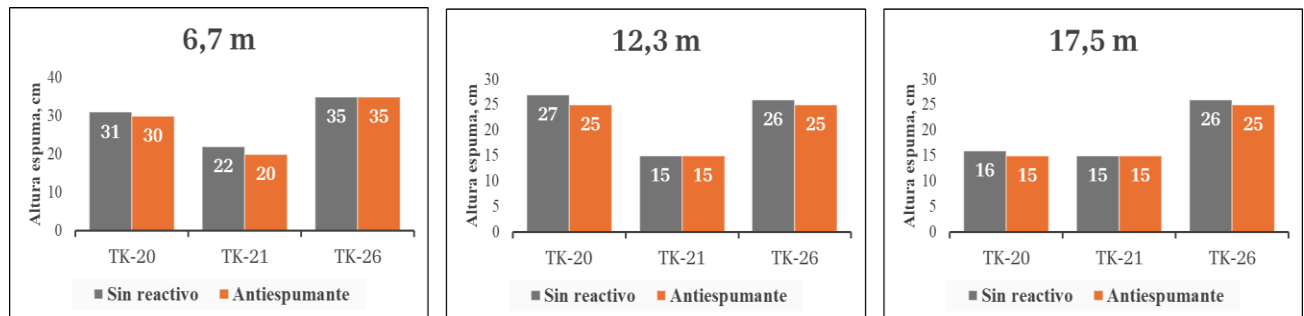


Figura 7. Resultados de medición de altura de espuma durante la dosificación de Antiespumante NALCO 7810.

A partir de los resultados obtenidos de la medición de la altura de la espuma, como se muestra en la **Figura 7**, se observó una ligera disminución durante la aplicación del antiespumante. Esta reducción marginal en la altura de la espuma podría indicar que el reactivo no es completamente compatible con las características químicas del sistema.

Es posible que la composición del antiespumante no interactúe de manera eficiente con los componentes presentes en la pulpa, como las arcillas o los floculantes en exceso, que pueden estar estabilizando la espuma por mecanismos electrostáticos o estéricos. Asimismo, el alto contenido de sólidos finos en el sistema puede estar interfiriendo con la acción del antiespumante, reduciendo su efectividad al crear una capa protectora alrededor de las burbujas.

En este contexto, sería recomendable evaluar la compatibilidad química del antiespumante con el sistema, considerando tanto las características mineralógicas como las condiciones operacionales, para determinar si es necesario ajustar la formulación del reactivo o implementar un enfoque complementario para mejorar su eficacia en la reducción de la espuma.

Durante la aplicación del reactivo, se observó un debilitamiento visible de la espuma al activar los aspersores perimetrales.

Se registraron ciertas alzas en la turbidez de las aguas de rebose por sobre los 200 NTU (**Figura 8**) y una disminución significativa en el porcentaje de sólidos en la descarga (**Figura 9**).

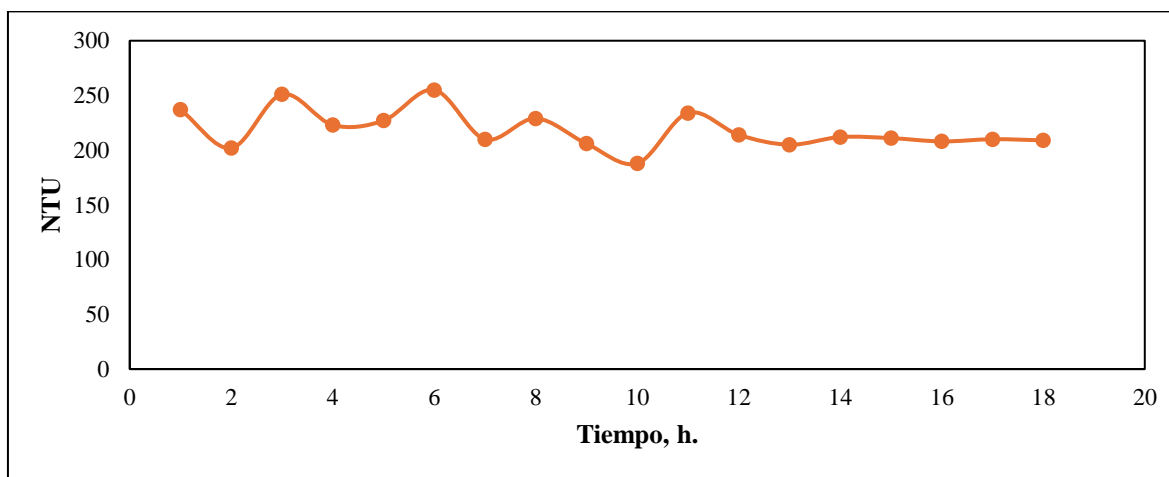


Figura 8. Turbidez durante aplicación de Antiespumante NALCO 7810®.

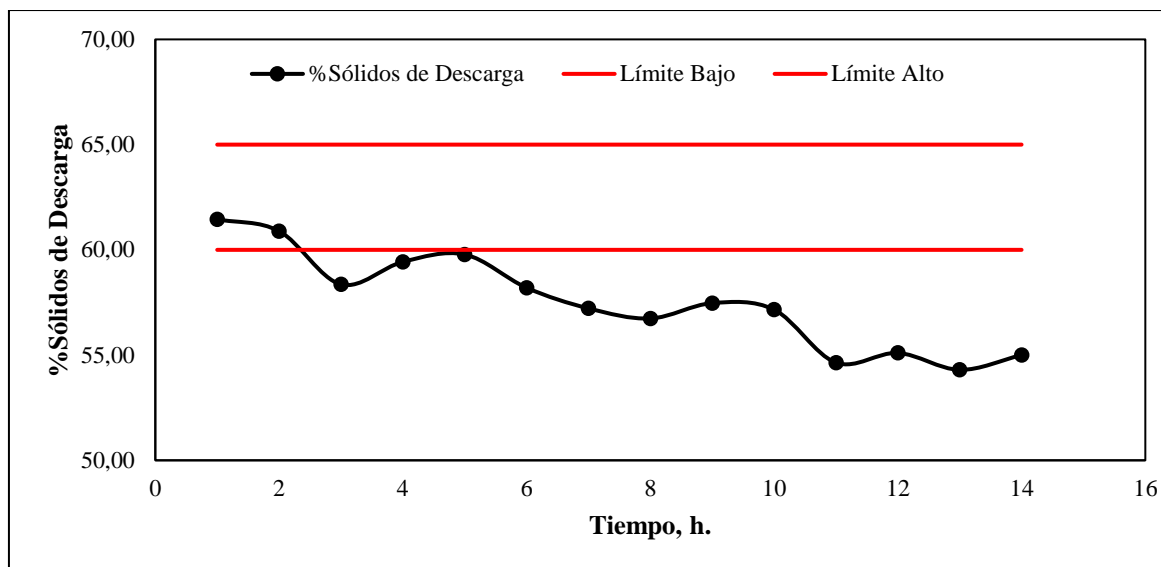


Figura 9. Concentración de sólidos de descarga durante la aplicación de Antiespumante NALCO 7810 ®.

Esta disminución progresiva en la concentración de sólidos en la descarga constituyó la principal razón para detener la prueba industrial. Si bien, el antiespumante no tiene incidencia en este parámetro, resulta importante analizar las posibles causas operacionales que puedan haber influido en esta disminución.

Del análisis de los parámetros operacionales que pudieron influir en la disminución de la concentración de sólidos en la descarga se detectó que, durante los días de prueba, hubo un incremento en la proporción de arcillas en el mineral alimentado a la planta. La mayor proporción de arcillas se presenta en las fases B10, B11 y B16. Estos resultados se pueden apreciar en la **Figura 10**.

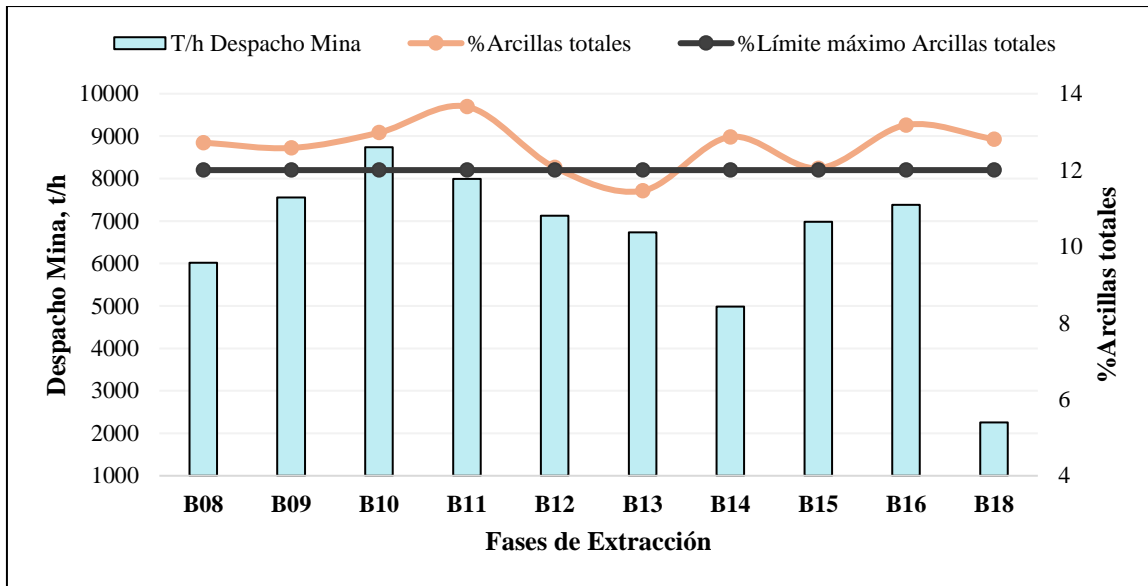


Figura 10. Reporte de Arcillas totales durante aplicación de Antiespumante NALCO 7810.

En la **Figura 11**, se observa el comportamiento de la viscosidad durante el día en que se registró un aumento considerable en el contenido de arcillas totales en el mineral alimentado a la planta concentradora. Se distingue un aumento considerable, sobrepasando el límite establecido para espesadores de concentrado colectivo, lo cual fue detallado en la **Sección 1.4.2**.

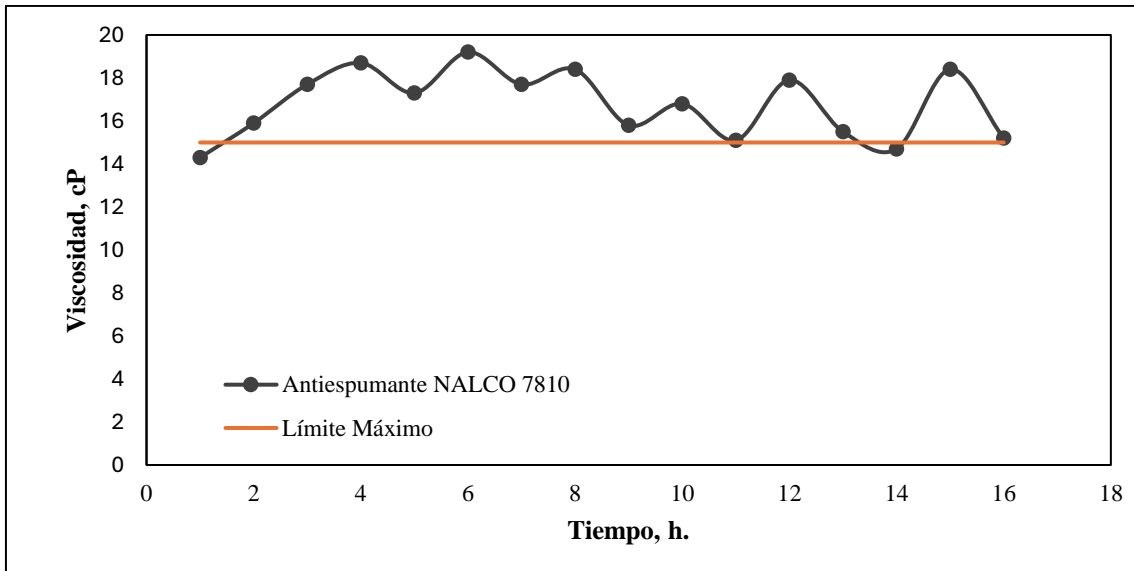


Figura 11. Resultados de medición de viscosidad durante aplicación de Antiespumante NALCO 7810®.

En base a lo expuesto anteriormente, es importante resaltar que las arcillas se distinguen por su presentar microporos en su estructura, lo que les otorga una elevada capacidad de retención de agua. Esta particularidad les confiere la capacidad de alterar las características reológicas de la pulpa. En este contexto, un alto contenido de arcillas en la pulpa podría incrementar su viscosidad, lo que complicaría la sedimentación de los flóculos, afectando así la eficiencia del proceso, obteniendo una disminución en el porcentaje de sólidos de descarga. (Wills y Napier-Munn, 2006)

Otro de los hallazgos relevantes fue la dosificación excesiva de floculante, como se puede apreciar en la **Figura 12**.

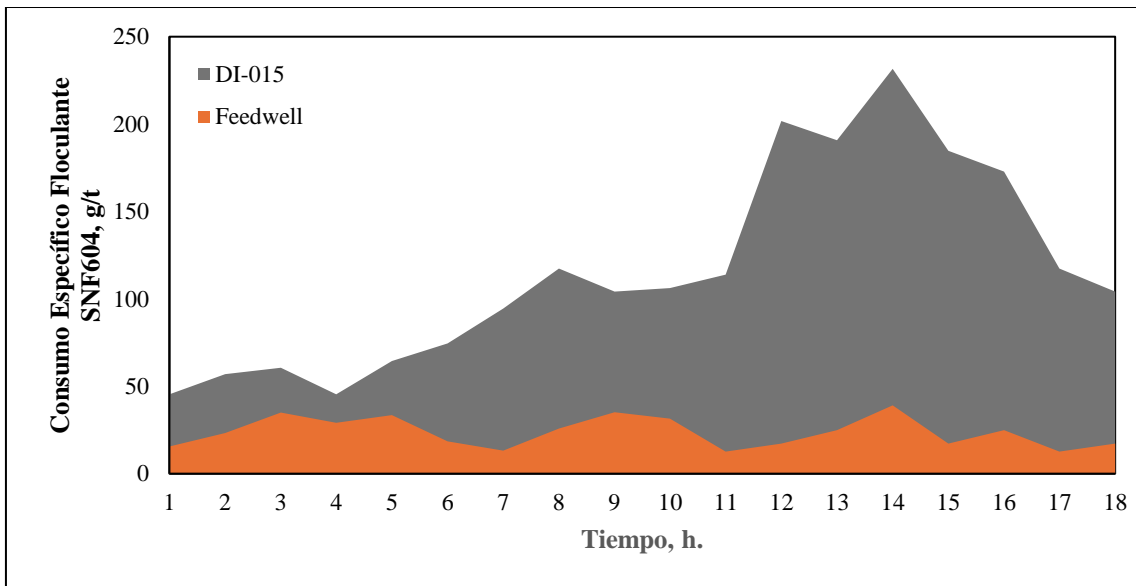


Figura 12. Consumo Específico de Floculante SNF604 durante aplicación de Antiespumante NALCO 7810®.

Esta dosificación excesiva se observó con mayor intensidad en el punto de adición ubicado en el cajón distribuidor DI-015, donde se alcanzaron valores superiores a 200 g/t, lo que pudo haber afectado significativamente la operación del sistema de sedimentación.

En cuanto al antiespumante, si bien se desconoce su naturaleza química, el análisis que se presentará a continuación se reducirá a los efectos que podría presentar el sistema en las condiciones presentadas.

El uso de antiespumantes en un espesador de concentrado con pulpas minerales que contienen alto contenido de arcillas puede tener efectos diversos. Si bien, los espesadores no están diseñados para manejar espumas como una celda de flotación, la presencia de estas puede interferir en su funcionamiento, por lo que el uso de antiespumante puede ser relevante en ciertos casos en los que, como este, la espuma presenta gran estabilidad.

En un estudio realizado por V. Georgiev et al., en el año 2023 se evaluó el comportamiento de un antiespumante en soluciones aniónicas, no iónicas y de PVA utilizando tres métodos de espumación distintas (prueba de Bartsch, prueba de agitación y Ultra Turrax), empleando distintas concentraciones de antiespumante, el cual se probó disperso en disolvente orgánico y como una emulsión de antiespumante y agua. Los resultados obtenidos indicaron que en general, la eficiencia del antiespumante depende del tipo de fuerzas que operan para la estabilización de la espuma: el antiespumante es mucho más eficiente para espumas estabilizadas estéricamente y mucho menos eficiente para espumas estabilizadas electrostáticamente.

En el año 2008, C. Luna y R. Mendoza observaron que a nivel coloidal existen dos tipos de estabilización; electrostática y estérica. “A grandes rasgos, la estabilización de las partículas en una suspensión coloidal consiste en el recubrimiento o encapsulado de cada partícula por medio de la adsorción de iones o moléculas, denominados ligandos. Los ligandos más adecuados para estabilizar las nanopartículas en solventes polares son iones (o a veces moléculas muy polares) que al ser adsorbidos proporcionan una carga eléctrica a la superficie de cada partícula. Estas cargas eléctricas atraen a las cargas opuestas que se encuentren en el entorno de la partícula, y generan un potencial de Coulomb, suficientemente intenso como para evitar la aglomeración de las partículas. En cambio, si el solvente no es polar, la aglomeración y coalescencia de los coloides o nanopartículas puede evitarse con la adsorción de moléculas largas de ácidos orgánicos, tioles, polímeros o aminas. Estos estabilizadores reducen la alta tensión superficial de las partículas en suspensión y las proveen de una barrera estérica que las separa entre sí” (Luna y Mendoza, 2008)

Con base en las características y condiciones del estudio, se puede anticipar que, en este caso, la eficiencia del antiespumante podría ser menor, ya que la estabilidad de la espuma parece estar más relacionada con factores electrostáticos. Esto podría deberse a las siguientes posibles razones:

- Las partículas presentes en la pulpa tienen una carga superficial asociada, por lo que se esperaría que la estabilidad de esta espuma pueda depender de las interacciones electrostáticas entre ellas, ya que las repulsiones entre partículas cargadas pueden contribuir a mantener la espuma estable.
- El floculante que se dosifica es de carácter aniónico, por lo que, al interactuar con las partículas, también pueden afectar las cargas superficiales de estas últimas, promoviendo una mayor repulsión electrostática. Esto puede resultar en una espuma más estable, ya que las cargas similares entre las burbujas y las partículas pueden mantenerlas separadas y evitar la coalescencia.
- En condiciones de alta turbulencia o agitación, como puede ser el caso en un espesador, las interacciones electrostáticas tienden a dominar sobre las estéricas, ya que estas últimas dependen más de la presencia de capas de adsorción que podrían ser difíciles de mantener en un sistema agitado.

En este sentido, pensando que la estabilidad de la espuma se acota a características electrostáticas del medio, se hace pertinente pensar en cómo el alto contenido de arcillas en el mineral, el exceso de floculante y la dosificación de antiespumante pueden afectar la sedimentación.

Como se ha mencionado y también fue posible observar a partir de las figuras presentadas anteriormente, las arcillas pueden haber ocasionado el aumento en la viscosidad de la pulpa. Una pulpa más viscosa requiere más tiempo para que los sólidos se asienten, lo que podría conllevar a una disminución de la concentración de sólidos en la descarga. Dado que existe un exceso de dosificación de floculante en el sistema, es posible pensar que estos flóculos pueden ser difíciles de sedimentar debido a la alta viscosidad de la pulpa, lo que ralentiza el proceso de sedimentación. Además, es posible pensar que esta dosificación excesiva pueda formar flóculos de mayor tamaño, pero de mayor inestabilidad en su estructura, lo que podría provocar que puedan desintegrarse al interactuar con la pulpa viscosa, generando partículas más pequeñas que son menos eficientes en la sedimentación.

Desde esta perspectiva, es posible suponer que la adición de antiespumante puede estar influyendo en la reología de la pulpa, ya que, al desestabilizar la espuma, también puede influir en cómo las partículas se agregan o dispersan en el sistema. Si el antiespumante aumenta la dispersión de las partículas finas, la viscosidad de la pulpa podría incrementarse aún más, lo que dificultaría aún más la sedimentación y reduciría la eficiencia del espesador.

Por otro lado, es posible suponer que debido a que las partículas de arcilla en la pulpa tienen una gran área superficial específica debido su alta capacidad para retener agua en sus microporos, es posible pensar que también pueden adsorber una cantidad significativa de floculante. Esto podría llevar a una reducción de la cantidad de floculante disponible para aglomerar otras partículas, lo que resultaría en flóculos más débiles o menos efectivos. Al añadir un antiespumante, que a menudo contiene componentes hidrofóbicos o surfactantes, la interacción de estos reactivos con las partículas finas podría desestabilizar los flóculos aún más, impidiendo la aglomeración de las partículas. Si los flóculos se desestabilizan o no se forman correctamente, las partículas finas pueden permanecer suspendidas por más tiempo en la pulpa, lo que reduciría la eficiencia de la sedimentación y aumentaría la concentración de sólidos finos en el rebose, lo que podría explicar los resultados obtenidos en la medición de turbidez del agua recuperada de los espesadores.

Si bien la prueba tuvo que ser detenida debido a que se observó una disminución consecutiva en el contenido de sólidos de descarga, lo cual puede estar más bien asociado al contenido de arcillas en el sistema, el antiespumante si presentó beneficios en cuanto a la disminución de la estabilidad de la espuma a pesar de que esta no haya disminuido considerablemente su altura durante el tiempo de prueba. Sin embargo, se determinó que no es el reactivo adecuado a incorporar en la estrategia de control.

3.1.2 Coagulante 1176L®

Esta prueba se llevó a cabo con el objetivo principal de evaluar la eficiencia del reactivo en la mejora del proceso de espesamiento de concentrados, en particular, disminuyendo el nivel y la estabilidad de la espuma existente en la superficie de los equipos TK20, TK21 y TK26.

La prueba se definió en cuatro etapas las cuales fueron recomendadas por el proveedor, cuya duración y dosificación se detallan en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Cronograma de prueba Coagulante ICL1176L®.

Etapa	Duración	Dosificación g/t Coagulante IC1176L
1	5 días y 22 horas	3 – 5
2	10,5 horas	6
3	19 horas	4
4	36 días y 4 horas	7 – 10

Con relación al muestreo realizado para cuantificar la altura de la espuma, al implementar coagulante se observó una disminución de 5 cm en promedio respecto tanto a las condiciones iniciales como a lo obtenido luego de implementar antiespumante. Los resultados de esta medición se encuentran en la **Figura 13**.

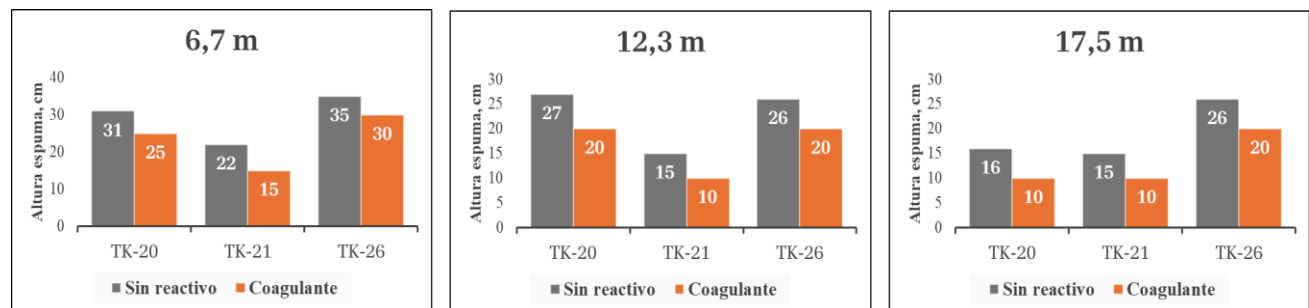


Figura 13. Resultados de muestreo de altura de espuma en espesadores de concentrado colectivo con Coagulante.

Si bien el coagulante no tiene como objetivo principal reducir la altura de la espuma en el espesador, se observaron resultados positivos en relación con esta problemática. Esto podría deberse principalmente a varios factores, entre ellos:

- La adición de coagulante puede haber alterado o modificado la tensión superficial del sistema, lo que facilita la ruptura de las burbujas de aire y reduce la estabilidad de la espuma.
- Al favorecer la coagulación y sedimentación de partículas finas, el coagulante puede haber reducido la cantidad de sólidos finos que normalmente contribuyen a estabilizar la espuma, disminuyendo así su persistencia.

Estos resultados sugieren que, aunque el coagulante no está diseñado específicamente para atacar el problema de la espuma, su aplicación puede generar efectos secundarios positivos, mejorando tanto la sedimentación como el control de la espuma en el espesador.

A diferencia de las condiciones dadas durante la realización de la prueba industrial de antiespumante, el consumo específico de floculante se mantuvo dentro de rango. Tal como se puede apreciar en la **Figura 14**.

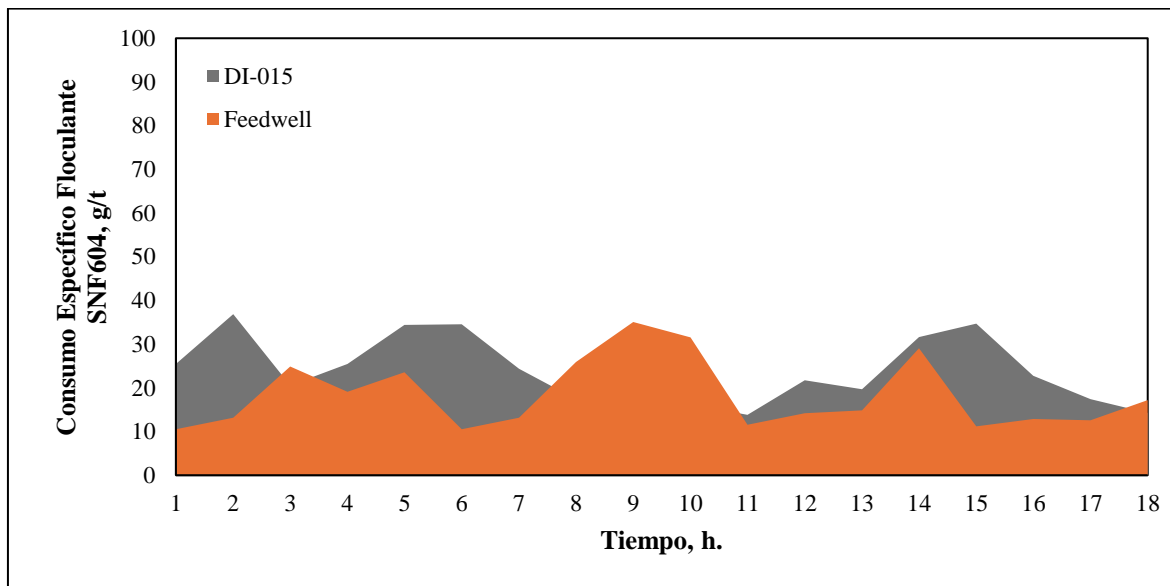


Figura 14. Consumo Específico de Floculante SNF604 durante la aplicación de Coagulante ICL1176L ®.

Mantener la dosificación óptima de floculante permite que el proceso de sedimentación se desarrolle dentro de los parámetros operacionales adecuados, favoreciendo la formación de flóculos eficientes y facilitando la separación de sólido-líquido en los espesadores. Esto asegura una mayor eficiencia en la sedimentación, evitando la formación de flóculos demasiado grandes e inestables que puedan desintegrarse o dificultar el proceso.

Respecto al porcentaje de sólidos de descarga, este se mantuvo dentro de los rangos esperados tal como se puede observar en la **Figura 15.**, lo anterior se considera como un comportamiento beneficioso para el proceso, ya que indica que el reactivo utilizado es efectivo para aumentar el contenido de sólidos en la descarga sin comprometer o significar riesgo de embancamiento debido a las propiedades de la pulpa espesada. El aumento en el porcentaje de sólidos se traduce en una mayor eficiencia del proceso de espesamiento, lo cual es crucial para la optimización del circuito.

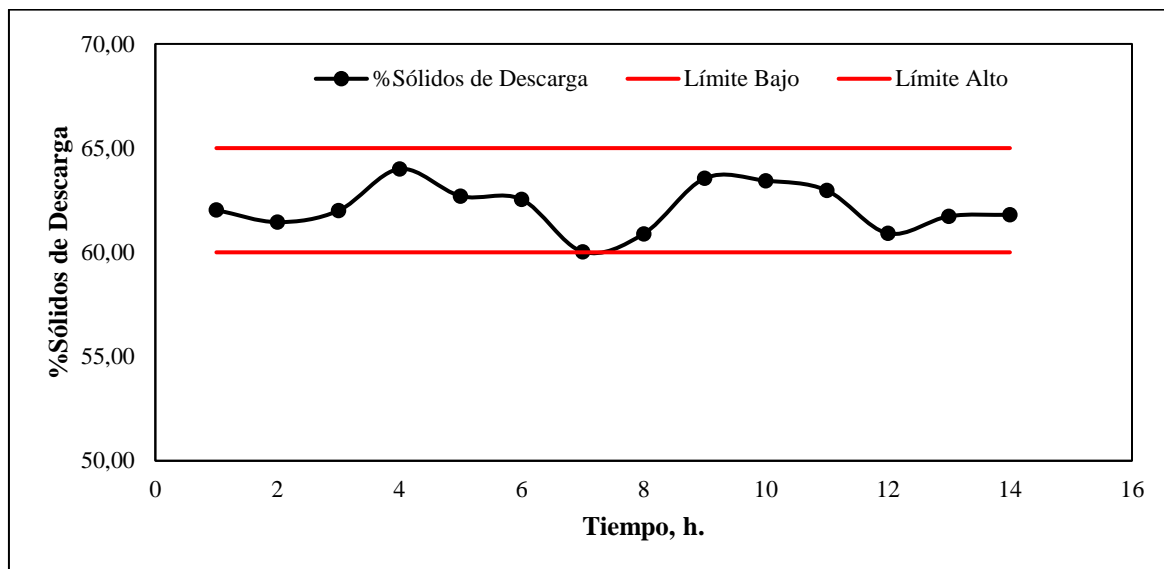


Figura 15. Concentración de sólidos de descarga durante aplicación de Coagulante ICL1176L ®.

Durante la aplicación del reactivo se observó una disminución paulatina en la turbidez (**Figura 16**)

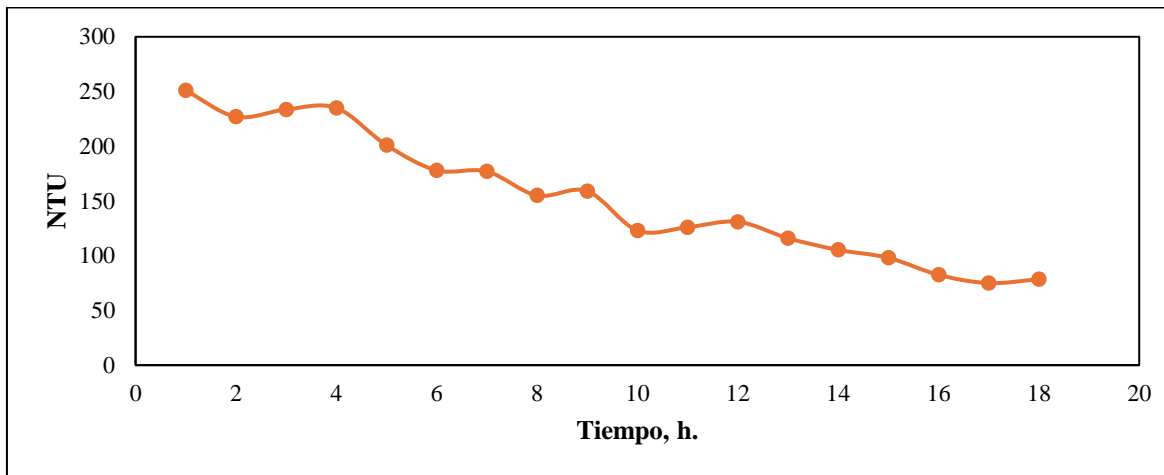


Figura 16. Turbidez durante aplicación de Coagulante ICL1176L.

Este comportamiento podría sugerir que una menor proporción de partículas en suspensión está siendo arrastrada en el sistema. Este comportamiento indica una mejora en la clarificación del líquido, lo cual puede atribuirse a una sedimentación más eficiente de las partículas finas, posiblemente favorecida por la acción combinada del coagulante y otros reactivos.

Esta reducción en la turbidez no solo es indicativa de una menor cantidad de sólidos en el rebose, sino que también sugiere un funcionamiento más eficiente del espesador, ya que la mejora en la clarificación contribuye a optimizar la separación sólido-líquido y reducir las pérdidas de material valioso en las corrientes de rebose.

Otro aspecto relevante observado en el proceso fue el contenido de mineral fino reportado en la descarga. En la **Figura 17** y **Figura 18**, se evidencia que durante la aplicación de coagulante se registró un aumento en la cantidad de mineral fino (-#325 y -#500) en la descarga. Este incremento puede estar estrechamente relacionado con el funcionamiento del coagulante, lo cual sugiere que ha facilitado la sedimentación de partículas finas, lo que es beneficioso para el proceso.

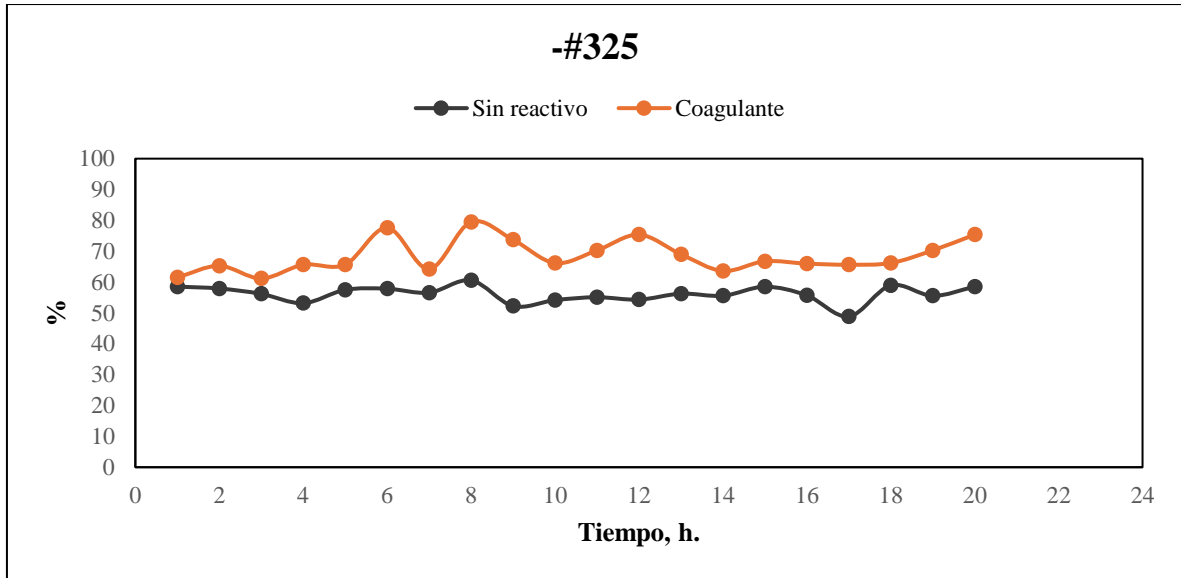


Figura 17. Porcentaje de Mineral retenido bajo malla #325 reportado en la descarga de Espesadores de Concentrado Colectivo.

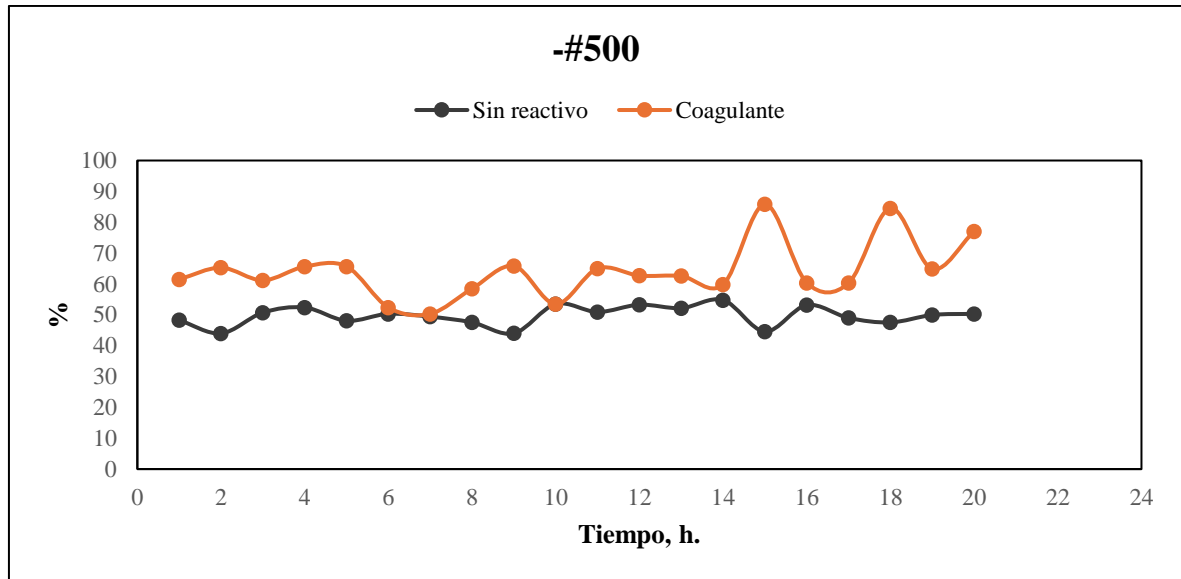


Figura 18. Porcentaje de Mineral retenido bajo malla #500 reportado en la descarga de Espesadores de Concentrado Colectivo.

La presencia de partículas ultrafinas en el sistema es comúnmente un desafío en la separación sólido-líquido, ya que estas tienden a permanecer suspendidas en la pulpa debido a su baja masa y a las fuerzas electrostáticas. El aumento en su sedimentación durante la aplicación del coagulante puede indicar que el reactivo ha sido efectivo en reducir estas fuerzas de repulsión electrostática, favoreciendo la agregación de las partículas y su posterior sedimentación.

No obstante, es importante seguir monitoreando este comportamiento, ya que una mayor cantidad de mineral fino en la descarga también puede afectar la viscosidad de la pulpa y el desempeño global del espesador. Si bien la mejora en la sedimentación de partículas finas es positiva, un aumento excesivo en el contenido de sólidos finos en la descarga podría generar problemas en las etapas posteriores del proceso, como la filtración. Sin embargo, durante los días de evaluación de coagulante, se puede observar a partir de la **Figura 19** que la viscosidad se mantuvo por debajo del límite máximo permitido

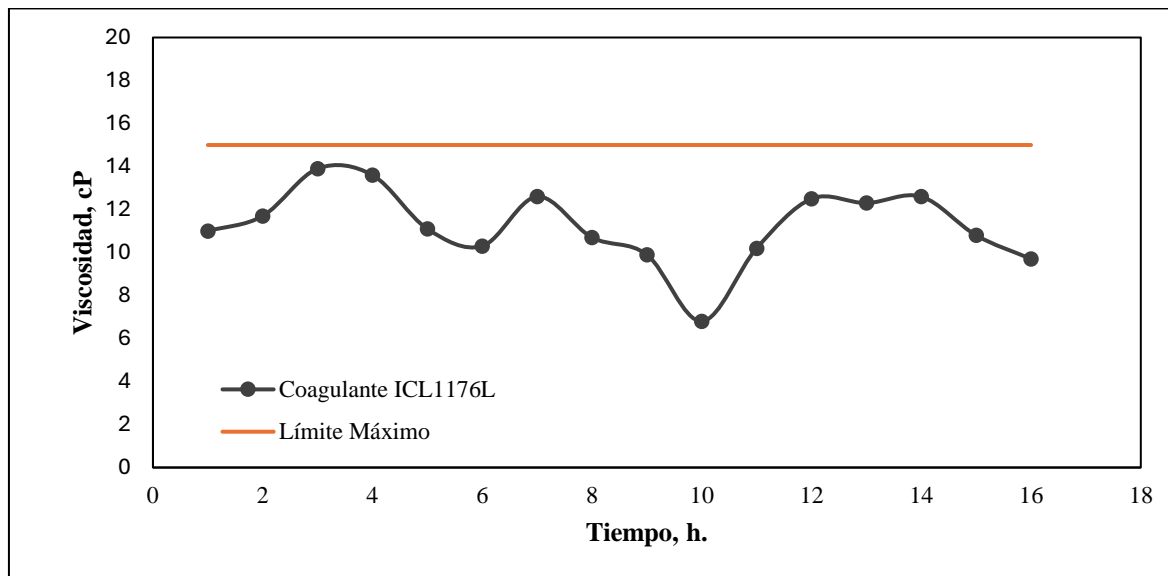


Figura 19. Resultados de medición de viscosidad durante aplicación de Coagulante ICL1176L ®.

En este contexto, el uso del coagulante ha demostrado ser beneficioso, ya que incrementa la eficiencia de sedimentación sin alterar de manera significativa la viscosidad, lo cual es esencial para asegurar una operación continua y óptima en las siguientes etapas del proceso, como el manejo, transporte y filtración de la pulpa. Mantener una viscosidad adecuada es crucial para evitar problemas como obstrucciones en los ductos. Además, una pulpa con condiciones reológicas óptimas facilita el manejo general del material, minimizando los riesgos de ineficiencias operativas y de costos adicionales asociados a una mayor resistencia al flujo.

En conclusión, el coagulante no solo mejora la sedimentación de partículas finas, sino que también permite mantener el proceso dentro de los parámetros operativos, garantizando tanto la eficiencia en la separación sólido-líquido como en el transporte de la pulpa. Esto refuerza su potencial como reactivo clave en la optimización del desempeño de los espesadores.

A partir de los resultados obtenidos y presentados anteriormente, se determinó que el Coagulante ICL1176L® será incorporado a la estrategia de control, ya que cumple con los requerimientos establecidos inicialmente. Los costos asociados a la aplicación continua de este coagulante se estiman en 70 kUSD/año, suponiendo una dosificación constante de 10 g/t para el procesamiento de 6.000 toneladas métricas secas por día.

3.2 Análisis y Caracterización de alternativas de control disponible en Planta Concentradora.

3.2.1 Estrategia de control para espesadores de relave

Para poder adaptar la estrategia de control de espesadores de relave a espesadores de concentrado colectivo, se hace pertinente poder conocer en qué consiste.

La estrategia de control que se encuentra implementada en el sistema experto de espesadores de relave incorpora variables controladas como; el torque, nivel de cama, nivel de interfaz, porcentaje de sólidos de descarga, dosificación de floculante y flujo de alimentación. En cuanto a las variables manipuladas la estrategia de control considera el flujo de descarga, flujo de floculante y los rangos de apertura de las válvulas de descarga. Tal como se puede apreciar en la **Figura 20**.

VARIABLES CONTROLADAS (CV)	VALOR ACTUAL	LIMITE BAJO	LIMITE ALTO	VALOR PROYECTADO	ESTADO SEÑAL	SET POINT
TORQUE %	33,1 %	10,0 %	34,0 %	32,7 %	FUNCIONANDO	
NIVEL CAMA %	47,6 %	10,0 %	52,0 %	48,0 %	FUNCIONANDO	48,0 %
NIVEL INTERFACE m	6,4 m	4,0 m	6,5 m	6,5 m	FALLA COMM	
SOLIDO DESCARGA %	61,4 %	52,0 %	63,5 %	61,3 %	FUNCIONANDO	
DOSIF. FLOCULANTE PP2801	0,0 %	9,0 g/ton	11,0 g/ton	11,0 g/ton	FUNCIONANDO	
DOSIF. FLOCULANTE PP2802	10,8 %	9,0 g/ton	11,0 g/ton	11,0 g/ton	FUNCIONANDO	
NIVEL PD006 %	72,8 %	70,0 %	95,0 %	Bad	FALLA COMM	
MÁXIMA DIFERENCIA DE FLUJOS	440,1 tph		500,0 tph			
FLUJO ALIMENTACIÓN	8727,4 m3/h					
VARIABLES MANIPULADAS (MV)	VALOR ACTUAL	LIMITE BAJO	LIMITE ALTO	ACCIÓN DE CONTROL	ESTADO SEÑAL	
FLUJO FLOC BBA. 2801 m3/h	0,0 m3/h	4,00 m3/h	15,00 m3/h	4,0 m3/h	FUERA DE SERVICIO	
FLUJO FLOC BBA. 2802 m3/h	11,0 m3/h	4,00 m3/h	20,00 m3/h	11,1 m3/h	FUNCIONANDO	
FLUJO DESCARGA PP2803 m3/h	3027,1 m3/h	2200,0 m3/h	5000,0 m3/h	3035,6 m3/h	FUNCIONANDO	REAL
FLUJO DESCARGA PP2804 m3/h	0,0 m3/h	2200,0 m3/h	5000,0 m3/h	2200,0 m3/h	FUERA DE SERVICIO	REAL
RANGOS APERTURA PINCH 2403	76,8 %	11,00 %	95,00 %	76,6 %		
RANGOS APERTURA PINCH 2404	15,1 %	21,50 %	95,00 %	21,5 %		

Figura 20. Estrategia de control para espesadores de relaves, CMDIC.

El criterio principal en este proceso es la recuperación de agua, lo que permite que el porcentaje de sólidos en la descarga de los equipos pueda oscilar entre un 52% y un 63,5%. Sin embargo, es esencial asegurar que se mantengan condiciones óptimas para evitar embancamientos en el equipo o en alguna de sus líneas de descarga.

Esta estrategia de control permite mantener el equipo operando con dos líneas de descarga abiertas, manteniendo la tercera como una línea de respaldo en caso de que se requiera mantención de alguna de las otras dos líneas disponibles.

La estrategia de control considera como operación óptima un nivel de cama que debe mantenerse entre 10 – 52% con valores de torque que no excedan el 34%.

Tanto el torque como el nivel de cama son parámetros que pueden ser ajustados mediante la modificación del flujo de descarga, el cual puede oscilar entre los 2200 – 5000 m³/h en cada una de las líneas. Con un máximo de 63,5% de sólidos en la descarga. Un aumento de flujo en la descarga implica una disminución en el torque y en el nivel de cama y viceversa. A esta disminución del nivel de cama se le asocia una disminución en el porcentaje de sólidos en la descarga del espesador, cada vez que aumente el flujo de dichas líneas.

Bajo este contexto, resulta necesario destacar que la adición de floculante es controlada de forma automática y es proporcional al flujo de alimentación. Esta dosis se ajusta en un rango entre 9 – 11 g/t.

Algunos factores como las características de la pulpa alimentada, puede existir un aumento o una disminución del porcentaje de sólidos en la descarga, lo que afecta directamente en la cantidad de agua clara recuperada por el Overflow del equipo. En aquellas circunstancias en las que exista una tendencia clara y continua tanto al alza como a la baja, se puede modificar el setpoint del flujo de descarga, siempre y cuando las condiciones de la operación y del equipo lo permitan.

3.2.2 Filosofía de Operación en Espesadores de Concentrado Colectivo

La operación de los espesadores de concentrado colectivo se basa principalmente en la eficiencia de la sedimentación del concentrado y la recuperación de agua. Este enfoque permite que el porcentaje de sólidos fluctúe dentro de un rango predeterminado sin inconvenientes, siempre y cuando se garanticen y aseguren las condiciones necesarias para prevenir y evitar situaciones de riesgo, como embancamientos en el equipo o en cualquiera de sus líneas de descarga.

Los parámetros o variables críticas que deben controlarse en esta operación incluyen el porcentaje de sólidos en la descarga, el porcentaje de sólidos en la alimentación, el torque, la altura de rastras, la turbidez, el flujo de alimentación, el flujo de descarga y la presión de la cama de lodos. Cuando se producen cambios en las características mineralógicas o en el tonelaje alimentado, estas variables pueden experimentar una variabilidad significativa, que en algunos casos puede representar un riesgo para el proceso. Estas variables se monitorean continuamente desde el DCS ubicado en la sala de control de la planta concentradora.

Como se ha descrito en la **Sección 1.4.2** los espesadores de concentrado en condiciones normales de operación se encuentran operando con una o dos líneas de descarga, siendo la tercera una línea disponible de respaldo o protección en caso de que se requiera realizar mantención programada o bien, en caso de alguna situación de riesgo como embancamiento de alguna de las otras líneas o del equipo mismo.

3.2.3 Identificación de Variables de Control

La identificación de variables de control consiste en el reconocimiento de todas las mediciones disponibles en los espesadores de concentrado. Estas mediciones permiten determinar las condiciones operativas de los equipos y, mediante su análisis, evaluar su inclusión en la estrategia de control y operación. Este reconocimiento de variables no solo permite identificar la instrumentación disponible, sino también determinar las condiciones operativas actuales de los espesadores. Además, facilita el diagnóstico de variables adicionales que, aunque no se consideran actualmente, contribuyen a crear una base de conocimiento más completa. Esta base incluye todas aquellas variables que, aunque puedan considerarse externas al proceso en sí, pueden impactar significativamente en los resultados esperados.

En base a lo dispuesto anteriormente, los espesadores de concentrado colectivo cuentan con variables de control como torque, presión de cama de lodos, turbidez, densidad en líneas de descarga. Y variables manipuladas como altura de rastras, flujo de descarga y dosificación de floculante.

En la **Tabla 6.** es posible visualizar todas las variables anteriormente mencionadas y que se encuentran disponibles para su análisis.

Tabla 6. Variables de Proceso Espesamiento de Concentrado Colectivo, CMDIC.

Instrumento	Descripción	TAG PI System y DCS
OIT6075	Torque	170OIT6075
ZT6072	Altura de rastras	170ZT6072
PI6075	Presión de cama de lodos	170PI6075
SOLIDOS007	Sólidos de descarga Bomba PP100	170DIC6085
FIC27053	Flujo descarga Bomba PP100	170FIT6087
SOLIDOS008	Sólidos de descarga Bomba PP101	170DIC6084
FIC27063	Flujo descarga Bomba PP101	170FIT6086
AIT6082	Turbidez	170AIT6082

Los límites de control establecidos para los parámetros anteriormente mencionados se encuentran en la **Tabla 7.**

Tabla 7. Rangos de control para variables de proceso en espesamiento de concentrado colectivo.

Parámetro	Unidad	Límite inferior	Límite superior
Torque	%	10	15
Altura de rastras	%	0	100
Turbidez Alta Alta	NTU	>500	
Turbidez	NTU	200	500
Sólidos de alimentación	%	19	22
Sólidos de descarga	%	60	65
Flujo de descarga	m ³ /h	100	200

El estanque de cada espesador posee un transmisor que permite medir en línea la presión manométrica ejercida por la carga de sólidos en el fondo del estanque conocida como cama de lodos. Esta instrumentación es vital para el equipo ya que no solo entrega una cuantificación del nivel de sólidos sedimentado y acumulado en el fondo del espesador, sino que también permite que los operadores puedan tomar acción en base a las condiciones de la operación, con el fin de evitar acumulaciones excesivas al interior del equipo y prevenir embanques.

En cuanto a las rastras de cada espesador, estas son monitoreadas a través de transmisores e indicadores que permiten medir la posición o altura y el torque ejercido. Las instalaciones de estos equipos cuentan con visualizadores numéricos que se encuentran conectados a transmisores, los cuales permiten enviar una señal con los datos medidos en terreno a la sala de control, para que los operadores puedan seguir, analizar y tomar acción según corresponda en el funcionamiento de cada equipo.

Si bien los espesadores de concentrado no cuentan con un instrumento capaz de medir la altura de interfase de cama de lodos al interior del equipo, existen turbidímetros disponibles que permiten de manera indirecta conocer el estado del agua de rebose. Estos instrumentos se encuentran ubicados en las canaletas, midiendo en un rango aproximado de 0 a 800 NTU.

Para la cuantificación del contenido de sólidos en el Underflow, los equipos cuentan con densímetros ubicados en las dos líneas principales de descarga. Cabe recalcar que estas líneas poseen medidores de flujo que permiten determinar la velocidad de descarga de la pulpa. El rango de operación de esta instrumentación se encuentra entre 0 y 200 m³/h. Estos flujómetros se encuentran incorporados a lazos de control que tienen como finalidad permitir el ajuste del flujo de descarga a través de la abertura de válvulas que cuentan con un control tipo “pinch” y actuadores que cuando son activados permiten bloquear el paso del flujo de descarga.

Respecto a aquellas variables adicionales que no se encuentran implementadas en la estrategia de control de espesadores de relave, pero que son relevantes en el espesamiento de concentrado colectivo tales como distribución granulométrica en la pulpa de alimentación, esfuerzo de corte, dosificación de coagulante y densidad en líneas de alimentación. Los límites de control y manipulación (según corresponda) de estas variables mencionadas serán analizados a través de la data histórica disponible mediante PI system ® y PI ProcessBook ®.

3.3 Desarrollo de Estrategia de Control

3.3.1 Análisis de Variables de Control

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, a continuación, se detallan los resultados del análisis de todas las variables (tanto manipuladas como de control) que fueron incorporadas y adaptadas a la estrategia de control para los espesadores de concentrado colectivo. Cabe destacar que, tal como se ha mencionado anteriormente, este análisis y todos los siguientes, toman cada decisión a partir de las señales filtradas de lectura de cada uno de los instrumentos, con el fin de evitar todos aquellos posibles errores asociados a la presencia de interferencias en la señal de origen.

En primera instancia, la principal razón para analizar la presión de cama y el porcentaje de torque se debe a la estrecha relación entre ambas variables. En la **Figura 21** es posible apreciar que, frente a un aumento en la descarga del espesador, ambas variables tienden a disminuir casi inmediatamente.

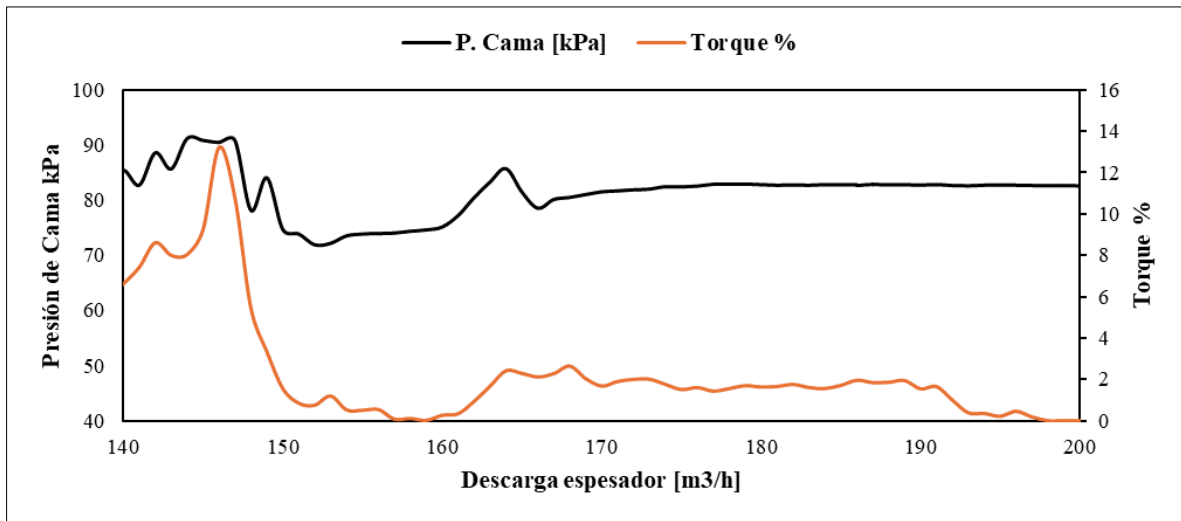


Figura 21. Comportamiento de Presión de Cama y Torque frente al aumento del flujo de descarga.

La observación principal sobre el comportamiento físico entre ambas variables se relaciona con la acumulación de sólido sedimentado dentro del equipo y, por ende, con el perfil de concentración de sólidos en este.

Es importante considerar que, mientras la presión de cama refleja el inventario de sólido en el interior del espesador, el torque indica la fuerza necesaria para mover las rastras, que son las encargadas de trasladar el concentrado espesado desde la zona de compactación hacia la zona de descarga del equipo.

Por esta razón, un aumento en el flujo de descarga del espesador produce una respuesta inmediata en la presión de cama, ya que físicamente se reduce el inventario de sólidos, lo que a su vez disminuye el torque requerido. Esto ocurre debido a la menor resistencia causada por el reducido contenido de mineral sedimentado en la zona de compactación. En este contexto, otro parámetro clave a incorporar en la estrategia de control es el esfuerzo de corte, ya que este influye tanto en el consumo específico de floculante como en el torque.

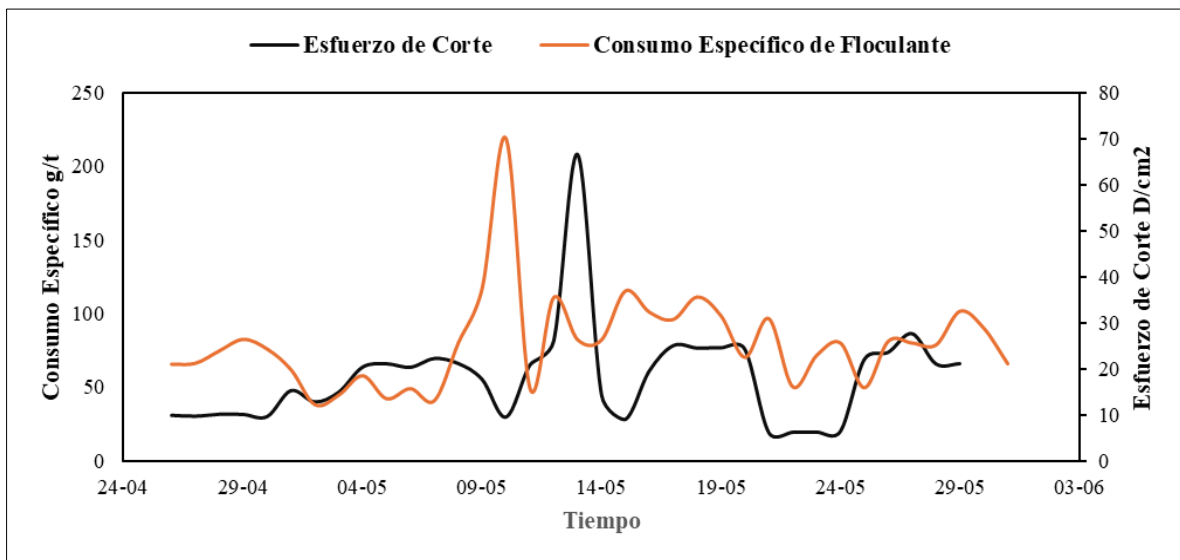


Figura 22. Comportamiento de Esfuerzo de corte frente a la variación de Consumo específico de floculante.

Tal como es posible visualizar en la **Figura 22**, cuando el consumo de floculante aumenta, el esfuerzo de corte de la pulpa tiende a seguir un comportamiento al alza muy similar.

Es sabido que el floculante es un reactivo que facilita la aglomeración de partículas finas, facilitando la sedimentación de la pulpa y la recuperación de agua desde un espesador. Cuando existe un incremento en el consumo específico de floculante, existe también la conformación de flóculos más grandes y densos, lo que a su vez conlleva un aumento en la viscosidad y la resistencia interna de la pulpa. Esto implica que exista un aumento en el esfuerzo de corte requerido para movilizar la pulpa sedimentada, ya que esta presenta una mayor resistencia a fluir debido a la aglomeración de partículas finas en suspensión. Por lo tanto, las rastras del equipo requerirán aplicar una fuerza mayor para poder superar la resistencia a fluir de la pulpa y llevar el concentrado espesado hacia la zona de descarga.

Es por esta razón que, cuando existe un aumento de esfuerzo de corte, la acción principal considera la disminución de la dosificación de floculante.

Para poder obtener un rango de control de este parámetro, se tomaron muestras en aquellos casos en los que el torque se encontraba en valores permitidos (<10%), en rangos que se categorizaban como de precaución (10-15%) y en aquellos momentos en los que se encontraba muy por sobre lo recomendado (>15%). Estas muestras se analizaron mediante ensayos de reología que permitieron concluir con los valores de control que se encuentran en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Límites de control para Esfuerzo de corte

Esfuerzo de corte (dyn/cm²)			
Muestra	Dentro de Parámetro	Precaución	Fuera de Parámetro
Concentrado	<35	35 ≤ Esf. Corte < 40	≥ 40

Por otro lado, surge relevante analizar la relación entre el floculante y el porcentaje de sólidos de descarga.

En la **Figura 23** es posible observar el porcentaje de sólidos de descarga producto de la dosificación de floculante al sistema dentro de rangos óptimos, la cual se encuentra en un rango de 10 – 35 g/t. Este rango se determinó en primer lugar a escala de laboratorio y luego, se realizaron las coordinaciones pertinentes con los operadores del área para corroborar que esta condición fuera óptima y no significara un riesgo para el proceso.

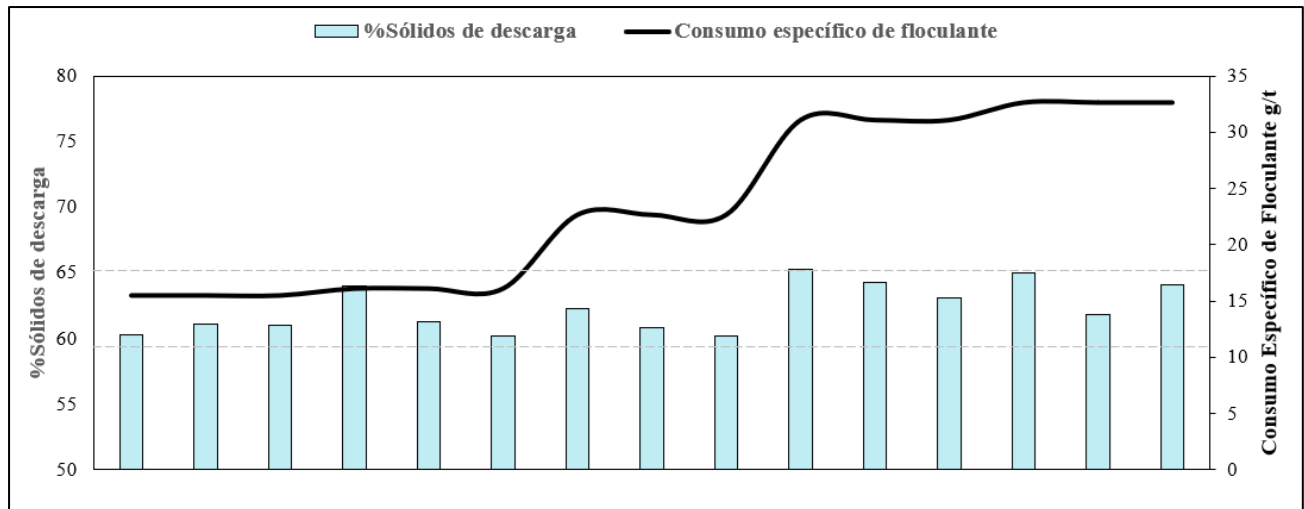


Figura 23. Consumo específico de floculante y Porcentaje de sólidos en la descarga de espesadores de concentrado colectivo.

En la actualidad y en la mayoría de los casos, la efectividad de los procesos de sedimentación en la industria minera se refugia en la capacidad que tienen los floculantes de aglomerar partículas finas que conforman la pulpa. Si bien la efectividad de este reactivo tiene un impacto relevante en la velocidad de sedimentación, en la pulpa descargada y su comportamiento reológico, hay que tener en cuenta que un aumento de dosificación de floculante no posee una relación lineal con el aumento de la concentración de sólidos en la zona de compactación. Ya que, si bien este reactivo se adhiere a la superficie de las partículas debido al efecto de las cargas superficiales, permitiendo la aglomeración de las partículas finas, si se añade en exceso se genera repulsión electrostática entre las partículas aglomeradas, provocando que dichas partículas puedan dispersarse en la suspensión, perdiendo la estructura floculada tal como se observa en la **Figura 24**.

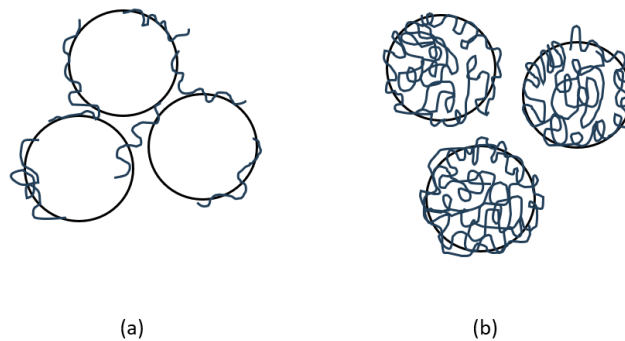


Figura 24. Floculación por puente de hidrógeno. (a) Floculación de varias partículas; (b) re-estabilización por exceso de floculante (Concha, 2001).

En base a los datos analizados, se concluye que cuando existe un aumento de la concentración de sólidos en la alimentación por sobre los rangos recomendados que se especifican en la **Sección 1.8.3**, la velocidad de sedimentación tiende a disminuir.

La velocidad de sedimentación de las partículas es directamente proporcional a la diferencia de densidad entre las partículas y el líquido circundante y a la aceleración gravitacional. Bajo este contexto y en base al estudio realizado de estos parámetros, en la **Figura 26**, se puede visualizar como en la operación de espesadores de concentrado el comportamiento de estas variables resulta crucial a la hora de considerar e incorporar el porcentaje de sólidos de alimentación a los equipos como variable de control en la estrategia diseñada, ya que es importante garantizar que la pulpa alimentada cumpla con las características necesarias para que el control sea estable y así optimizar la recuperación de agua y la eficiencia del proceso.

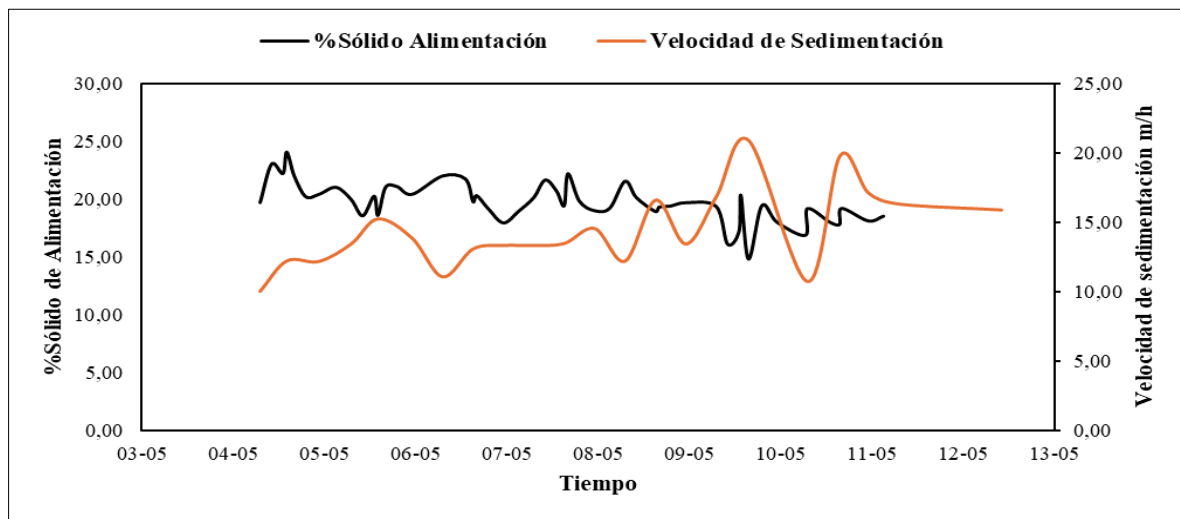


Figura 26. Comportamiento de velocidad de sedimentación frente a la variación de la concentración de sólidos alimentados.

Otra de las razones fundamentales por las que resulta importante mantener el control del porcentaje de sólidos alimentados se relaciona con el control de la densidad de la pulpa descargada. En la **Figura 27**, es posible visualizar que, cuando el porcentaje de sólidos de alimentación aumenta o disminuye alcanzando valores muy alejados del rango recomendado, el porcentaje de sólidos de descarga se ve afectado considerablemente.

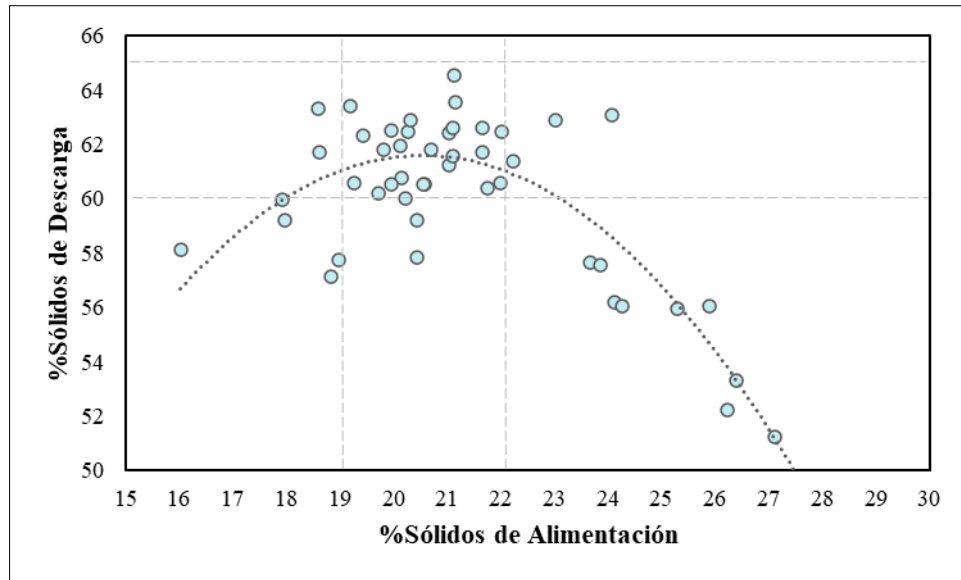


Figura 27. Efecto de la concentración de sólidos en la alimentación frente al porcentaje de sólidos de descarga.

Como se ha mencionado anteriormente, el porcentaje de sólidos en la alimentación afecta directamente el rendimiento del espesador y, por lo tanto, el porcentaje de sólidos en la descarga.

Un porcentaje de sólidos demasiado alto en la alimentación puede resultar en una menor concentración de sólidos en la descarga, mientras que un porcentaje de sólidos menor (dentro de límites óptimos) en la alimentación puede permitir una mejor sedimentación y una mayor concentración de sólidos en la descarga, ya que se alcanza la dilución óptima de la pulpa dentro del equipo.

La clave principal se basa en encontrar el equilibrio adecuado que permita al espesador operar de manera eficiente, manteniendo un buen rendimiento tanto en la recuperación de agua como en la concentración de sólidos en la descarga.

Otro factor estudiado y que mostró relevancia en cuanto al impacto que genera en el porcentaje de sólidos de descarga corresponde a la Granulometría del flujo de salida de los Vertimills, que, en base al diagrama de procesos, es uno de los flujos que alimenta a los espesadores de concentrado.

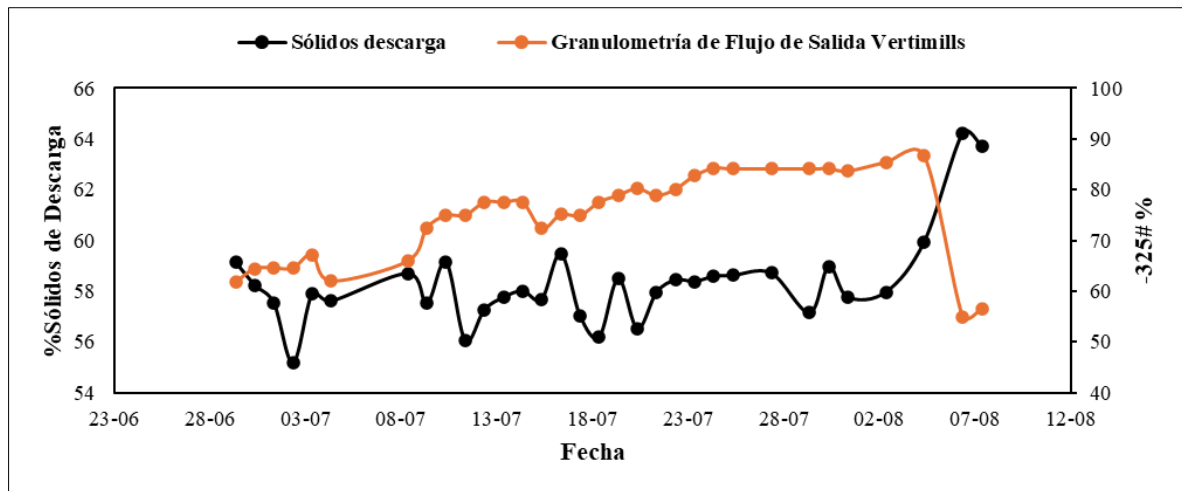


Figura 28. Distribución granulométrica de la pulpa alimentada y su efecto en la concentración de sólidos de descarga.

Un aumento de partículas finas puede afectar la calidad del agua recuperada, ya que estas presentan velocidades de sedimentación más lentas, lo que conlleva a que suelen permanecer en suspensión. Si bien el floculante es capaz de aglomerarlas, cuando las partículas son demasiado finas, la formación de los flóculos puede ser ineficiente, lo que se traduce en un menor porcentaje de sólidos en la descarga y es lo que se puede visualizar a partir de la **Figura 28**. Donde se concluye que frente a un aumento sobre el 65% de partículas finas (-#325) el porcentaje de sólidos de descarga presenta una disminución significativa. Por lo tanto, se establece que el efecto de la distribución granulométrica juega un papel fundamental en el proceso de espesamiento y que debe ser considerado en la estrategia de control.

3.3.2 Límites de control en variables incorporadas

Cada acción que el sistema de control experto determine ejecutar tiene una magnitud máxima y mínima asociada a cada parámetro a analizar. Estas magnitudes están determinadas y especificadas según las condiciones operacionales que hayan generado tal valor y decisión. Bajo esta idea, la lógica de control, luego de realizar la lectura de las variables y deducir en base a la secuencia anteriormente establecida de reglas, clasificará cada una de sus respuestas en base a los parámetros más urgentes a ajustar para el escenario en el que se encuentre en dicho momento.

Las reglas lógicas propuestas y las condiciones de operación de cada espesador están definidas en base a toda la información anteriormente entregada. En este contexto, en la **Tabla 9**, es posible observar los límites alcanzables por cada parámetro incorporado a la estrategia de control, los cuales fueron obtenidos mediante el análisis de la data histórica y ensayos de laboratorio con muestras puntuales de concentrado espesado.

Tabla 9. Resultados de límites de control en variables incorporadas a estrategia de control para espesadores de concentrado.

Parámetro	Unidad	Límite inferior	Límite superior
Presión de Cama Alto Alto	kPa	112	
Presión de Cama Alto	kPa	104	
Presión de Cama Bajo	kPa	101	
Presión de Cama Bajo Bajo	kPa	99	
Esfuerzo de corte Alto	dyn/cm ²	35	40
Dosificación de floculante	g/t	10	35
Dosificación de coagulante	g/t	3	10
Granulometría (-#325)	%	60	65

3.3.3 Etapas de la estrategia de control para espesadores de concentrado

En esta sección se detalla la justificación de cada fase construida para el sistema de control experto que se implementará en los espesadores de concentrado colectivo en Faena Cordillera, CMDIC.

El objetivo principal de estas reglas lógicas de control es optimizar el proceso de espesamiento y mejorar la descarga del mineral fino retenido en la espuma, lo que a su vez favorece la calidad del agua recuperada. Esto garantiza que el producto obtenido cumpla con los requisitos de calidad establecidos para su transporte hacia las instalaciones de Puerto Patache, donde se someterá a etapas de flotación selectiva.

La primera etapa de la estrategia de control (**Figura 29**) se diseñó para evitar situaciones de riesgo durante la operación mediante la evaluación de los límites recomendados de torque y presión de cama de sólidos. En los casos en que la tendencia del sistema supere los límites recomendados (torque $> 15\%$ y presión > 112 kPa), el sistema puede tomar acciones correctivas, como disminuir la dosificación de floculante o aumentar el flujo de descarga, para revertir la situación de riesgo. De esta manera, el sistema experto puede reconocer a tiempo los valores fuera de las recomendaciones y tomar medidas preventivas.

Para la construcción de la primera fase de control, se consideraron los parámetros operacionales definidos por el diseño de espesadores de concentrado, los cuales se encuentran en la **Sección** ;Error! No se encuentra el origen de la referencia..

El análisis principal en esta etapa de la estrategia de control se centra en la relación entre el torque y la presión de camas con la acumulación de sólidos dentro del espesador. Ambos parámetros proporcionan información sobre el sólido sedimentado en el equipo. El torque, es un parámetro que indica la fuerza necesaria para girar las rastras y movilizar el sólido hacia la zona cónica de descarga lo cual permite tener un concepto claro sobre la acumulación de sólido en esa zona específica. Por otro lado, la presión de cama, medida en la zona de compactación del sólido, representa el inventario total de sólidos en el equipo.

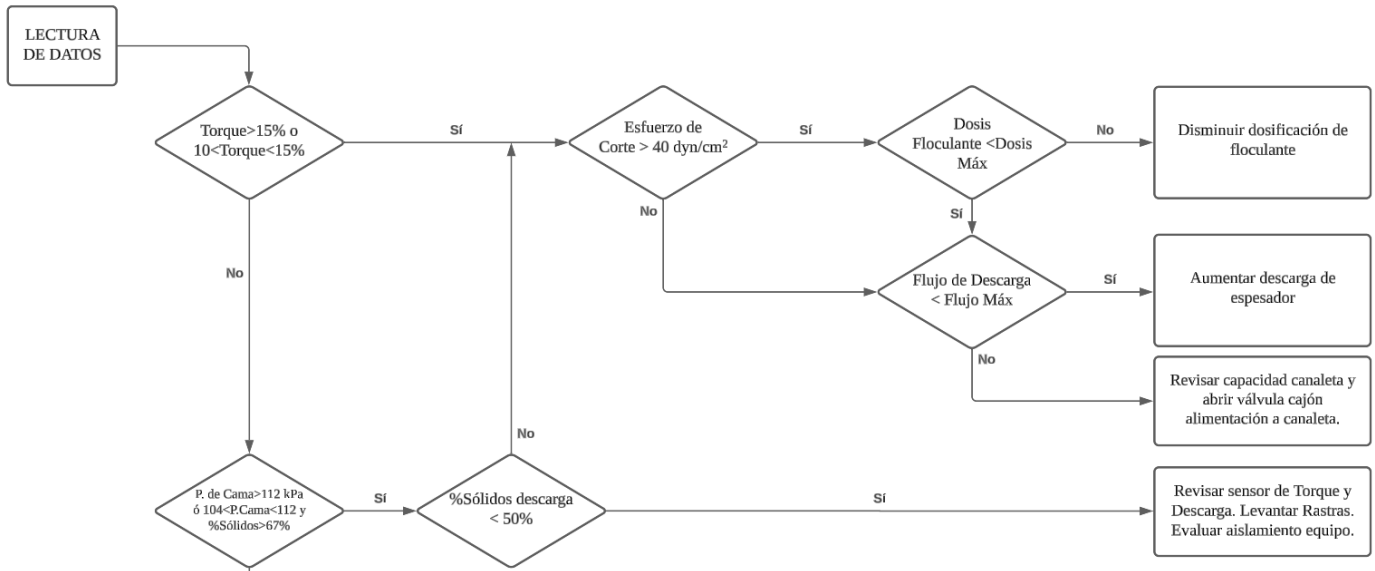


Figura 29. Primera Etapa de Estrategia de Control para espesadores de concentrado colectivo.

Como se ha mencionado anteriormente y como se observa en la **Figura 29** la filosofía de control es capaz de reconocer situaciones que si bien, no son de ocurrencia habitual pero que sin embargo pueden ocurrir durante la operación. La primera entrada luego de la lectura de datos se refiere al torque y las posibles fallas en la lectura de su medición. En primer lugar, esta interpretación de la lectura evaluará si el torque se encuentra al alza y si se encuentra por valores muy por sobre lo recomendado (Torque > 15%).

La acción correctiva del sistema de control frente al aumento de torque será evaluar bajo que rangos se encuentra el esfuerzo de corte. La importancia de considerar este parámetro recae en su estricta relación con la dosificación de floculante. Para este caso, se considera una tendencia al alza para valores de esfuerzo de corte mayores a 40 dyn/cm². De ser mayor, las acciones serán disminuir la dosificación de floculante o bien, aumentar el flujo de descarga del equipo según corresponda. La primera consideración se establece debido a que cuando el consumo específico de floculante se encuentra sobre los rangos recomendados, el esfuerzo de corte aumenta considerablemente a valores que significan un riesgo para la operación, ya que implica, como resultado, un aumento en el torque.

La segunda fase de análisis comprende otras variables que permiten asegurar un correcto balance de masa en el equipo y garantizar posteriormente el porcentaje de sólidos en la descarga, según las condiciones operacionales lo permitan. (ver **Figura 30**)

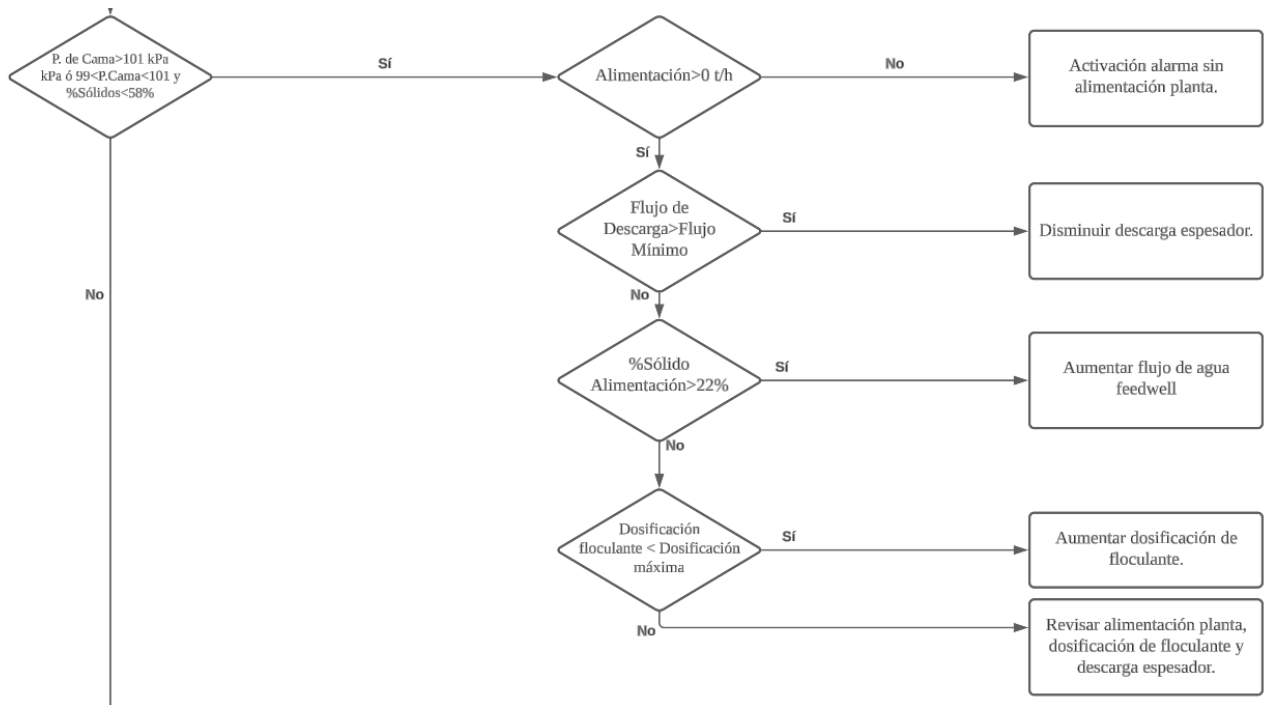


Figura 30. Segunda Etapa de Estrategia de control para espesadores de concentrado colectivo.

En este caso, el análisis realizado por la estrategia de control diseñada evaluará si la presión de cama y el porcentaje de sólidos de descarga tienen una tendencia a la baja o bien se encuentran bajo el valor mínimo recomendado ($99 < P. \text{ de Cama} < 101 \text{ kPa}$, $\%Sólidos < 58\%$). En caso de ser así, el sistema identificará si existe o no una disminución significativa en el tonelaje de alimentación. Para poder detectar que el flujo que está ingresando no sea solamente agua, el sistema de control experto dispone de un flujómetro y densímetro para asegurar una lectura correcta en cuanto a la pulpa que proviene desde etapas de molienda y alimenta a la planta de flotación, de la cual sale el concentrado colectivo que ingresa a los equipos. Esta instrumentación disponible da una representación adecuada del mineral que ingresa al cajón DI015 el cual distribuye el mineral a los espesadores de concentrado.

En el caso de que el tonelaje de sólidos alimentado sea nulo, es decir un porcentaje de sólidos igual a cero, el sistema experto generará la alerta que informará al operador que no está llegando alimentación en las pantallas de control con el fin de que este pueda tomar acciones como de detener la planta y cerrar la descarga del espesador para recuperar el agua según los procedimientos y estándares operacionales existentes para este tipo de escenarios. En caso contrario, el sistema evaluará si el flujo de descarga está por valores mucho mayores al flujo mínimo de descarga. De ser positiva esta respuesta, el sistema actuará a través de disminuir el flujo, y poder ajustar la presión de cama a valores óptimos y asegurar un porcentaje de sólidos de descarga adecuado.

De no presentarse el escenario anterior, el sistema experto analizará si el porcentaje de sólidos de alimentación está por sobre los rangos recomendados y especificados en la **Sección** **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

De ser que el porcentaje de sólidos de alimentación se encuentre muy por sobre el límite recomendado ($>22\%$), la acción que tomará el sistema de control experto será activar el flujo de agua del feedwell para garantizar el punto óptimo de dilución y favorecer la velocidad de sedimentación de las partículas. De lo contrario, se evaluará si la dosificación de floculante se encuentra muy por debajo de la dosificación máxima recomendada. En este caso, la acción será aumentar la dosificación de floculante.

Si todos los escenarios no responden ante los escenarios esperados, entonces el sistema de control alertará en la pantalla de control revisar los sensores de alimentación a la planta, y los flujómetros de dosificación de floculante y descarga de los espesadores.

La tercera fase de la lógica de control (**Figura 31**) busca favorecer la recuperación de partículas finas en la descarga de la pulpa sedimentada, mejorando la calidad y claridad del agua de rebose que es recuperada a través del Overflow. Así como también asegurar el porcentaje de sólidos en la descarga. Para esto último, se ajusta la dosificación de coagulante. La consideración de este reactivo se basa en los resultados especificados en la **Sección 3.1**, en la cual se estableció detalladamente los beneficios que este reactivo posee en cuanto al aumento de recuperación de partículas minerales finas en el Underflow del equipo.



Figura 31. Tercera Etapa de Estrategia de Control para espesadores de concentrado colectivo.

El escenario en el que el sensor de turbidez obtenga lecturas al alza en cuanto a la turbidez (>500 NTU), el primer análisis de ajuste a considerar es aumentar la dosificación de coagulante. De ser mayor a la dosificación mínima de este reactivo, el segundo análisis a realizar por el sistema experto es sobre la granulometría de las partículas que conforman la pulpa alimentada.

Por lo tanto, en aquellos casos en los que se reporten porcentajes mayores al 65% de mineral fino -#325, el sistema experto activará en las pantallas de control disponibles, la alarma de sobre molienda, con la finalidad de que el operador de sala pueda tomar las acciones correspondientes y poder revertir el escenario con el objetivo de mejorar la calidad del agua recuperada y la recuperación de partículas finas sedimentadas. En caso contrario, es decir, si no se cumple la necesidad de ajustar la dosificación de coagulante y los porcentajes recomendados de granulometría entonces la acción principal que tomará el sistema de control será activar los aspersores para poder facilitar la sedimentación de las partículas finas retenidas en la espuma.

Finalmente, con todos los parámetros y condiciones anteriormente establecidos y revisados, la tercera fase lógica de control buscará optimizar el porcentaje de sólidos de descarga en el Underflow dentro del rango establecido y permitido según las características de los componentes del equipo. Para poder ajustar este parámetro, el sistema leerá y ajustará la dosificación de floculante o bien, el flujo de descarga. En caso de que el porcentaje de sólidos de descarga sea menor al 60%, el sistema buscará disminuir paulatinamente el flujo de descarga para ajustar y mejorar la concentración de sólidos obtenida. Mientras que, en el caso en que el recurso de la disminución del flujo de descarga se encuentre agotado y fuera de las consideraciones del sistema experto, y el porcentaje de sólidos no sea menor a 60%, entonces la lógica de control indicará que como acción disminuir la dosificación de floculante. Si el escenario leído y analizado por el sistema de control indica que el ajuste de dosificación de floculante no es necesaria ni pertinente, entonces se procederá a activar la alarma de revisar los sensores de dosificación y descarga del equipo.

En la **Figura 32** se observa la estructura completa de la estrategia de control adaptada para espesadores de concentrado colectivo.

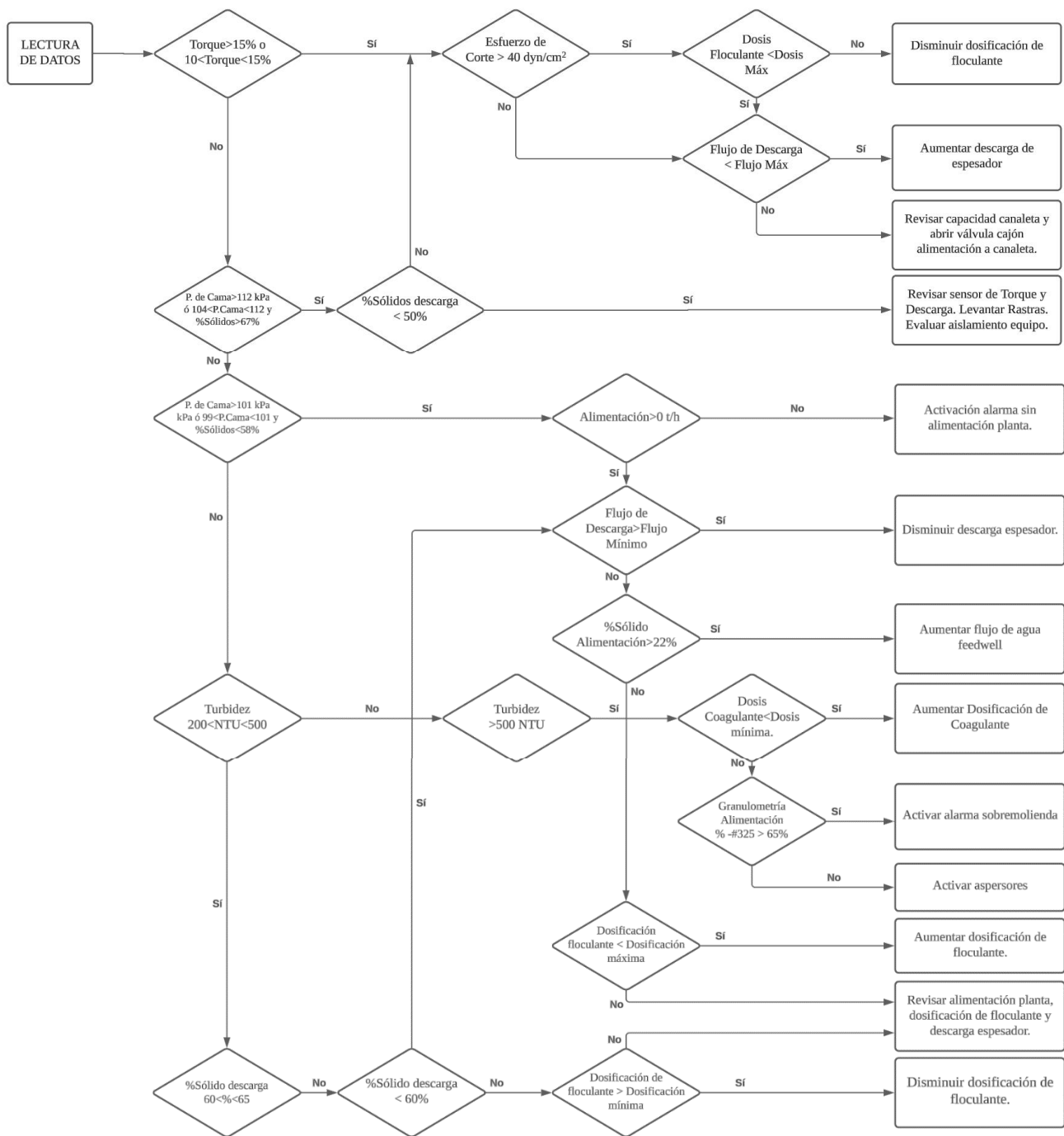


Figura 32. Estrategia de control adaptada para espesadores de concentrado colectivo.

3.3.4 Activación de Alarmas

El sistema experto considerará la activación de alarmas en las pantallas de la sala de control para ser visibles por el operador, en todas aquellas situaciones y escenarios que se escapen de las condiciones normales de operación. Independiente de su naturaleza, cada alarma requiere de la participación del operador, el cual, debe presentar las capacidades y conocimiento necesario para determinar si es indispensable o no la detención del sistema.

En esta sección, se detallará la especificación de las alarmas que pudiese activar el sistema de control experto según el diseño de la estrategia de control descrita en la **Sección 3.3.3.** a medida que se presenten eventualidades que, en base a la singularidad de su naturaleza, necesiten de acciones específicas por parte del o los operadores en sala de control. En cada una de ellas, se menciona y detallan todas las indicaciones generales que deberán seguir y llevar a cabo los operadores según se requiera. Bajo este contexto, todos los procedimientos técnicos requeridos, están siendo desarrollados con la finalidad de concretar estándares operacionales para contar con su disponibilidad en el Área de Espesamiento y Recuperación de Agua de la planta concentradora y no conforman parte de los alcances de la presente memoria de título.

Alarma 1: Revisar capacidad canaleta alimentación y abrir válvula cajón alimentación a canaleta.

Esta alarma se encenderá y notificará en las pantallas de control del operador cuando el escenario operacional contemple un aumento de torque y/o presión de cama en conjunto con un flujo de descarga que ya ha alcanzado el máximo permitido por el equipo.

El operador deberá evaluar e indicar si se presentan fallas en las mediciones de los instrumentos y también, según sea el caso, desviar el flujo de alimentación del equipo modificando la apertura de las válvulas del cajón de alimentación, con el objetivo de reducir la carga que está ingresando al espesador.

Alarma 2: Revisar capacidad de canaleta, revisar sensores torque, descarga y levantar rastras. Evaluar aislamiento de equipo.

Cuando el escenario de operación presente un aumento o tendencia al alza en la medición de presión de cama del espesador, la cual, no se encuentra acompañada de un alto valor en el porcentaje de sólidos de descarga, el sistema de control experto alertará al operador indicando que existe una acumulación de mineral al interior del equipo que podría significar un posible embancamiento. Bajo este contexto, el operador deberá solicitar la revisión de los sensores en terreno y asegurar la calibración en caso de que se necesite. Si la situación es de riesgo, entonces se deberá evaluar la aislación del equipo y el levante de rastras siguiendo los procedimientos e instructivos operacionales del área.

Alarma 3: Alarma Sin Alimentación Planta

Esta alarma será notificada cuando por alguna condición operacional adversa se detenga el ingreso de alimentación a los espesadores o bien, el flujo de alimentación sea un “batch” de agua. El operador tendrá la responsabilidad de llevar a cabo las acciones debidas según lo indique su supervisor. Si bien estas acciones pueden ser diversas por el propio dinamismo de la planta concentradora, estas pueden contemplar desde la recuperación del flujo de agua mediante el cierre de válvulas de descarga del equipo o generar una posible recirculación descargando todo el flujo y dirigiéndolo a los estanques de agua de procesos (HoldingTank) o cualquier otra área de la operación donde sea requerida.

Alarma 4: Alarma Sobremolienda

Cuando la pulpa alimentada presente una granulometría mayoritariamente fina, superando los valores máximos permitidos ($>65\%$) se activará esta alarma con la finalidad de que el operador pueda reducir el mineral fino producido en etapas de remolienda mediante las estrategias de operación establecidas para los Vertimills

Alarma 5: Revisar alimentación planta, dosificación de floculante y flujo de descarga espesador.

En aquellos casos de mayor particularidad, en los cuales existe la posibilidad de que se generen circunstancias que puedan escapar de las condiciones normales de operación, el sistema experto alertará al operador, con objetivo de que pueda ser capaz de identificar la causa raíz que se encuentra impidiendo el control del o los parámetros relevantes para los equipos en funcionamiento dentro de las condiciones establecidas como normales. En este sentido, los encargados del área deberán revisar que todos los recursos de control como, por ejemplo, sensores y actuadores, se encuentren operando sin fallas para asegurar la calidad y confiabilidad de la lectura. O bien, cerciorar que la alimentación a los equipos sea la adecuada para lograr un porcentaje de sólidos óptimo en la descarga.

4 Conclusiones y recomendaciones

En base a la línea de investigación realizada, el levantamiento de la información y las condiciones actuales en planta, se recogen algunos puntos principales que permitirían optimizar el proceso de espesamiento de concentrado colectivo cuando se implemente al 2025 la lógica de control diseñada.

En primer lugar, se destaca la incorporación de instrumentación clave como lo es el flujo de alimentación a los equipos. Este parámetro juega un rol fundamental en la estrategia de control del sistema experto, ya que posibilita que este sea capaz de tener una idea más completa del escenario actual de la operación, favoreciendo la precisión de las respuestas ejecutadas en base a las variaciones de flujo que ingresa a los equipos. La principal explicación bajo esta consideración se entiende por la relevancia que tienen las perturbaciones con los resultados obtenidos a través del sistema de control.

En segundo lugar, es relevante mencionar que, para lograr lecturas confiables de la instrumentación, es vital contar con planes adecuados de mantenimiento y calibración de los sensores disponibles, ya que existe una baja disponibilidad de sensores calibrados. Lo anterior, se indica principalmente para los turbidímetros disponibles, ya que, en los levantamientos realizados en terreno se observó que se encontraban con carga seca a lo largo de su estructura, lo que interfería directamente en la lectura, obteniendo data errónea y, en muchos casos, se encontraban sin señal disponible. En este sentido,

se destaca la importancia de agregar y facilitar todas las condiciones requeridas que permitan tener un conocimiento completo del estado de los lazos de control, ya que brindaría mayor consistencia en la toma de decisiones del sistema experto.

En tercer lugar, en cuanto a la dosificación de reactivos, se observa que no existe un estudio concluyente que demuestre la efectividad del floculante utilizado en pulpas de concentrado. La principal razón por la que se emplea este reactivo es su eficacia en pulpas de relave. No obstante, se recomienda realizar un estudio más detallado para identificar un floculante que optimice la sedimentación del mineral en suspensión y que sea específicamente adecuado para pulpas de concentrado. En este contexto, también se sugiere la separación de las líneas de preparación y dosificación de floculante, con el objetivo de reducir el consumo específico de este reactivo en los equipos y lograr una sintonía estable y tiempos de operación adecuados en el sistema experto.

Finalmente, en cuanto a los estudios metalúrgicos respectivos a la caracterización granulométrica del mineral alimentado al proceso, se evidencia la correlación que existe entre el porcentaje de mineral fino y el porcentaje de sólidos de descarga de los espesadores. La incorporación de este indicador como elemento predictivo otorga mayor consistencia a las decisiones que pueda tomar el sistema de control.

La consideración de elementos predictivos dentro de la lógica de control da paso a que el sistema pueda ser capaz de tomar acciones preventivas, reduciendo la variación significativa en los parámetros de control del equipo.

Bibliografía

Abara, F. V. (2019). Aumento de porcentaje de sólido de descarga de los espesadores de relave a través de la metodología Full Potential en Minera los Pelambres. Concepción: Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Backhurst, J. R., Harker, J. H., & Richardson, J. F. (2002). Solutions to the problems in chemical engineering (Vol. 2 y 3). Butterworth Heinemann.

Bergh, L., & Yianatos, J. (2011). The long way toward multivariate predictive control of flotation processes. *Journal of Process Control*, 21(2), 226–234.

Betancourt, F., Concha, F., & Sbárbaro, D. (2013). Simple mass balance controllers for continuous sedimentation. *Computers & Chemical Engineering*.

Castillo, E., Gutiérrez, J. M., & Hadi, A. S. (1997). Sistemas expertos y modelos de redes probabilísticas. Academia de Ingeniería.

Concha, F. (2001). Manual de filtración & separación. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Criado, C. L., & Reséndez, R. M. (2008). Formación de partículas nanométricas en soluciones sobresaturadas. *CIENCIA-UANL*, 11(3), 6.

Day, A., Briggs, D., & Bruey, F. (2002). *Mining chemicals handbook (Revised ed.)*. CYTEC, Horton Printing Company.

Denkov, N., Tcholakova, S., & Politova-Brinkova, N. (2020). Physicochemical control of foam properties. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 50, 101376.

Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (Eds.). (2003). *Principles of mineral processing*. SME.

Garrett, P. R., Wicks, S. P., & Fowles, E. (2006). The effect of high volume fractions of latex particles on foaming and antifoam action in surfactant solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 282–283, 307–328.

Georgiev, V., Mitrinova, Z., Gers-Barlag, A., Jaunky, G., Denkov, N., & Tcholakova, S. (2024). Role of hydrodynamic conditions and type of foam stabilizer for antifoam efficiency. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 681, 132838.

Gupta, A., & Yan, D. S. (2016). *Mineral processing design and operations: An introduction*. Elsevier.

Herrera, G. P., Valdivia, F. S. L., Urrutia, C. I. C., Martínez, W. I. M., & Castrillo, C. J. H. (2023). Implementación de la integral definida para el análisis de la viscosidad de fluidos. *Wani*, (79), 62–77.

Ramírez Quirós, F. (2024). El agua potable. Obtenido de <http://www.elaguapotable.com/>

Sinnott, R. K. (2005). *Chemical engineering*. Elsevier Butterworth-Heinemann.

Siuce Bonifacio, R. (2019). Espesamiento, floculación de relave para la obtención de pasta de la compañía minera CAOLÍN SAC–Pasco 2018.

Stokes, G. G. (1851). On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*.

Svarovsky, L. (2000). *Solid-liquid separation*. Elsevier.

Trujillo, V. C. (2003). *Procesamiento de minerales*. Antofagasta: Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas.

Vasquez, P. O. (2014). *Diseño e implementación lógica de control experto en espesador de relaves*. Planta Las Tórtolas (Angloamerican Sur S.A - División Los Bronces). Valparaíso, Chile, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2006). Mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery (7th ed.). Elsevier Science & Technology Books.

Yianatos, J. (2005). Flotación de minerales. Departamento de Procesos Químicos, Biotecnológicos y Ambientales, Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar, Chile.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Diseño de estrategia de control para espesadores de concentrado colectivo, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

Nombre Memorista: Ana María Arellano Medina

Modalidad	Proyecto	Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		Dr. Fernando Betancourt
Calificación		
Fecha	26.09.2024	
	Prof. ^a Eugenia Araneda H.	
		Ingeniero Supervisor: Jorge Cortínez
		Institución: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Andrés Ramírez	Prof. Luver Echeverry
----------------------	-----------------------

Resumen

La presente memoria de título tiene como principal objetivo proponer el diseño de una estrategia de control avanzada para espesadores de concentrado colectivo, cuyo propósito es mejorar la eficiencia operativa de estos equipos en la planta. El enfoque se centra en asegurar que el porcentaje de sólidos en la descarga se mantenga consistentemente en un rango óptimo entre el 60% y el 65%.

La estrategia de control propuesta está compuesta por tres etapas, en donde para cada una de ellas se determinaron las variables más importantes para el proceso. La primera etapa fue diseñada para evitar el embancamiento de los espesadores, un problema crítico que puede afectar su operación continua. En esta fase, se implementan parámetros de control como el torque y la presión de cama, que permiten monitorear la estabilidad del espesador y evitar la acumulación de material en exceso en su interior.

La segunda etapa busca mantener el balance de masa al interior del equipo, controlando de manera precisa la alimentación de pulpa y la descarga de sólidos. Esto garantiza que el porcentaje de sólidos en la descarga cumpla con los requisitos operativos y mejore el rendimiento del proceso.

Finalmente, la tercera etapa fue diseñada con el objetivo de mejorar la calidad del agua recuperada, favoreciendo la sedimentación de partículas finas y contribuyendo al proceso global de recuperación de agua.